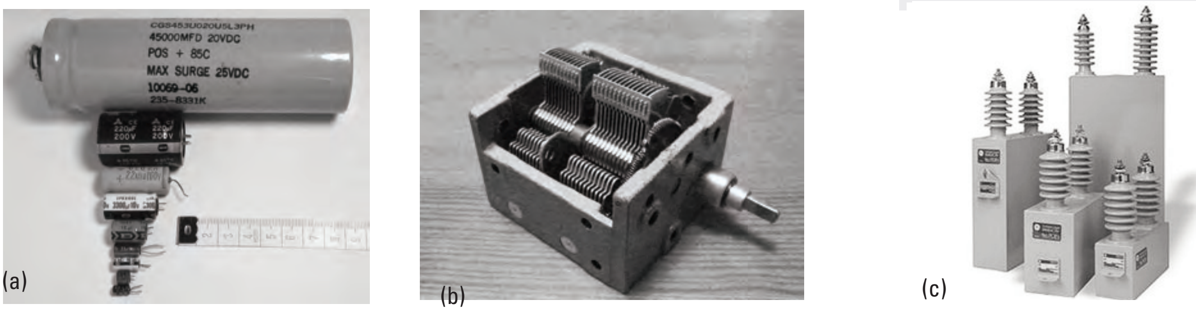
Capacitores y dieléctricos

En el ambiente eléctrico se llama *capacitor* cualquier elemento de un circuito cuya función principal sea la de acumular cargas eléctricas de igual módulo y de polaridad opuesta en sus dos electrodos, armaduras o placas.

Una expresión más antigua para designar los capacitores es *condensadores*, en el sentido de que acumulan o condensan carga eléctrica.

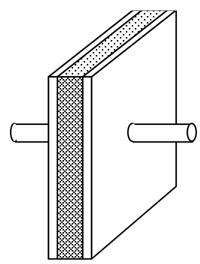


Capacitores variados. (a) capacitores electrolíticos diversos usados en circuitos de baja tensión. (b) capacitor variable para sintonía de radio. (c) capacitores utilizados en líneas de distribución de 15.000 V.

El estudio de los capacitores es importante en las ciencias biológicas y médicas, no sólo porque forman parte de instrumental de investigación y terapéutico, sino porque los nervios de los animales y las paredes de las células se comportan como capacitores.

Capacitores planos

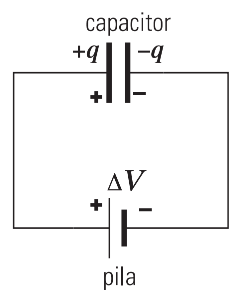
Una forma de construir un capacitor capaz de almacenar cargas importantes con tensiones moderadas es tomar dos placas conductoras de gran superficie (las armaduras) y colocarlas a una pequeña distancia una de otra, apenas la necesaria para soportar la tensión que se le aplique, sea en el vacío, en el aire, o con aislantes gaseosos, líquidos o sólidos entre ellas. Ese aislante se llama *dieléctrico*. A este tipo de capacitor, cuando la separación entre las armaduras es mucho menor que sus dimensiones, se lo llama *capacitor plano*. Este nombre es independiente de que las placas sean o no planas; de hecho se los suele construir con cintas de papel metálico separadas por una lámina de plástico, y el conjunto se enrolla para que ocupe menos sitio; eso también es un capacitor plano.



Capacitor

Para cargar el capacitor, hay que introducir cargas positivas en una placa y negativas en la otra. Sin embargo, eso no es gratis: requiere energía. Lo usual es conectar una pila, que suministra una diferencia de potencial ΔV y moviliza las cargas hacia las placas. La cantidad de carga adquirida por el capacitor ($+q$ en una placa y $-q$ en la otra) resulta directamente proporcional a la diferencia de potencial aplicada:

$$q = C \cdot \Delta V$$



Carga de un capacitor

La constante $C = q / \Delta V$ es una característica constructiva del capacitor y se denomina *capacidad* o *capacitancia*. Sus unidades de medida son coulomb/volt y esta combinación recibe el nombre de *faraday* (F), aunque en nuestro país se lo suele llamar *faradio*[1]. Por ejemplo, un capacitor que adquiere una carga de 30 microcoulomb bajo la acción de una diferencia de potencial de 10 volts, tiene una capacidad de:

$$C = \frac{q}{\Delta V} = \frac{30\mu C}{10V} = 3\mu F$$

Este cociente es característico del capacitor: la capacidad está determinada por el tamaño, la geometría y el material que separa las placas del capacitor. El mismo capacitor del ejemplo adquiría una carga de 60 μC si la diferencia de potencial fuera 20 V, y de 300 μC si la diferencia de potencial fuera de 100 V.

Como en el caso del coulomb, el faradio resulta una unidad muy grande para las aplicaciones cotidianas. Por eso se usa:
el microfaradio (1 μF = 10^{-6} F),
el nanofaradio (1 nF = 10^{-9} F)
el picofaradio (1 pF = 10^{-12} F).

[1] En nuestro país se suele decir faradio en vez de farad; en cambio es igualmente habitual hablar de volts o de voltios, de watts y de vatios. Y es raro oír, en la Argentina, amperios, neutonios, culombios u ohmios.

La atmósfera de nuestro planeta se puede considerar como el dieléctrico de un gigantesco capacitor plano (en rigor, esférico), una de cuyas armaduras es el suelo conductor, y la otra es la ionosfera, también conductora, cuyo límite inferior se encuentra a unos 80 km de altura cuando es de día y actúan las radiaciones *ionizantes** provenientes del Sol. Al producirse un rayo, lo que vemos es la ruptura del dieléctrico (aire).

* *Ionizante* significa que ioniza, que produce iones. Los iones son partículas de carga positiva o negativa, generalmente átomos a los que les faltan o les sobran electrones, y los propios electrones arrancados de los átomos por la radiación.

Significado de la capacidad eléctrica

Exploremos un poco el concepto de capacidad. En el caso de los recipientes para líquidos, por ejemplo una botella, la capacidad se refiere al volumen máximo de líquido que puede contener. Sin embargo, en el caso eléctrico la capacidad es un concepto diferente ya que, en principio, podemos poner tanta carga como queramos dentro del capacitor, a condición de aumentar lo suficiente la diferencia de potencial. En ese sentido, el capacitor se parece más a un recipiente para contener gas (a una garrafa) que a uno para líquidos, ya que tanto el gas como la carga eléctrica pueden ser introducidos “a presión” dentro del recipiente.

La comparación podría resumirse en el siguiente cuadro:

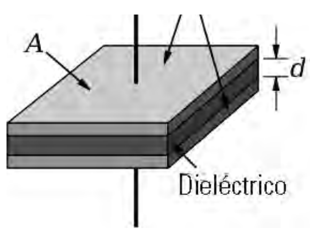
Gas	Electricidad
Garrafa	Capacitor
Carga de gas (m en kilogramos)	Carga eléctrica (q en coulombs)
Diferencia de presión (Δp en pascales)	Diferencia de potencial (ΔV, en volts)
Capacidad ($C = m/\Delta p$, en kg/Pa)	Capacidad ($C = q/\Delta V$, en C/V)

¿Y cuál es la carga máxima que podemos introducir en un capacitor? Idealmente no hay un límite, pero en la realidad sí. Igual que una garrafa se puede romper si la presión es muy elevada, lo mismo le ocurre al capacitor si la diferencia de potencial es demasiado grande: si el campo eléctrico entre las placas se vuelve muy elevado, el dieléctrico comienza a conducir, salta una chispa y el capacitor queda inservible.

Damos, sin demostración, la expresión que permite calcular la capacidad de un capacitor plano:

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

donde A es el área de una de sus placas, d la distancia entre ellas y ε es la *permitividad eléctrica* (o *constante diéléctrica*) del material que separa las placas.



La constante ε puede expresarse como

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$$

donde ε_r es la permitividad relativa del material (que vimos cuando tratamos la ley de Coulomb) y ε_o es la permitividad del vacío, que está relacionada con la contante k_o de la ley de Coulomb:

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi k_0} = \frac{1}{4\pi \cdot 9 \times 10^9\, Nm^2 C^{-2}} = 9 \times 10^{-12}\, C^2/Nm^2$$

Ejemplo

¿Cuál es la capacidad de un capacitor plano formado por dos placas de 1 cm² de área cada una, separadas por 1 mm de material de constante dieléctrica relativa 25?

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

$$C = 25 \cdot 9 \times 10^{-12} C^2 N^{-1} m^{-2} \frac{10^{-4} m^2}{10^{-3} m}$$

$$C = 2{,}25 \times 10^{-11} F = 22{,}5\, pF$$

Campo eléctrico entre las placas y su valor de ruptura

Si el tamaño de las placas de un capacitor es mucho mayor que la distancia que las separa, se puede suponer que el campo eléctrico es aproximadamente uniforme en el espacio entre placas. El valor de ese campo se puede calcular a partir de la diferencia de potencial ΔV entre las placas y la distancia d entre ellas:

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

Si ese valor llegara a ser muy elevado, podría alcanzarse el campo eléctrico de ruptura, E_{rup}, de ese material, lo que significa que el material deja de ser aislante y salta una chispa eléctrica entre las placas. La tabla siguiente muestra ese valor crítico para diferentes dieléctricos.

Material	Campo eléctrico de ruptura [KV/(mm]
Aire seco	3
Vidrio Pyrex	14
Vacío	30
Polietileno	20
Agua pura	30
Porcelana	5,7

Asociación de capacitores en serie y en paralelo

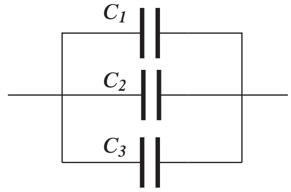
De aquí en adelante, por simplicidad, la diferencia de potencial ΔV, será llamada tensión V. Recordemos que la capacidad se calcula como el cociente entre la carga y la tensión:

$$C = q / V$$

Esta expresión vale para cada uno de los capacitores de un circuito. Si se la aplica al conjunto, hay que considerar la carga conjunta y la tensión conjunta; la capacidad que se obtiene así se llama *capacidad equivalente*, y es la de un capacitor único que reemplazaría a la totalidad conectada, y que adquiriría la misma carga, cuando se le aplica la misma tensión que al conjunto.

Capacitores conectados en paralelo.

En una conexión en paralelo, las cargas se suman, y la tensión del conjunto es la misma que la de cualquiera de los capacitores conectados, que tienen la misma diferencia de potencial.



$V_1 = V_2 = V_3$

Capacitores en paralelo. Las cargas se suman, y las tensiones son iguales.

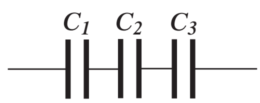
Entonces:

$$C_{eq} = \frac{Q_{total}}{V_{total}} = \frac{Q_1 + Q_1 + Q_1 + \ldots}{V} = \frac{C_1 V + C_1 V + C_1 V + \ldots}{V}$$

$$C_{eq} = C_1 + C_2 + C_3 + \ldots$$

Capacitores conectados en serie.

En una conexión en serie, en cambio, son las tensiones las que se suman (del mismo modo en que se suman las diferencias de altura entre localidades para hallar la diferencia de altitud entre la primera y la última), pero la carga de todos los capacitores es la misma:



$q_1 = q_2 = q_3$

Capacitores en serie. Las cargas son iguales, y las tensiones se suman.

Entonces:

$$C_{eq} = \frac{Q_{total}}{V_{total}} = \frac{Q}{V_1 + V_2 + V_3 + \ldots} = \frac{1}{\frac{V_1}{Q} + \frac{V_2}{Q} + \frac{V_3}{Q} + \ldots} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \ldots}$$

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

Cuando se conectan en serie sólo dos capacitores, hay una expresión más sencilla que se puede aplicar mentalmente[2]:

$$C_{12} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$$

Por ejemplo, un capacitor de un microfaradio en serie con otro de dos microfaradios, tienen una capacidad equivalente de dos tercios de microfaradio.

[2] La expresión siguiente, extendida de la anterior, es **incorrecta,** ni siquiera da un resultado en unidades de capacidad.

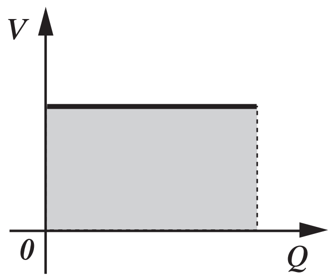
$$C_{123} = \frac{C_1 C_2 C_3}{C_1 + C_2 + C_3}$$

Energía acumulada por un capacitor

Cuando una pila que mantiene una tensión constante V transfiere una carga eléctrica Q, la energía U entregada por la pila es simplemente el producto de V por Q, ya que la tensión se interpreta como la energía por unidad de carga:

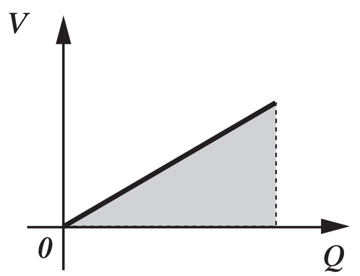
$$U = V \cdot Q$$

Esta energía se puede representar como el área de un rectángulo



Para calcular la energía almacenada por el capacitor la situación es diferente, ya que la tensión entre las placas NO se mantiene constante a medida que se lo carga.

En la carga de un capacitor, como la tensión varía proporcionalmente con la carga, el área que representa la energía es la de un triángulo.



Si llamamos V y Q a la tensión y carga finales, respectivamente, tenemos:

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

donde U es la energía electrostática acumulada, en joules, V es la tensión final, en volts, y Q la carga final en coulombs. Si recordamos la definición de capacidad como el cociente entre la carga y la tensión, obtenemos las siguientes expresiones alternativas:

$$U = \frac{1}{2} \cdot \frac{\mathrm{Q}^2}{\mathrm{C}} \qquad U = \frac{1}{2} \cdot \mathrm{C} \cdot V^2$$

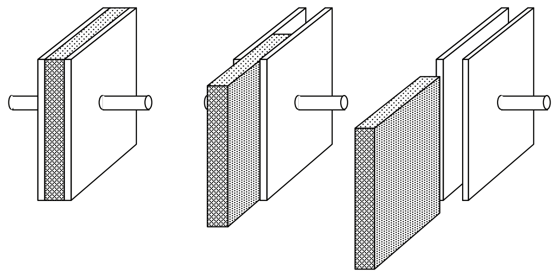
¿Dónde está la diferencia?

Cuando un capacitor adquiere una carga Q mediante una pila de tensión V, la pila entrega una energía $Q.V$. Sin embargo, la energía acumulada por el capacitor es apenas la mitad, $Q.V/2$. ¿Qué pasó con la diferencia? ¿O es que en este caso no se conserva la energía?

Se puede demostrar que la mitad de la energía se pierde, en forma de calor, durante la conducción a través de los cables.

Ejemplo

Un capacitor de 100 μF que tiene un dieléctrico de constante relativa igual a 5 se carga por completo con una fuente de 100 V. Se lo desconecta de la fuente y se le retira el dieléctrico. ¿Cuánto vale la nueva tensión, y cuánto el trabajo empleado para extraer el dieléctrico?



El capacitor cargado tiene una energía acumulada:

$$U_1 = \frac{1}{2} C_1 \cdot V_1^2 = 0,5J$$

Cuando se le retira el dieléctrico la capacidad disminuye a sólo un quinto de la anterior,

$$C_1 = 5 \cdot \varepsilon_0 \frac{A}{d} \qquad C_2 = \varepsilon_0 \frac{A}{d} \qquad \Rightarrow \quad C_2 = \frac{C_1}{5}$$

El capacitor está desconectado de la fuente y las placas están aisladas mientras se retira el dieléctrico por lo que la carga se mantiene, y la nueva tensión tiene que ser cinco veces mayor que la primitiva para que $C.V$, que es la carga, se mantenga. A igualdad de carga, la nueva energía $U_2 = Q.V_2 / 2$ es cinco veces mayor, o sea de 2,5 J;

$$U_1 = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot V_1 \qquad U_2 = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot V_2 = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot 5V_1 \quad \Rightarrow U_2 = 5U_1 = 2,5J$$

De ahí deducimos que el trabajo necesario para extraer el dieléctrico es de 2 J, igual a la diferencia entre la energía final y la inicial.

$$L_F = \Delta U = U_2 - U_1 = 2,5J - 0,5J = 2J$$

Ejemplo

Un capacitor de 100 μF de dieléctrico de aire se carga con 100 V. Se desconecta de la fuente y se separan sus placas hasta el doble de la distancia original. ¿Cuánto vale la nueva tensión, y cuánto el trabajo necesario para separar las placas?

Solución

Igual que en el caso anterior el capacitor cargado tiene una energía $U=CV^2/2$= 0,5 J. Cuando se separan las placas hasta el doble de la distancia original la carga se mantiene, pero la capacidad disminuye a la mitad, por lo que la nueva tensión tiene que ser el doble de la original, es decir 200 V, para que $C.V$, que es la carga, se mantenga. A igualdad de carga, la nueva energía $Q.V/2$ es el doble que la original, o sea de 1 J; de ahí deducimos que el trabajo necesario para separa las placas es de 0,5 J, igual a la diferencia entre la energía final y la inicial [3].

[3] Al separar las placas de un capacitor desconectado crece la tensión. Sin embargo, la intensidad de campo eléctrico entre las placas no se modifica.