Electrostática en medios materiales

La ecuación (7), que corresponde a la formulación fundamental de la electrostática (la Ley de Coulomb), es descrita en término de la constante ε_0 exponiendo el hecho de que tal expresión es planteada para el vacío. Como es sabido, la electricidad es una propiedad fundamental de los elementos que componen cualquier material ordinario, por lo tanto, es ineludible plantearse la pregunta ¿Se verán afectados los fenómenos eléctricos cuando éstos suceden en un medio material? Si es así, ¿De qué manera podrá incluirse esto en las ecuaciones que describen estos fenómenos?
Antes de iniciar esta exploración, conviene hacer una clasificación de los materiales en términos de sus propiedades eléctricas. Aunque dichas propiedades derivan de sus características microscópicas, se pueden distinguir dos rasgos macroscópicos que permiten una gruesa clasificación en dos grandes grupos: ***Conductores y Dieléctricos.***

Conductores
El nombre "conductor" es derivado de la propiedad, que éstos presentan, de permitir cierta libertad para la movilidad de cargas en este tipo de sustancia (mayormente los metales). Dicha propiedad, que es consecuencia de la estructura "química" (enlace metálico), permite hacer algunas reflexiones acerca de su comportamiento en una situación electrostática.
Supóngase que a un cuerpo conductor se le suministra una carga ΔQ, la cual originalmente es puesta en alguna región localizada del conductor, como se muestra en la figura 19-a. Según la propiedad del material, la carga no está forzada a quedarse en la posición original.

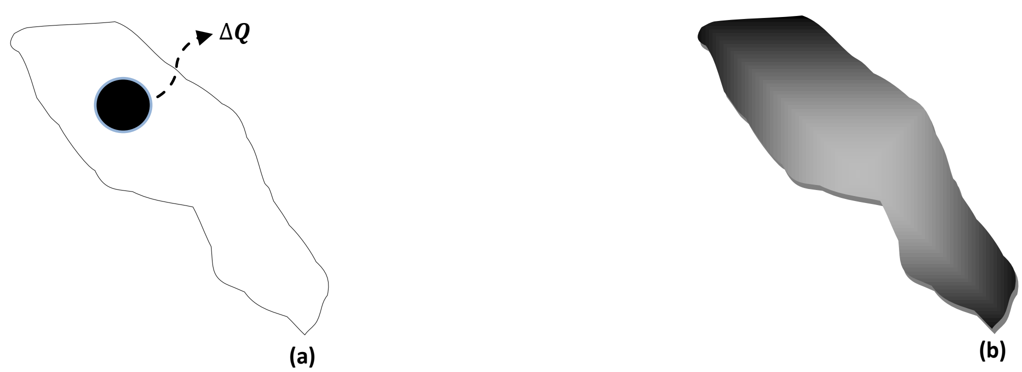


Fig. 19 Conductor cargado A: en el instante inicial; B: luego del tiempo de relajación **τ**

Se supone que dicha carga está compuesta por una gran cantidad de partículas (portadores de carga) y que éstas se repelen entre sí, de tal forma que, debido a la libertad de movimiento sobre el conductor, los portadores de carga terminarán distribuidos por todo el cuerpo del conductor, alcanzando finalmente, después de un tiempo de relajación τ, el equilibrio estático. En estas condiciones, sobre cada partícula cargada actúa finalmente una fuerza igual a cero y ya que ésta es la única acción sobre cada carga, la resultante, debida al campo producido por el resto de los portadores, es en cada punto

$$\vec{F} = q\vec{E} = 0$$

De lo cual se deduce que el campo electrostático, en todo punto del conductor es nulo

$$\vec{E}_c = 0$$

Lo que equivale a decir que el potencial es constante

$$\varphi = cte$$

así, puede pensarse un conductor como una región equipotencial.

Supóngase que a un objeto conductor se le entrega cierta cantidad de carga ΔQ, la cual se distribuye sobre todo el cuerpo. Una sencilla aplicación de la Ley de Gauss nos puede dar información interesante sobre el comportamiento de la carga en el conductor.

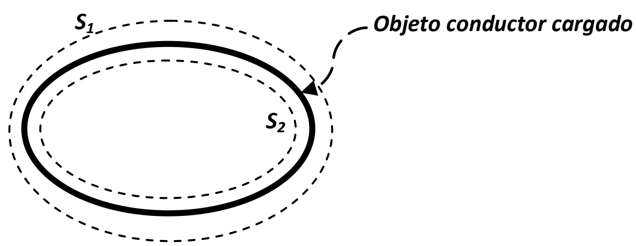


Fig. 20 Objeto conductor cargado; S_1: superficie gaussiana externa y S_2: superficie gaussiana interna

Al aplicar la ley de Gauss a este sistema, tomando una superficie S_1 que rodee al objeto (ver figura 20), se encuentra

$$\phi_{S_1} = \frac{1}{\varepsilon_0}\Delta Q$$

evidentemente, ΔQ es la carga suministrada al conductor. Ahora suponga que la superficie gaussiana, sobre la cual se desea aplicar la Ley de Gauss, es interna al objeto, tal como S_2 en la figura 20. En este caso, se sabe que el campo es cero y por lo tanto el flujo a través de S_2 también lo es

$$\vec{E}_{int} = 0 \implies \phi_{S_2} = 0$$

De lo cual se deduce que la carga encerrada por la superficie S_2 es cero. Ambos resultados se mantienen aún si S_1 y S_2 se aproximen a la superficie del conductor, la primera envolviéndolo totalmente y la segunda "recostándose" a la superficie del objeto desde el interior. De esta forma se concluye que la carga ΔQ debe estar distribuida únicamente sobre la superficie del conductor. Entonces al suministrársele carga a un conductor, éste adquirirá una densidad superficial $\sigma(\vec{r}')$, donde $\vec{r}'$ representa los puntos de la superficie.

De lo expuesto anteriormente se puede inferir que la superficie de los conductores representa la frontera de la electrostática y en su interior ésta es nula. La presencia de un conductor en alguna región del espacio debe afectar la dirección original de la líneas de fuerzas ya que éstas se verán truncadas en la superficie y por ser esta última equipotencial dichas líneas deben mostrarse normales (perpendiculares) a la superficie conductora al aproximarse a ésta, tal como se muestra en la figura 21, donde se representa un objeto conductor neutro sumergido en un campo eléctrico externo.

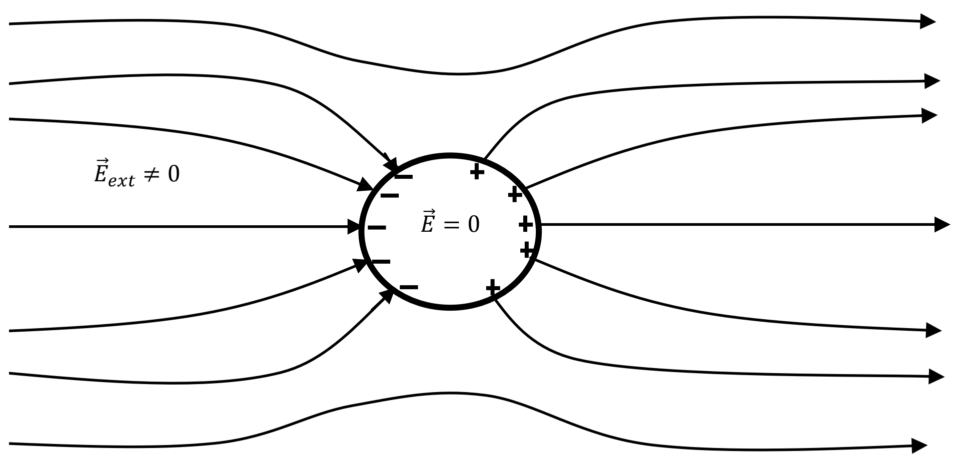


Fig. 21 Objeto conductor neutro sumergido en un campo eléctrico externo ($\vec{E}_{ext}$)

Nótese que algunas líneas terminan sobre el conductor, mientras que otras se originan en éste, lo que muestra la acumulación de cargas, de distintos signos, en regiones opuestas. Este efecto, que se conoce como polarización, permite al conductor hacer su propia contribución al campo externo ($\vec{E}_{ext} = \vec{E}_{original} + \vec{E}_{polarización}$). Como se demostró anteriormente el campo de un dipolo decae rápidamente con la distancia (ver ecuaciones 52, 53 y 54), por lo tanto para puntos moderadamente lejanos este efecto deja de ser es apreciable.

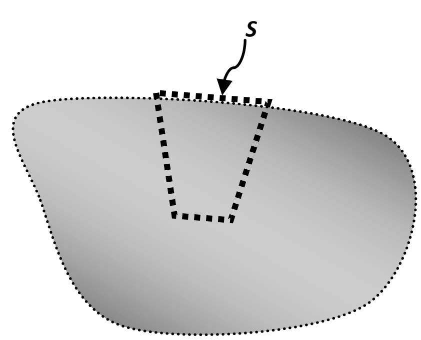


Fig. 22 Conductor cargado y superficie gausiana (línea punteada)

Existe una relación entre el campo eléctrico en las cercanías de un conductor y la densidad superficial de cargas local que éste presenta. Dicha relación puede establecerse a través de la figura 22, en la cual se muestra el perfil de una sección de un conductor cargado, con densidad superficial *σ*($\vec{r}'$) ($\vec{r}'$representa los puntos sobre la superficie). Se muestra además una superficie "gaussiana" (línea punteada) compuesta por una parte externa al conductor y cubriendo el mismo y el resto de ésta se encuentra en el interior.

Note que existe flujo sólo a través ***S*** y está dado por

$$\phi = \int_{\boldsymbol{S}} E(\vec{r}')\, ds'$$

(se sabe que el campo es paralelo a la normal sobre el conductor). Por otro lado, se encuentra que la carga encerrada es la que está contenida en $\boldsymbol{S}$, así se obtiene

$$Q_{enc} = \int_{\boldsymbol{S}} \sigma\,(\vec{r}')ds'$$

La ley de Gauss nos conduce a

$$E(\vec{r}') = \frac{1}{\varepsilon_0}\, \sigma(\vec{r}')$$

La ecuación (55) expresa el hecho que el campo eléctrico sobre cada punto de la superficie de un conductor solo puede ser normal a ésta y proporcional a la densidad local de cargas. En forma vectorial, (55), es escrita como

$$\vec{E}\Big|_{\boldsymbol{S}} = \frac{1}{\varepsilon_0}\, \sigma\hat{\boldsymbol{n}} \qquad (55)$$

Condensadores

Una configuración de conductores que resulta de gran interés, por sus características especiales, lo constituye los llamados condensadores. Este sistema está constituido por dos conductores muy cercanos con la facultad de adquirir cargas de igual valor pero de signo contrario. La propiedad de los conductores, en cuanto a la libertad de movimiento de la carga, y la cercanía de éstos permite una interacción muy "cerrada" que se manifiesta con la presencia de un campo eléctrico bien localizado. En la figura 23 se esquematiza esta configuración: dos conductores muy cercanos entre sí, con cargas $\pm Q$, se muestran, además, las líneas de fuerzas del campo, que queda prácticamente localizado en la región comprendida entre ambos conductores. Así mismo se afirma que la energía asociada está confinada a esta región con lo que el sistema puede tratarse en un contenedor de energía. La importancia de un condensador radica en este hecho, pues éste constituye un dispositivo que permite el almacenamiento transportable de energía. El condensador se ha convertido en un elemento de gran utilidad en la construcción y diseño de circuitos eléctricos y electrónicos.

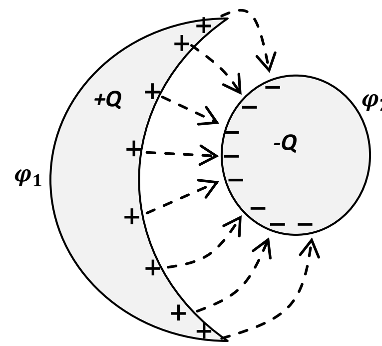


Fig.23 Condensador formado por dos conductores de diferente forma

Para calcular la energía almacenada en este sistema, es bueno recordar que el campo es conservativo y por lo tanto cualquiera sea el proceso efectuado, para formar esta agrupación, conllevará el mismo gasto de energía. De esta forma se puede pensar que para formar esta configuración se procede a transferir carga de un conductor al otro, hasta llegar al estado final. El trabajo que se hace sobre el sistema para pasar una cantidad de carga *dq* desde el conductor 1 al conductor 2, estará dado por

$$dW = dq(\varphi'_2 - \varphi'_1) = V'dq$$

donde V' es la diferencia de potencial que existe, entre los conductores, al momento de hacer la transferencia. Dicho trabajo representa la cantidad de energía que se le suministra al sistema y que éste almacena como energía potencial *U*. En la medida que los conductores se van cargando la diferencia de potencial V' entre ellos aumenta de manera proporcional

$$V' \propto Q'$$

Q' corresponde al valor de la carga sobre cualquiera de los dos componentes en cualquier instante. Rescrito de otra forma

$$Q' = CV' \qquad (56)$$

La constante C, que se conoce como *la capacidad del condensador*, cuantifica la propiedad del sistema a adquirir carga en la medida que se establece una diferencia de potencial entre sus componentes. Dicha constante es propia de cada sistema y depende, en buena medida, de la estructura geométrica de éste, la unidad de capacidad de un condensador en el sistema MKS, es el *Faradio* (F), el cual se define como

$$1\,Faradio \equiv \frac{1\,Coulomb}{1\,volts}$$

Como se sabe, en el ámbito electrostático, *1C* es una cantidad de carga muy grande y consecuentemente un condensador de un *Faradio* de capacidad es un dispositivo muy difícil de obtener. Las capacidades más comunes y comerciales son

$$10^{-12}\,F = pF;\;10^{-6}\,F = \mu F;\;\;10^{-3}\,F = mF$$

En términos de la capacidad, la energía almacenada en el sistema se escribirse como

$$U = \frac{1}{C}\int_0^Q Q'dQ' = \frac{Q^2}{2C} \tag{57}$$

La ecuación (57) representa la energía almacenada en un condensador que, teniendo una capacidad C, adquiere una carga Q. En términos de la diferencia de potencial se puede escribir ésta como

$$U = \frac{1}{2}CV^2 \tag{58}$$

Como puede verse, la capacidad de un condensador es el valor característico más importante en su descripción. Conociendo dicho valor es fácil determinar la cantidad de energía que puede almacenarse en este dispositivo.

Condensador de placas paralelas

Como un ejemplo emblemático se calcula, a continuación, la capacidad de un condensador de placas paralelas. Este dispositivo consta de dos placas metálicas idénticas de área A, enfrentadas y separadas una corta distancia d, como se muestra en la figura 24.

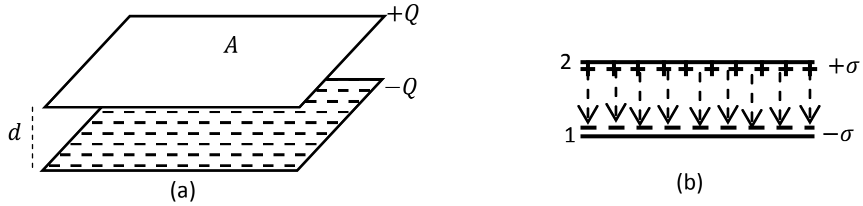


Fig.24 (a) Condensador de placas paralelas; (b) vista de perfil

La capacidad de este sistema se puede calcular a partir de (56), escrita como

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

La carga está distribuida uniformemente sobre cada placa, de tal forma que éstas adquieren densidad uniforme $\pm\sigma$ y por lo tanto

$$Q = \sigma A$$

Por otro lado, la diferencia de potencial V entre ambas láminas se puede obtener a partir de (43),

$$V = \int_1^2 Edl$$

En esta expresión se ha tomado en cuenta que el campo es uniforme, tal como se muestra en la figura 24-b. Siendo el camino de integración una línea recta de la placa inferior a la superior, se encuentra que

$$V = Ed$$

Por otra parte, a partir (55) se encuentra

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$$

Y finalmente se obtiene

$$C = \varepsilon_0 \frac{A}{d}$$

La capacidad de un condensador de placas paralelas es directamente proporcional al área de las placas e inversamente proporcional a la separación d entre éstas.

Condensador esférico

Un condensador esférico está formado por una esfera conductora de radio R_1 y una "concha" esférica de radio mayor R_2, concéntrica con ésta (ver figura 25). Igualmente que en el caso anterior se calcula la diferencia de potencial como

$$V = -\int_{R_1}^{R_2} Edr$$

El campo está confinado a la región entre R_1 y R_2 y es de la forma

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{r^2}$$

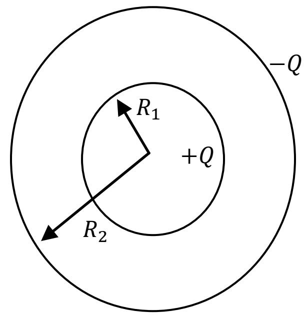


Fig. 25 Condensador esférico

Entonces, la diferencia de potencia es

$$V = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right]$$

y la capacidad de este sistema es

$$C = 4\pi\varepsilon_0\left[\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2}\right]^{-1}$$

o

$$C = 4\pi\varepsilon_0\frac{R_1R_2}{R_2 - R_1}$$

Este resultado puede ser rescrito en término de la separación d entre los electrodos, tomando

$$R_1 = R_0 \text{ y } R_2 = R_0 + d$$

De esta forma se encuentra

$$C = 4\pi\varepsilon_0\frac{{R_0}^2}{d}\left(1 - \frac{d}{R_0}\right)$$

Como se ha mencionado antes, la separación entre los electrodos debe ser muy pequeña, entonces, para un condensador esférico convencional se debe cumplir

$$\frac{d}{R_0} \ll 1$$

Lo que nos indica que las dimensiones de la esfera interna del condensador y de la "concha" externa son aproximadamente iguales, como se indica en la figura 26.

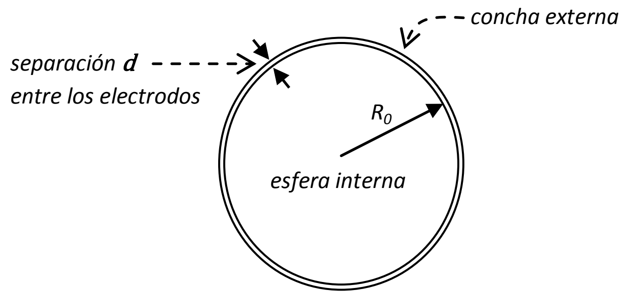


Fig.26 Condensador esférico de electrodos muy cercanos

En estas condiciones la capacidad de este condensador toma la forma

$$C \cong 4\pi\varepsilon_0 \frac{{R_0}^2}{d} = \varepsilon_0 \frac{A}{d}$$

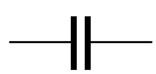
siendo $A = 4\pi R_0^2$ el área de la esfera.

Curiosidad

Suponga que se pretende construir un condensador, cuya separación entre los electrodos sea d= 5,0 cm., y con capacidad de 1 Faradio. Los resultados anteriores nos muestran que, para un condensador de placas paralelas, el área debería ser aproximadamente 565.486,7 Ha (Hectáreas), mientras que para un condensador esférico se tendría un radio de 21,2 Km aproximadamente. Haciendo poco menos que imposible la construcción de un dispositivo de estos valores.

Conexiones en serie y paralelo

Los condensadores son parte esencial de una gran cantidad de circuitos eléctricos y electrónicos, por esta razón conviene hacer un estudio (aunque muy ligero) de su comportamiento en dichos circuitos. Se señala un condensador en un circuito mediante el símbolo siguiente



Es de interés examinar el comportamiento de una combinación de varios de estos elementos en una instalación eléctrica.

Se dice que una conexión está en serie si sus elementos están acoplados una detrás del otro, como se indica en la figura 27, en la cual se representa una combinación de N condensadores conectados a un dispositivo que le suministra una carga Q y sostiene al sistema con diferencia de potencial V entre sus extremos.

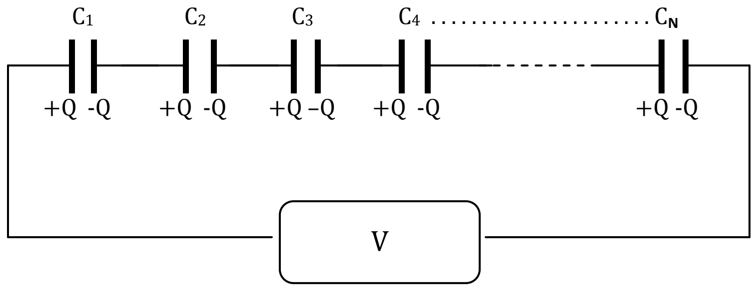


Fig. 27 Conexión de N condensadores en serie

La capacidad de este sistema está dada por

$$C_s = \frac{Q_s}{V}$$

En este tipo de combinación la carga del sistema es igual a la carga en cada condensador

$$Q_S = Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q_4 = \cdots = Q_N$$

Por otro lado, la diferencia de potencial V, aplicada en los extremos del sistema, es la suma de las diferencias de potencial en cada condensador

$$V = \sum_{i=1}^{N} V_i$$

Entonces, se encuentra que

$$C_s = \left[\frac{\sum_{i=1}^{N} V_i}{Q_S}\right]^{-1} = \left[\sum_{i=1}^{N} \frac{V_i}{Q_i}\right]^{-1} = \left[\sum_{i=1}^{N} \frac{1}{C_i}\right]^{-1} \tag{59}$$

La expresión (59) nos indica que la capacidad equivalente en una conexión en serie es el inverso de la suma de los inversos de cada capacidad y consecuentemente su valor es más pequeño que el menor valor de sus componentes.

Una conexión en paralelo es aquella en la cual todos los elementos comparten terminales comunes y en consecuencia todos experimentan la misma diferencia de potencial V, como se indica en la figura 28 para un conjunto de N de condensadores. En este tipo de conexión es fácil advertir que la carga total Q_p debe ser la suma de cada carga individual Q_i.

Entonces se tiene para esta combinación

$$V = V_1 = V_2 = V_3 = V_4 = \cdots = V_N$$

mientras que

$$Q_p = \sum_{i=1}^{N} Q_i$$

Se encuentra entonces

$$C_p = \frac{\sum_{i=1}^{N} Q_i}{V} = \sum_{i=1}^{N} \frac{Q_i}{V_i} = \sum_{i=1}^{N} C_i \tag{60}$$

En este caso la capacidad equivalente C_p es la suma directa de cada una de las capacidades.

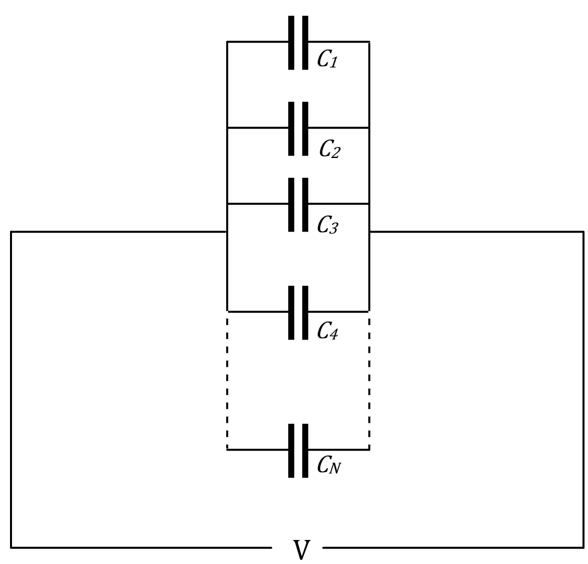


Fig.28 Conexión de N condensadores en serie

Dieléctrico

A diferencia de los conductores, los materiales dieléctricos no permiten el libre movimiento de cargas sobre ellos, por el contrario la carga en exceso puede quedar localizada en alguna región del dieléctrico y por este rasgo también se les conoce por el nombre de aislantes eléctricos.
No hay razón para pensar que el campo eléctrico se anule en el interior de estos materiales. Al analizar, desde el punto de vista microscópico, la estructura de estos medios, se encuentra que sus componentes fundamentales pueden ser descritas como dipolos eléctricos, permanentes en las sustancias “polares” (cómo el agua), e inducidos, en las sustancias no polares. En la figura 29 se ilustra, de manera muy simple, los modelos para las moléculas polares (29-a) en donde se indica la separación permanente de las cargas positivas y negativas, y el correspondiente a las moléculas no polares 29-b, representado por cargas positivas “rodeadas” de cargas negativas.

Fig 29 idealización de la molécula de un dieléctrico (a) polar, (b) no polar

La presencia de un campo externo debe afectar la orientación de ambas tipos de moléculas, esto es ilustrado en la figura 30. En efecto la molécula polar tenderá a alinearse en la dirección del campo, mientras que en la molécula no polar las cargas tienden a separarse por la acción del campo, mostrándose como dipolos eléctricos inducidos (figura 30-b).

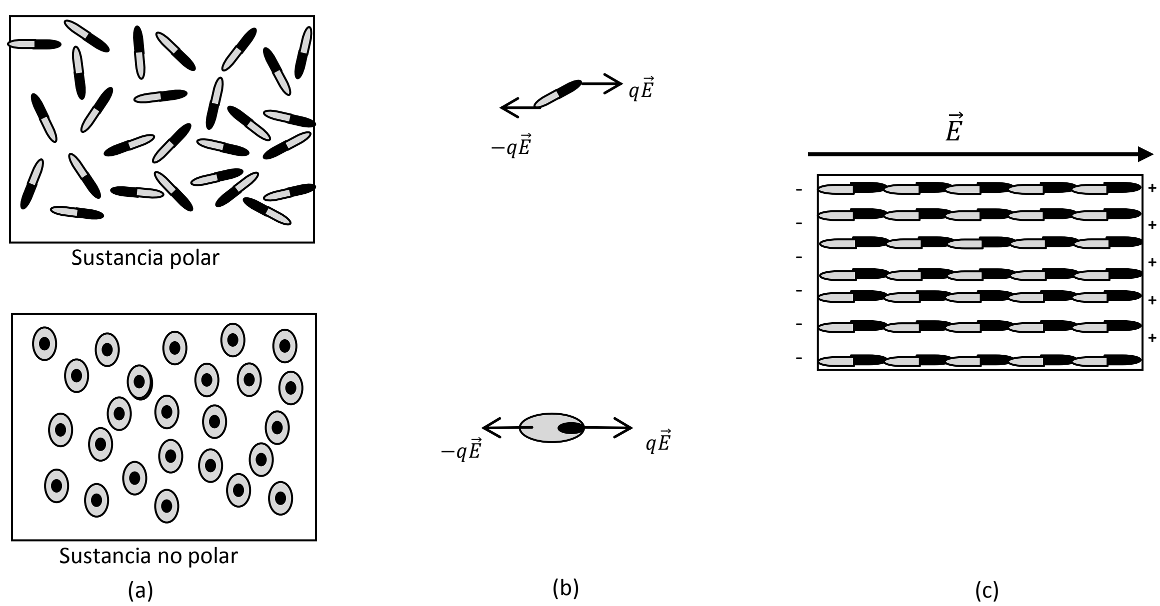


Fig. 30 Acción de un campo externo sobre una sustancia dieléctrica (polar y no polar): a) Sustancias libre de campos b) Acción del campo sobre las moléculas c) Efecto total del campo

El efecto del campo externo sobre un dieléctrico puede visualizarse en la figura 30-c, en la que se aprecia la acumulación de cargas de diferentes signos en los extremos del cuerpo. En la figura 31 se muestra el efecto en una forma más simplificada, esta imagen puede ayudar a entender como es el campo dentro de los dieléctricos.

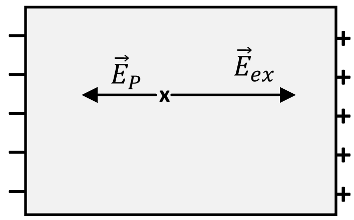


Fig. 31 Dieléctrico polarizado por acción de un campo eléctrico externo

La acumulación de cargas en los extremos del dieléctrico, debido a la polarización inducida por el campo externo $\vec{E}_{ext}$, genera su propio campo $\vec{E}_P$ en dirección opuesta. La polarización, y consecuentemente el campo generado por ésta, depende tanto de la intensidad del campo externo como de las propiedades del medio, y se encuentra

$$E_p = \chi E_{ext}$$

En donde χ es una constante adimensional que sintetiza las propiedades eléctricas del medio. Se encuentra que

$$0 \leq \chi \leq 1$$

Los valores extremos 0 y 1 pueden representar el vacio y medios conductores, respectivamente. Entonces, el campo dentro del medio dieléctrico, debe tomar la forma

$$E_d = E_{ext} - E_p = (1 - \chi)E_{ext}$$

Conviene expresar la cantidad $(1 - \chi)$ como una nueva constante, definiendo de esta forma la constante dieléctrica del medio

$$k \equiv \frac{1}{(1 - \chi)}$$

evidentemente

$$1 \leq k < \infty$$

En términos de ésta se escribe el campo eléctrico para un medio dieléctrico

$$\vec{E}_d = \frac{1}{k}\vec{E}_{ext} \tag{61}$$

Por otro lado, a partir de la ecuación (43), se encuentra para la diferencia de potencial V_d, en un medio dieléctrico toma la forma

$$V_d = -\int_1^2 E_d dl = -\frac{1}{k}\int_1^2 E dl = \frac{1}{k}V$$

Al igual que el campo, la diferencia de potencial (y el potencial φ) se ve atenuada en una proporción k con relación a los valores cuando no existe medio

$$\varphi_d = \frac{1}{k}\varphi \tag{62}$$

Y

$$V_d = \frac{1}{k}V \tag{63}$$

Las expresiones (61), (62) y (63), nos permiten interpretar la electrostática en medios materiales de una manera muy simplificada, agregando únicamente la constante dieléctrica k como un término de atenuación en las ecuaciones previamente deducidas para el vacio. En particular, el campo generado por una carga puntual toma la forma

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi k\varepsilon_0}\frac{q}{|\vec{r}-\vec{r}'|^3}(\vec{r}-\vec{r}')$$

La cantidad

$$k\varepsilon_0 \equiv \varepsilon$$

se le define como la *permitividad eléctrica* del medio. De esta forma, la mayor parte de la formulación de la electrostática en medios dieléctricos puede obtenerse simplemente sustituyendo, en los previos resultados, la permitividad ε_0 por el respectivo ε del medio. En términos de ésta, el campo generado por una carga puntual en un medio dieléctrico de permitividad ε, toma la forma

$$\vec{E}(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \frac{q}{|\vec{r} - \vec{r}\,'|^3} (\vec{r} - \vec{r}\,')$$

Así mismo, el potencial asociado a una carga puntual, se escribe como

$$\varphi(\vec{r}) = \frac{1}{4\pi\varepsilon} \frac{q}{|\vec{r} - \vec{r}\,'|}$$

Es importante señalar que para campos de muy alta intensidad el comportamiento de los medios es mucho más complejo, también cabe destacar que muchos materiales de propiedades exóticas tampoco obedecen a este comportamiento.

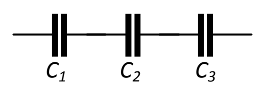
Una aplicación inmediata de los resultados anteriores, es el cálculo de la capacidad de un condensador con el espacio entre sus electrodos lleno por algún dieléctrico de constante k. Para llevar a cabo este cálculo basta con sustituir (63) en (56), y se encuentra

$$C_d = kC_0$$

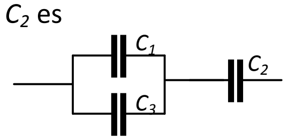
Lo que indica que la capacidad de un condensador con dieléctrico aumenta en una cantidad k en comparación con la capacidad del condensador original (sin dieléctrico).

Preguntas y problemas

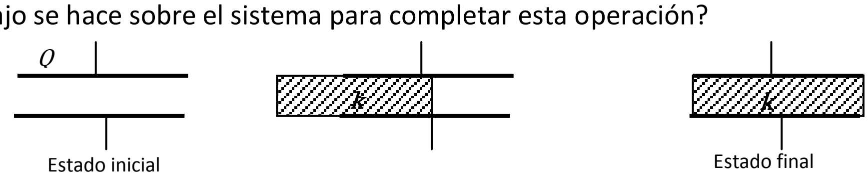
1. A una esfera conductora de radio R, se le suministra una carga Q. Se encuentra que el potencial a una distancia $r = \frac{R}{3}$, del centro está dado por
   a) $\varphi = \frac{3}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{R}$ b) $\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{R}$ c) $\varphi = 0$ d) Otro valor__________________
2. Suponga que mediante un hilo conductor muy delgado se conecta la esfera de la pregunta anterior con otra esfera conductora que posee un radio $R_2 = \frac{R}{3}$. Al establecerse el equilibrio podemos asegurar que la carga en la segunda esfera es
   a) $Q_2 = 2Q$ b) $Q_2 = \frac{1}{4}Q$ c) $Q_2 = \frac{3}{4}Q$ d) Otro valor __________________
3. Una barra conductora de longitud L, que puesta en un campo eléctrico, se polariza al agruparse en sus extremos cargas $\pm Q$. En esta condición la diferencia de potencial entre sus extremos es
   a) $V = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{L}$ b) $V = \frac{1}{2\pi\varepsilon_0}\frac{Q}{L}$ c) $V = 0$ d) Otro valor __________________
4. Dos láminas conductoras circulares están enfrentadas y separadas una distancia $d = 5.0\ mm$, cual debe ser le radio de ambas láminas para que la capacidad de este sistema sea $C = 15pF$.
   a) $R \cong 17{,}2\ cm$ b) $R \cong 1{,}72\ cm$ c) $R \cong 172\ cm$ d) Otro valor __________________
5. La figura muestra una conexión en serie de tres condensadores, de valores $C_1 = 15\mu F$, $C_2 = 30\mu F$ y $C_3 = 45\mu F$. Si en los extremos de este sistema se mantienen una diferencia de potencial *10 volts* Volts. La diferencia de potencial V_2 en el condensador C_2 es



   a) $V_2 = 2{,}73\ volts$ b) $V_2 = 10\ volts$ c) $V_2 = 7{,}27\ volts$ d) Otro valor __________________
6. Suponga que los condensadores de la pregunta anterior se conectan en la forma que se muestra más abajo, y se le aplican igualmente *10 volts* en los extremos del sistema. La carga en C_2 es



   a) $Q_2 = 2{,}0x10^{-4}C$ b) $Q_2 = 3{,}0x10^{-4}C$ c) $Q_2 = 9{,}0x10^{-4}C$ d) Otro valor __________________
7. Sobre un condensador esférico de radio $R_0 = 3.0\ cm$ y separación entre sus componentes d=2.0 mm, se aplica una diferencia de potencial V= *100 volts*. La carga que adquiere dicho condensador
   a) Q=5.0x$10^{-9}C$ b) Q=3.0x$10^{-8}C$ c) Q=5.0x$10^{-5}C$ d) Otro valor __________________
8. En la situación de la pregunta anterior, se tiene que la energía almacenada en el sistema es
   a) U=25 *joul* b) U=2,5 *joul* c) U=2,5x10^{-7} *joul* d) Otro valor __________________
9. Se tiene un condensador cargado, de capacidad $C = 2.0\mu F$, con carga $Q = 3.2x10^{-6}C$. Suponga que se introduce un dieléctrico, de constante $k = 2.0$, siguiendo el procedimiento mostrado en la figura. ¿Qué trabajo se hace sobre el sistema para completar esta operación?



   a) $W = 0{,}2\ joul$ b) $W = -0{,}2\ joul$ c) $W = 2{,}0\ joul$ d) Otro valor __________________

10. Se conectan en serie dos condensadores de igual valor $C = 4.0\mu F$ y se le aplica una diferencia de potencia $V= 10$ *volts*, adquiriendo el sistema una carga Q_s. Ahora suponga que se hace una conexión en paralelo con los mismos condensadores e igualmente se aplica la misma diferencia de potencial, con lo que el sistema adquiere una carga Q_p. La relación entre estas cargas es

    a) $\frac{Q_s}{Q_p} = 0{,}50$ b) $\frac{Q_s}{Q_p} = 0{,}25$ c) $\frac{Q_s}{Q_p} = 1{,}0$ d) Otro valor ___________________

11. La relación entre la energía almacenada U_s , cuando están en serie y la energía U_p, estando en paralelo, en la situación de la pregunta anterior es

    a) $\frac{U_s}{U_p} = 0{,}50$ b) $\frac{U_s}{U_p} = 0.25$ c) $\frac{U_s}{U_p} = 1{,}0$ d) Otro valor ___________________

12. Si uno de los condensadores, de la pregunta anterior, se le llena con un dieléctrico de constante $k=2.0$, entonces la relación entre las cargas, estando en serie y paralelos, es

    a) $\frac{Q_s}{Q_p} = 4{,}5$ b) $\frac{Q_s}{Q_p} = 0{,}5$ b) $\frac{Q_s}{Q_p} = 1{,}0$ d) Otro valor ___________________

13. La figura muestra un condensador de placas paralelas, de área A y separación d, relleno parcialmente con un dieléctrico, de constante k y espesor x, como se indica. La capacidad de este sistema es

    a) $C = k\varepsilon_0 \frac{A}{d}$ b) $C = k\varepsilon_0 \frac{A}{[kx + x(k-1)]}$ c) $C = k\varepsilon_0 \frac{A}{[(x+d)]}$ d) Otro valor ___________________