6.3 Condensadores y dieléctricos.

6.3.1 CONCEPTO DE DIPOLO. MATERIALES DIELÉCTRICOS.

Un material mal conductor o dieléctrico, no posee cargas libres, al contrario de un material conductor, como por ejemplo un metal. Sin embargo, se compone de moléculas y éstas a su vez contienen átomos con cargas, pues están compuestos de núcleos positivos y electrones.

Las moléculas de un material dieléctrico, aunque son eléctricamente neutras, se ven afectadas por la presencia de los campos eléctricos. El campo eléctrico ejerce una fuerza sobre cada parte cargada de la molécula, empujando las positivas en un sentido y las negativas en el contrario, con la que la configuración de las partículas cargadas en el interior de la molécula, se modifica respecto de la que existía antes de aplicar un campo eléctrico. Un campo eléctrico aplicado sobre un material dieléctrico produce un doble efecto:

- *De polarización*, aumentando la distancia o separación media entre el centro de " gravedad " de las cargas positivas y negativas, del interior de las moléculas, formándose un dipolo eléctrico:

Dipolo eléctrico, *es el conjunto de dos cargas iguales y de signos opuestos, separadas una cierta distancia* $\vec{a}$ **,** fig.6.32. En el se define **el momento dipolar eléctrico** $\vec{p}$ **,** de dos cargas $+q$ y $-q$, como un vector, igual al producto de una de las cargas, por la distancia que las separa, donde el vector $\vec{a}$ apunta de la carga negativa a la positiva. El momento dipolar $\vec{p}$ tiene la dirección y sentido del vector $\vec{a}$. Vectorialmente:

$$\vec{p} = q\,\vec{a} \qquad (6.48)$$

Las dos cargas del dipolo estarán en equilibrio, bajo la acción del campo eléctrico externo, y el campo interno molecular de atracción entre ellas.

- *De orientación,* el campo eléctrico aplicado produce un par de fuerzas sobre cada dipolo, fig. 6.33, cuyo momento lo hace girar hasta que se orienta en la dirección del campo eléctrico externo.

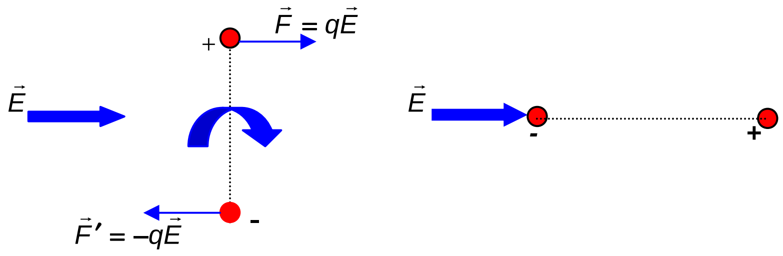


Fig.6.33

Las moléculas que componen un dieléctrico pueden *ser polares, o no polares.* En el caso de ser *polares* fig.6.34, entonces ya poseen un momento dipolar propio, y ocurre muchas veces, que el efecto eléctrico macroscópico observable, es despreciable, debido a la orientación aleatoria de los dipolos moleculares, excepto si existe un campo eléctrico externo que oriente los dipolos, en media, en la dirección del campo. Las *no polares*, son polarizadas primero por acción del campo eléctrico externo fig.6.35 y después sufren una orientación en la dirección del campo eléctrico externo aplicado.

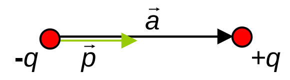


Fig.6.32

Dipolo eléctrico. El vector momento dipolar $\vec{p}$, apunta de la carga negativa a la positiva.

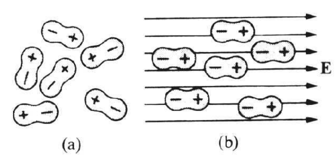


Fig.6.34

Las moléculas polares (a) están orientadas inicialmente de un modo aleatorio. Cuando se aplica un campo eléctrico, se orientan todas en la misma dirección, (b)

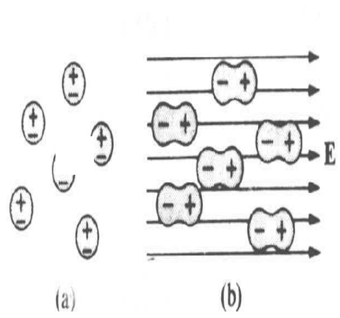


Fig.6.35

En las moléculas no polares, en (a) no hay una separación efectiva de cargas. Después se polarizan por el campo eléctrico, en (b), y a la vez se orientan en la dirección del campo.

CUESTIONES Y EJERCICIOS

CB24

6.3.2 INFLUENCIA DEL DIELÉCTRICO EN EL CAMPO ELÉCTRICO.

Cuando en el interior de un material dieléctrico se orientan mayoritariamente los dipolos moleculares en una dirección determinada se dice que el material se ha polarizado. Ya que esta polarización se debe básicamente a una separación media entre las cargas positivas y negativas a escala molecular, estas cargas producirán un campo que se sumará al campo eléctrico externo, originalmente aplicado. Desde un punto de vista macroscópico un material dieléctrico que esta polarizado se describe mediante el llamado ***vector polarización*** $\vec{P}$, *que se define como el momento dipolar eléctrico por unidad de volumen, es decir como una densidad de polarización*

$$\vec{P} = \frac{\sum_{i \in \Delta V} \vec{p}_i}{\Delta V} \qquad (6.49)$$

siendo $\vec{p}_i$ el momento dipolar eléctrico de la molécula *i* .

Se demuestra y comprueba experimentalmente, que para campos eléctricos no muy intensos -situación bastante usual- la polarización $\vec{P}$ y el campo eléctrico son proporcionales, escribiéndose la relación entre ambos de la forma

$$\vec{P} = \chi \varepsilon_0 \vec{E} \qquad (6.50)$$

en donde la constante χ -Ji-, se llama ***susceptibilidad eléctrica del material***, que también se suele describir por medio de la ***constante dieléctrica relativa*** K del material, que se define a través de la relación.

$$\mathrm{K} = 1 + \chi \qquad (6.51)$$

La ***permitividad dieléctrica absoluta*** ε , de un aislante es el producto de la constante dieléctrica relativa, por la permitividad del vacío ε_0

$$\varepsilon = \mathrm{K} \cdot \varepsilon_0 \qquad (6.52)$$

La constante dieléctrica relativa K *no tiene dimensiones y es un número mayor o igual que la unidad*. Para el vacío $\mathrm{K} = 1$ exactamente, sin embargo, para otros materiales como el vidrio, K puede variar entre 5 y 10, y para el aire, K vale aproximadamente 1, véase la tabla 6.1.

6.3.3 CAPACIDAD DE UN CONDENSADOR. APLICACIÓN AL CONDENSADOR PLANO.

Un condensador está formado por dos conductores muy próximos, separados por un dieléctrico o el vacío fig.6.36. Se define la capacidad de un condensador, como el cociente entre la carga que se almacena en una de sus armaduras y el potencial de ésta, respecto de la otra armadura.

$$C = \frac{Q}{V} \qquad (6.53)$$

Se encuentra experimentalmente fig.6.37, que al introducir un dieléctrico homogéneo de constante dieléctrica *K*, entre las armaduras de un condensador cargado y aislado, que se halla a un potencial *V,* la diferencia de potencial entre sus placas se hace *1/K* veces menor, *V´=V/K* y la capacidad del condensador *C´* aumenta,.

$$C' = \frac{Q}{V'} = \frac{Q}{V/K} = K\frac{Q}{V} = K\,C \qquad (6.54)$$

Tabla 6.1

Material	K
Vacío	1
Aire	1,00059
Baquelita	4,9
Vidrio Pyrex	5,6
Teflón	2,1
Nylon	3,4
Papel	3,7
Agua	80
Poliestireno	2,56

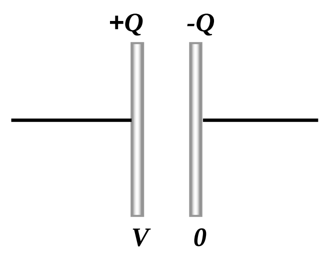


Fig.6.36
Dos placas conductoras de un condensador cargado, tienen igual carga, pero de signos opuestos.

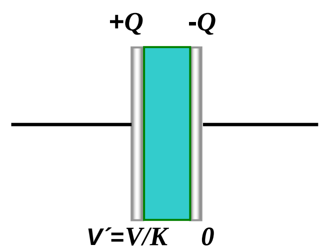


Fig.6.37

Al introducir un dieléctrico, la nueva diferencia de potencial resulta *1/K* veces menor, que antes.

CUESTIONES Y EJERCICIOS

CB25; CB26; CB27
EB15;EB16;EB17
PB11

La capacidad del condensador, es ahora K veces mayor que sin dieléctrico, recuerda que es *K>1.*

Para un condensador plano sin dieléctrico, cuyas armaduras tienen una sección *A*, y están separadas una distancia *d*, la capacidad viene dada según la ec.(6.43) por: $C = \varepsilon_0 \dfrac{A}{d}$

Si se introduce un dieléctrico, la capacidad es ahora *C´*

$$C' = K \cdot C = K \cdot \varepsilon_0 \frac{A}{d} = \varepsilon \frac{A}{d} \qquad (6.55)$$

Siendo ε la permitividad dieléctrica absoluta del material.

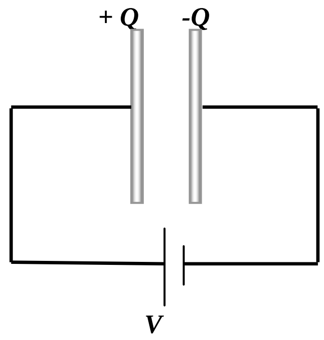


Fig.6.38

Condensador sin dieléctrico, cargado con una pila de voltaje **V.**

- **¿Qué sucede en el condensador al introducir un dieléctrico?.**

Un condensador sin dieléctrico conectado a una pila de potencial *V,* adquiere unas cargas $+Q$ y $-Q$, fig.6.38. Al introducir un *aislante*, fig.6.39, el efecto "aparente" producido, es como si *éste* apantallara, (amortiguara) el valor del campo eléctrico creado por las cargas, sin embargo, es conveniente analizar este fenómeno con cierto cuidado.

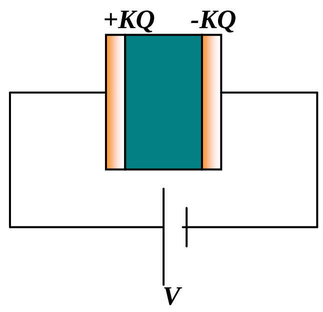


Fig.6.39

Condensador con dieléctrico, al que se le aplica el mismo potencial ***V***. La carga de las armaduras se hace ***K*** veces mayor.

Al estar las armaduras del condensador conectadas a una pila de potencial V, e introducir el dieléctrico, el voltaje V tiene que seguir siendo el mismo, pero la capacidad del condensador se hace *K* veces mayor, ec.(6.54). En consecuencia la carga de las armaduras valdrá:

$$Q' = C' \cdot V = K\,C \cdot V = K \cdot Q \qquad (6.56)$$

La carga en las armaduras del condensador toma un nuevo valor, que es K veces mayor, que el de la carga que tenía antes de introducir el dieléctrico. Así que ***a igualdad de voltaje, la carga aumenta***, pero las cargas han sido suministradas por la pila.

En este último caso, el campo en el interior del condensador es el mismo que antes, pues según la ec.(6.38) al no modificarse el potencial *V*, ni la distancia entre placas *d*, no varía el valor del campo eléctrico entre las armaduras. Sin embargo, como en las placas es ahora la carga K veces mayor, ec.(6.56), tenemos que admitir, que si no ha aumentado el campo eléctrico, es porque el dieléctrico ejerce un efecto apantallante.

- **Cargas de polarización**

El efecto que produce un dieléctrico, es posible justificarlo, si admitimos que en su interior o en la superficie del mismo, aparecen ciertas ***cargas,*** llamadas ***de polarización***, aunque globalmente el dieléctrico sea un material neutro. Se demuestra, que en el caso de un dieléctrico homogéneo, sólo hay carga de polarización en las superficies de éste, con densidades superficiales de cargas $-\sigma_{Pol}$ frente a la armadura positiva y $+\sigma_{Pol}$ frente a la armadura negativa; fig.6.40. Por aplicación del teorema de Gauss se determina, que la densidad de cargas de polarización, es igual al módulo del vector polarización.

$$+\sigma_{Pol} = \left|\vec{P}\right|$$

Las cargas de polarización están ligadas al material dieléctrico y no pueden salir del mismo, a diferencia de las cargas de las armaduras del condensador, que llegan y salen desde el circuito, por ser cargas libres.

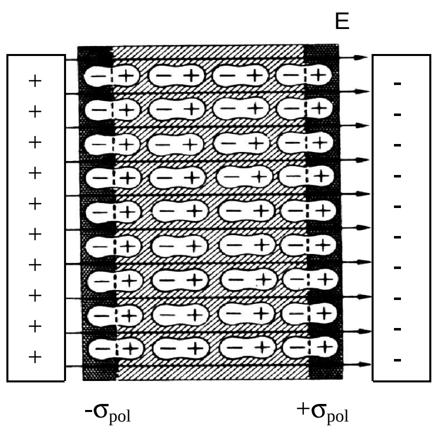


Fig.6.40

Cargas de polarización en la superficie de un dieléctrico homogéneo, situado en un campo eléctrico.

6.3.4 ENERGÍA DEL CONDENSADOR.

La posibilidad de situar cargas en las placas de un condensador cuando éste se conecta a una pila de potencial *V,* nos permite una forma de almacenamiento de energía. Para calcular ésta energía basta determinar el trabajo que hace la pila para cargar las placas con cargas $+Q_0$ y $-Q_0$. El trabajo elemental al llevar una carga dQ hasta la armadura que tiene potencial V es $V\,dQ$, por lo tanto el trabajo total que realiza la pila, igual a la energía que acumula el condensador , es la suma de todos los trabajos elementales, que se calcula mediante integración.

$$U = W = \int_0^{Q_0} V dQ = \frac{1}{C}\int_0^{Q_0} Q dQ = \frac{Q_0^2}{2C} \qquad (6.57)$$

y teniendo en cuenta que $Q_0 = V \cdot C$ también toma las formas:

$$U = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}Q_0 V \, . \qquad (6.58)$$

Esta energía puede ser extraída del condensador conectándolo a un circuito, para descargarlo a través del mismo. La carga de la armadura negativa circula por el circuito externo, hasta neutralizar la carga de la armadura positiva, y durante este recorrido el condensador entrega la energía acumulada al circuito.

- **¿Cuánta energía almacena un condensador con dieléctrico?.**

Si un condensador está conectado a una pila de potencial *V,* y se le introduce un dieléctrico de constante dieléctrica *K,* su capacidad se hace *K* veces mayor pues $C' = K \cdot C$; ec.(6.54) y la energía del condensador será

$$U' = \frac{1}{2}C'V^2 = \frac{1}{2}K \cdot C \cdot V^2 = K\left[\frac{1}{2}C \cdot V^2\right] = K \cdot U\,; \qquad \text{con } K>1$$

Un condensador con un dieléctrico de constante dieléctrica *K,* almacena una energía *K* veces mayor, que si existiera el vacío entre sus armaduras.

Sin embargo, ¿cómo sucede este fenómeno?, realicemos un análisis cualitativo del mismo. El dieléctrico permite almacenar más energía, como consecuencia de que es necesaria para producir la polarización del dieléctrico, pues hay que realizar un trabajo para conseguir la polarización de las moléculas y modificar su orientación. Esta energía es devuelta al circuito, cuando se descarga el condensador.

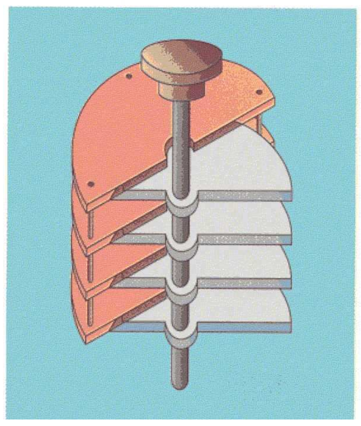
La energía de un condensador con dieléctrico, se puede expresar como la suma de la energía del condensador sin dieléctrico, más la energía de polarización, que queda acumulada en el volumen del propio dieléctrico. Se puede encontrar una relación entre la energía del condensador y ciertas magnitudes características del propio condensador y del dieléctrico, como su permitividad absoluta ε y el volumen *V* del material, así como el campo eléctrico *E,* existente entre las armaduras..

$$U' = \frac{1}{2}K\varepsilon_0 E^2 \cdot Vol = \frac{1}{2}\varepsilon E^2 \cdot Vol \qquad (6.59)$$

- **Densidad de energía**

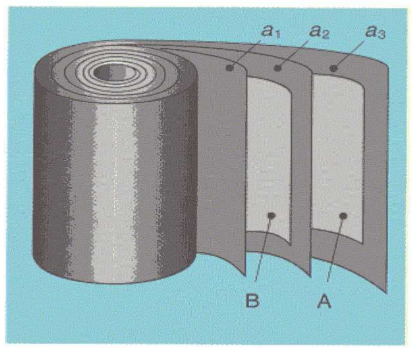
Si la energía se refiere a la unidad de volumen, se obtiene la densidad de energía. Dividiendo en (6.61) por el volumen resulta:

$$u' = \frac{U'}{Vol} = \frac{1}{2}\varepsilon E^2 \qquad (6.60)$$



Condensador variable.

Al variar la superficie de una de las armaduras, enfrentada a la otra, se modifica la capacidad del condensador.



Los condensadores comerciales se suelen fabricar mediante dos hojas metálicas. Un papel impregnado en parafina sirve como dieléctrico. Estas hojas alternadas se enrollan dándole la forma de un cilindro. Los condensadores pequeños son a veces fabricados con materiales cerámicos.

CUESTIONES Y EJERCICIOS

CB28; CB29
EB18;
PB12;PB13

6.3.5 ASOCIACIÓN DE CONDENSADORES.

Los condensadores se pueden conectar entre sí (asociar), con objeto de conseguir una configuración (*condensador equivalente*), con una capacidad apropiada para determinados fines. Tiene interés por lo tanto, que conozcamos el procedimiento de calcular la capacidad efectiva, de un conjunto de condensadores o ***capacidad equivalente***.

- ***Asociación en paralelo***
  Supongamos dos condensadores de capacidades C_1 y C_2 que inicialmente están descargados y los conectamos como se indica en la fig.6.41, cargándolos con una pila cuya diferencia de potencial es V. Los dos condensadores están sometidos a la misma diferencia de potencial. La carga total de las dos armaduras que están al mismo potencial es la suma de las cargas.

$$Q = Q_1 + Q_2 = C_1V + C_2V = (C_1 + C_2)V \qquad (6.61)$$

El conjunto equivale a un solo condensador, cuya capacidad *C* es desconocida, conectado a la misma diferencia de potencial *V* y cuya carga sea la suma de las cargas *Q,* para el que resulta $Q = C \cdot V$. Igualando con ec. (6.61) resulta:

$$C \cdot V = (C_1 + C_2)V$$

De donde se obtiene:

$$C = C_1 + C_2 \qquad (6.62)$$

Si en lugar de dos condensadores asociados en paralelo tenemos un número arbitrario de ellos

$$C = \sum_i C_i \qquad (6.63)$$

En las conexiones en paralelo, la capacidad total, es la suma de todas las capacidades individuales.

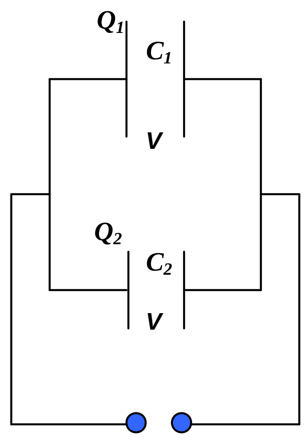


Fig.6.41

Los condensadores asociados en paralelo, tienen todos la misma diferencia de potencial.

- ***Asociación en serie***

  Sean los condensadores de la fig.6.42. En este caso la diferencia de potencial aplicada, es la suma de las diferencias de potenciales en cada condensador. La carga de los dos condensadores en cambio es la misma, ya que si en el condensador 1, una armadura tiene carga $+Q$ la otra tiene $-Q$, y al estar conectada a la armadura del condensador 2, deben tener cargas opuestas, si inicialmente todo el sistema estaba descargado, por lo tanto

$$V = V_1 + V_2 = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} = \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}\right)Q$$

Y la capacidad equivalente:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} \qquad (6.64)$$

Para un número arbitrario de condensadores en serie

$$\frac{1}{C} = \sum_i \frac{1}{C_i} \qquad (6.65)$$

En las conexiones en serie, la inversa de la capacidad equivalente, es igual a la suma de las inversas, de las capacidades individuales.

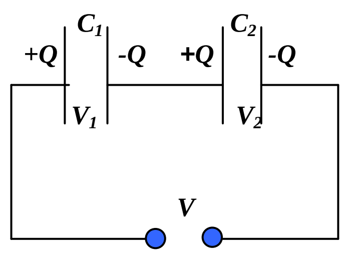


Fig.6.42

Los condensadores asociados en serie tienen todos la misma carga.

CUESTIONES Y EJERCICIOS

EB19; EB20; EB21
PB14