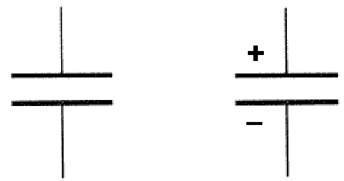
CONDENSADORES

Los condensadores, al igual que las resistencias, son componentes normalmente utilizados en electricidad y electrónica. Básicamente, la función que realiza un condensador es almacenar una carga eléctrica; se comporta como un "*almacén de electricidad*", cuyo símil hidráulico puede ser un depósito de agua.



Simbología
General *Electrolítico*

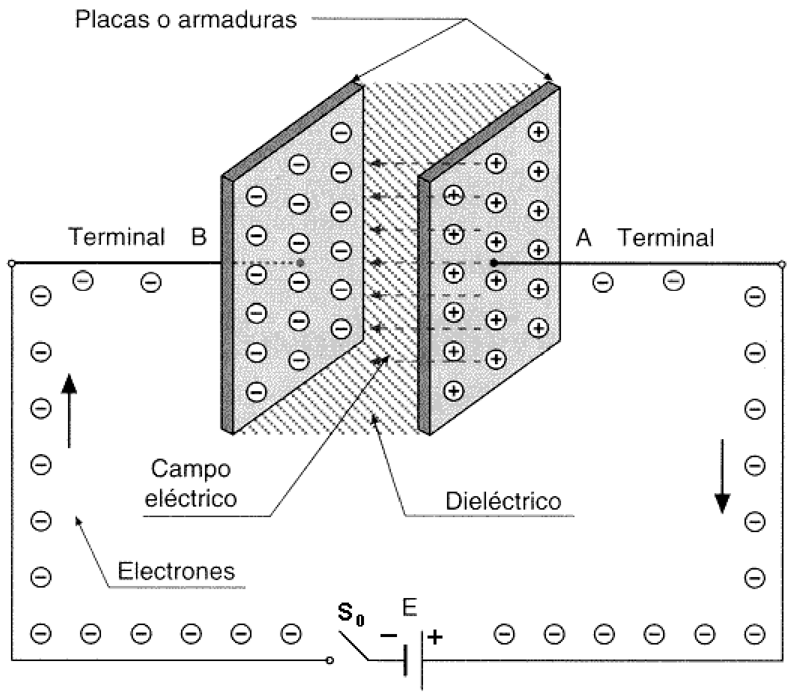
CONSTITUCIÓN DEL CONDENSADOR

Básicamente, el condensador está formado por dos electrodos internos denominados placas (o armaduras) separadas por un aislante que se denomina *dieléctrico*. La característica que tiene de almacenar electricidad se basa en las propiedades que tienen los cuerpos de adquirir carga eléctrica por efecto de campo eléctrico. Cuando un cuerpo *-por alguna razón-* recibe electrones, adquiere carga eléctrica negativa. Y si lo que hace es ceder electrones, entonces adquiere carga eléctrica positiva.

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO. EXPERIMENTACIÓN DE LA CARGA-DESCARGA DE UN CONDENSADOR

Carga

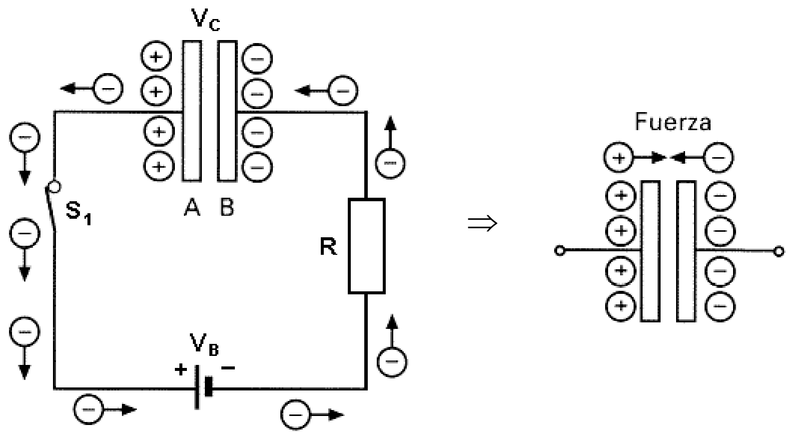
Al cerrar el interruptor, la fuente de tensión continua (V_B), por medio de una transferencia de electrones, hace que cada una de las placas del condensador adquiera la polaridad del polo de la fuente de tensión a la que está conectada. Al abrir el interruptor, debido a su característica de *almacenar* cargas, el condensador presenta entre sus terminales un voltaje prácticamente igual al de la fuente de tensión; la carga eléctrica almacenada en sus placas da lugar a una diferencia de potencial. En este estado, si se vuelve a cerrar el interruptor, ya no se detecta ninguna circulación de corriente porque el condensador tiene la misma magnitud de tensión que la fuente; no existe diferencia de potencial entre ambos.



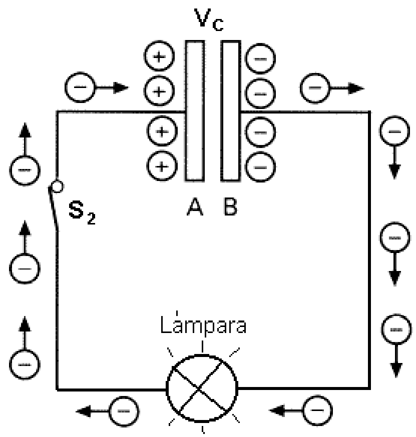
Descarga

Con el condensador cargado, cerramos el interruptor; la carga eléctrica almacenada hace que circule una cierta corriente a través de la resistencia, que dará lugar, a su vez, a una tensión ($V_R = I \cdot R$). Esto se puede verificar por medio de un voltímetro. A medida que el condensador va *descargándose*, su carga almacenada se va haciendo menor hasta quedar prácticamente descargado. Por ello, sólo se puede detectar corriente de salida durante el tiempo que dura la descarga. Y si en vez de utilizar una resistencia se conecta una pequeña bombilla, se puede observar un destello de luz (cuya duración dependerá de la capacidad del condensador y de la magnitud de corriente absorbida por la bombilla).

Carga de un Condensador



Descarga de un Condensador



CAPACIDAD DEL CONDENSADOR

La capacidad (o capacitancia) es la propiedad de un circuito eléctrico para retardar la variación de tensión que aparece entre sus bornes. Este retraso de la variación es causado por una absorción o liberación de energía.

La capacidad no evita el cambio de tensión, sólo retrasa el cambio.

Se denomina capacidad eléctrica, la propiedad de almacenar mayor o menor número de cargas eléctricas que poseen los condensadores al estar sometidos a una tensión.

La capacidad es la relación entre la carga almacenada y su diferencia de potencial (tensión) o bien entre la carga de una cualquiera de sus armaduras y la tensión existente entre ellas.

Si esta propiedad la expresarnos matemáticamente, resulta la siguiente fórmula:

$$\boldsymbol{Capacidad} = \frac{\boldsymbol{C\,\mathrm{arg}\,a \quad Almacenada}}{\boldsymbol{Tensión}} \qquad \Rightarrow \qquad \boxed{\boldsymbol{C = \frac{Q}{V}}}$$

siendo:

$\boldsymbol{Q}$ = Carga eléctrica almacenada, en Culombios (C).
$\boldsymbol{C}$ = Capacidad del condensador, en Faradios (F).
$\boldsymbol{V}$ = Diferencia de potencial entre las armaduras, en Voltios (V).

Así, cuanto mayor sea la capacidad de un condensador mayor cantidad de carga eléctrica podrá almacenar.

La unidad de capacidad es el **Faradio**, se representa por la letra **F**.

$$\boldsymbol{C = \frac{Q}{V}} \qquad \Rightarrow \qquad 1\ \boldsymbol{Faradio} = \frac{1\ \boldsymbol{Culombio}}{1\ \boldsymbol{Voltio}}$$

Como acabamos de ver, la unidad de la capacidad es el Faradio (F). Pero como esta unidad es mucho más grande que las capacidades normales de los condensadores, se suelen emplear los submúltiplos del Faradio:

miliFaradio (mF) ⇒ 1 mF = 10^{-3} F
microFaradio (μF) ⇒ 1 μF = 10^{-6} F
nanoFaradio (nF) ⇒ 1 nF = 10^{-9} F
picoFaradio (pF) ⇒ 1 pF = 10^{-12} F

Y se deduce que:

1 mF = 1000 μF
1 μF = 1000 nF
1 nF = 1000 pF

Así, por ejemplo, una capacidad de 0,1 μF se puede expresar por 100 nF o 100.000 pF.

Algunas expresiones de valores normalizados son: 2000 μF, 100 μF, 220 nF, 33 nF, 1000 pF, 470 pF, etc.

LA CAPACIDAD EN FUNCIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

La capacidad de un condensador depende de sus características constructivas: superficie de las placas, distancia entre ellas y tipo de dieléctrico (aislante separador). Esto se puede expresar por:

$$C = \varepsilon \cdot \frac{S}{d} \quad \Rightarrow \quad y \ como \quad \varepsilon = \varepsilon_o \cdot \varepsilon_r \quad luego \quad \Rightarrow \quad \boxed{C = \varepsilon_o \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d} = 8{,}842 \cdot 10^{-12} \cdot \varepsilon_r \cdot \frac{S}{d}}$$

siendo:

C = Capacidad en Faradios (F)
S = Superficie enfrentada de las placas (m^2).
d = Distancia de separación de las placas (m).
ε = Constante característica del dieléctrico (constante dieléctrica).
ε_o = Constante dieléctrica o permitividad del vacío.
ε_r = Constante dieléctrica relativa o permitividad relativa del aislante o dieléctrico.

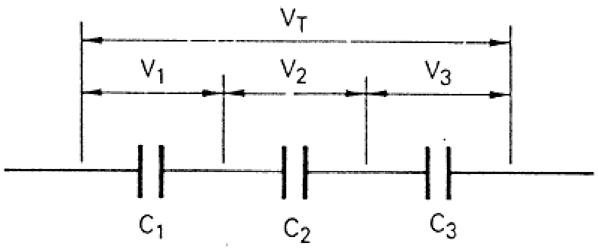
Así, se deduce que cuanto mayor sea la superficie enfrentada de las placas y menor sea la separación entre ellas mayor será la capacidad. (*En el caso de un condensador plano la superficie enfrentada de las placas coincide con la de una de las placas).*

ASOCIACION DE CONDENSADORES

Al igual que las resistencias, los condensadores pueden asociarse de diferente forma:

Asociación en serie.
Asociación en paralelo.
Asociación mixta.

Asociación en serie



En un conjunto de condensadores se establece una asociación en serie cuando la salida de un condensador está conectada a la entrada del siguiente y así sucesivamente.

En principio, por las características del circuito serie, la intensidad de corriente eléctrica (o corriente de carga) que circulará por a cada condensador es la misma. Por tanto, en un intervalo de tiempo, la carga es la misma para todos. Así pues podemos decir que:

En un circuito en serie la carga es la misma para cada condensador:

$$\boxed{Q_T = Q_1 = Q_2 = Q_3} \quad \Rightarrow \quad \boxed{I = \frac{Q}{t}}$$

En una asociación en serie de condensadores también se cumple que la suma de las tensiones parciales es igual a la tensión total:

$$\boxed{V_T = V_1 + V_2 + V_3} \quad \Rightarrow \quad \boxed{V = \frac{Q}{C}}$$

Capacidad equivalente:

$$\boxed{\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}} \quad \Rightarrow \quad \boxed{C_T = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}}$$

Veamos como se llega a este resultado:

Como en el circuito serie no existe nada más que una sola intensidad, y como el tiempo de carga (t) es igual para todos los condensadores, si llamamos Q_1 Q_2 y Q_3 a la carga que consigue cada condensador respectivo, y Q_T a la carga total tendremos:

$$I = \frac{Q_1}{t} = \frac{Q_2}{t} = \frac{Q_3}{t} = \frac{Q_T}{t}$$

de lo que se deduce que:

$$\boxed{Q_T = Q_1 = Q_2 = Q_3}$$

Por otro lado, como la tensión en el condensador se puede expresar por: $V = \frac{Q}{C}$, se tiene:

$$V_1 = \frac{Q_1}{C_1};\ \ V_2 = \frac{Q_2}{C_2};\ \ V_3 = \frac{Q_3}{C_3};\ \ V_T = \frac{Q_T}{C_T}$$

Sustituyendo estos términos en la expresión de las tensiones:

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3$$

tenemos que:

$$\frac{Q_T}{C_T} = \frac{Q_1}{C_1} + \frac{Q_2}{C_2} + \frac{Q_3}{C_3}$$

Como las cargas son iguales la expresión quedaría entonces:

$$\frac{Q_T}{C_T} = \frac{Q_T}{C_1} + \frac{Q_T}{C_2} + \frac{Q_T}{C_3}$$

Simplificando, dividiendo por Q_T, se deduce finalmente:

$$\boxed{\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}$$

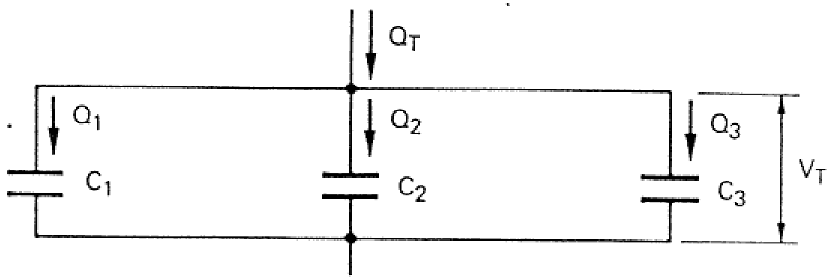
Asociación en paralelo

En un conjunto de condensadores, se establece una conexión en paralelo o derivación cuando todas las entradas están conectadas a un punto común y las salidas a otro.

En este tipo de acoplamiento, la tensión a la que están sometidos todos los condensadores es la misma y coincide con la aplicada al conjunto. Así pues podemos decir que:

En una conexión en paralelo, todos los condensadores están sometidos a la misma tensión:

$$\boxed{V_T = V_1 = V_2 = V_3} \quad = \quad \boxed{V = \frac{Q}{C}}$$



Por el contrario, la intensidad total de carga en un circuito paralelo equivale a la suma de cada una de las intensidades:

$$\boxed{I_T = I_1 + I_2 + I_3} \quad \Rightarrow \quad \boxed{I = \frac{Q}{t}}$$

La carga total almacenada en un circuito paralelo equivale a la suma de todas las cargas:

$$\boxed{Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3} \quad \Rightarrow \quad \boxed{Q = C \cdot V}$$

La capacidad total resultante es igual a la suma de todos los condensadores conectados en el circuito paralelo:

$$\boxed{C_T = C_1 + C_2 + C_3}$$

Veamos como se llega a este resultado:

La intensidad de carga que tomaría cada uno de los condensadores en el mismo intervalo de tiempo, así como la total vendrían dadas por:

$$I_1 = \frac{Q_1}{t}; \quad I_2 = \frac{Q_2}{t}; \quad I_3 = \frac{Q_3}{t}; \quad I_T = \frac{Q_T}{t}$$

Sustituyendo estos términos en la expresión de las intensidades:

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3$$

tenemos que:

$$\frac{Q_T}{t} = \frac{Q_1}{t} + \frac{Q_2}{t} + \frac{Q_3}{t}$$

Como el intervalo de tiempo es el mismo la expresión quedaría entonces:

$$\boxed{Q_T = Q_1 + Q_2 + Q_3}$$

Por otra parte como la carga que tomaría cada condensador en el mismo intervalo de tiempo sería:

$$Q_1 = C_1 \cdot V_1; \;\; Q_2 = C_2 \cdot V_2; \;\; Q_3 = C_3 \cdot V_3; \;\; Q_T = C_T \cdot V_T$$

Sustituyendo estos términos en la expresión de anterior o de las cargas:

$$C_T \cdot V_T = C_1 \cdot V_1 + C_2 \cdot V_2 + C_3 \cdot V_3$$

Como en el circuito paralelo la tensión a la que están sometidos todos los condensadores, así como al conjunto es la misma la expresión quedaría de la siguiente manera:

$$C_T \cdot V_T = C_1 \cdot V_T + C_2 \cdot V_T + C_3 \cdot V_T$$

Simplificando, dividiendo por V_T, se deduce finalmente:

$$\boxed{C_T = C_1 + C_2 + C_3}$$

Casos particulares de la conexión serie y de la conexión paralelo:

Conexión serie:

⇒ Si en un circuito de varios condensadores (n) todas tienen una misma capacidad (C), tenemos:

$$\boxed{C_T = \frac{C}{n}} \qquad \text{si } n = 2\text{, tendremos que} \qquad \boxed{C_T = \frac{C}{2}}$$

en este caso la capacidad equivalente es la mitad de la capacidad de un condensador del circuito.

⇒ Otro caso peculiar se da cuando solamente hay dos condensadores en serie. En este caso la capacidad equivalente viene dada por:

$$\boxed{C_T = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2}}$$

Conexión paralelo:

⇒ Si en un circuito de varios condensadores (***n***) todas tienen una misma capacidad (***C***), tenemos:

$$\boxed{\boldsymbol{C_T = n \cdot C}}$$ si $\boldsymbol{n} = 2$, tendremos que $$\boxed{\boldsymbol{C_T} = 2 \cdot \boldsymbol{C}}$$

en este caso la capacidad equivalente es doble de la capacidad de un condensador del circuito.

Otras características de la conexión serie y de la conexión paralelo:

Conexión serie:

⇒ En el montaje serie de condensadores se consigue una capacidad total inferior a la del condensador del menor valor. En cambio, la tensión nominal del conjunto es superior a la del condensador con el mayor valor de tensión nominal. A veces resulta interesante este tipo de montaje para aumentar la tensión nominal, adecuándola a las necesidades.

⇒ La tensión máxima que puede soporta el circuito es la suma de las tensiones máximas de cada uno de los condensadores.

Conexión paralelo:

⇒ El objetivo de este tipo de montaje es conseguir mayor capacidad, se puede ver, pues, como un efecto de aumentar la superficie de las placas; el resultado es una capacidad superior a la del condensador de mayor capacidad del montaje.

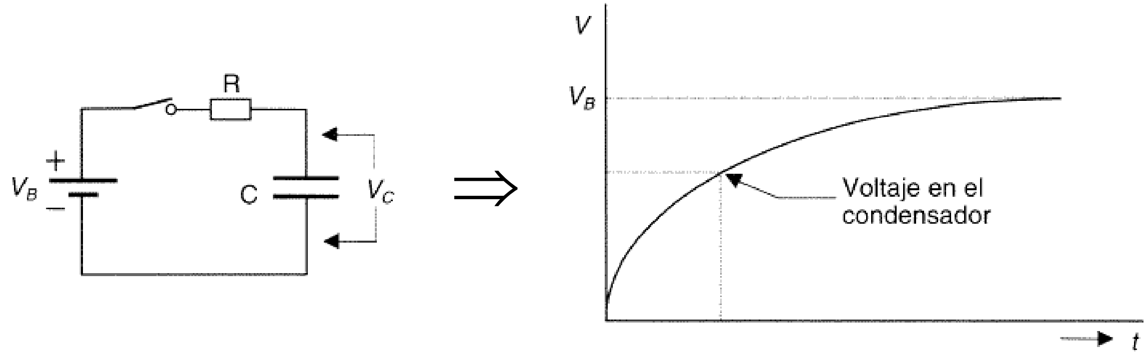
⇒ La tensión máxima que puede soporta el circuito, puesto que todos los condensadores reciben la misma tensión, corresponde a la tensión máxima del condensador que la tenga más baja.

CONEXIÓN SERIE-PARALELO O CONEXIÓN MIXTA

La conexión mixta (serie-paralelo) es una combinación de agrupaciones en serie y en paralelo. Para resolver este tipo de circuitos, hay que solucionar independientemente los montajes en serie y en paralelo que lo componen. Con ello se llega a un circuito único, que se resuelve por el método correspondiente según el tipo de asociación resultante.

CURVAS DE CARGA Y DESCARGA. CONSTANTE DE TIEMPO

Carga de tensión



Al conectar un condensador a una fuente de tensión $\boldsymbol{V_B}$, éste se empieza a cargar, tendiendo su voltaje hacia el valor de $\boldsymbol{V_B}$. Para cargarse invierte un cierto tiempo que depende del valor de la capacidad y del valor resistivo del circuito. Este tiempo puede ser de milisegundos o hasta de horas. El valor resistivo puede ser el de alguna resistencia utilizada a propósito, o simplemente el de los propios conductores y resistencia interna de la fuente de tensión.

La evolución del aumento de carga se realiza de forma exponencial y de este tipo de curva se deduce que, inicialmente, partiendo del condensador descargado ($\boldsymbol{V_C}$ = 0), su tensión aumenta más o menos rápidamente, pero conforme está más cargado, la adquisición de carga se realiza más lentamente.

A título comparativo, se puede decir que la evolución de la carga del condensador es similar al aumento del nivel de agua en una cisterna del WC; a medida que va aumentando el nivel de agua, por medio de la boya, se va cerrando el grifo de entrada y esto hace que vaya entrando menos caudal; o sea, conforme el nivel de agua es más alto, tarda más en ir llenándose.

Por medio del cálculo diferencial se llega a la expresión que nos da la tensión del condensador en función del tiempo, $\boldsymbol{V_C}$:

$$\boxed{\boldsymbol{V_C = V_B - \left[(V_B - V_0)\cdot e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)}\right]}}$$

Si se parte del condensador descargado, obviamente, su tensión inicial será cero ($\boldsymbol{V_0}$ = 0), la cual irá aumentando tendiendo hacia el valor de la fuente ($\boldsymbol{V_C} \rightarrow \boldsymbol{V_B}$). Así, para $\boldsymbol{V_0}$ = 0 se deduce la fórmula:

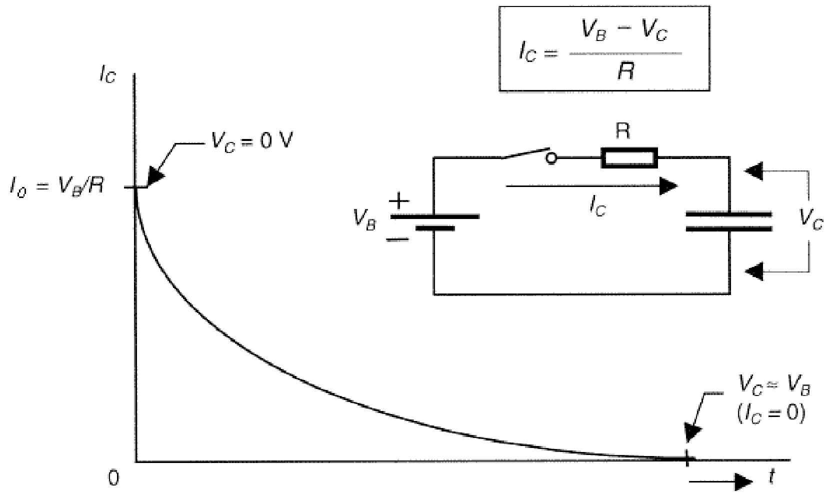
$$\boldsymbol{V_C = V_B - \left[(V_B - V_0)\cdot e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)}\right] = V_B - \left[(V_B - 0)\cdot e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)}\right] = V_B - V_B \cdot e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)}} \quad \Rightarrow \quad \boxed{\boldsymbol{V_C = V_B \cdot \left[1 - e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)}\right]}}$$

siendo:

V_C = Tensión del condensador en función del tiempo.
V_0 = Tensión del condensador en el momento inicial de conectarlo a la fuente V_B.
V_B = Tensión de la fuente.
$e \approx$ 2,718 (base de los logaritmos neperianos).
t = Tiempo (s).
R = Resistencia en el circuito (Ω).
C = Capacidad del condensador (F).

Carga de corriente

En cuanto a la corriente que produce la carga del condensador, es todo análogo. Inicialmente, en el momento de conectarlo a la fuente de tensión, suponiendo el condensador descargado (V_C = 0), la corriente toma el valor máximo. Observando el circuito y aplicando la ley de Ohm, la corriente por el circuito viene dada por:



$$I_C = \frac{V_B - V_C}{R}$$

En el momento inicial, y en el puesto de que $V_C = 0$, es cuando se produce el *valor máximo de corriente* ($I_C = I_0$):

$$V_C = 0 \quad \Rightarrow \quad I_0 = \frac{V_B}{R}$$

Y como es fácil deducir, a medida que el condensador se va cargando y aumenta su tensión, la diferencia de potencial ($V_B - V_C$) se va haciendo cada vez menor y esto hace que la corriente vaya disminuyendo. Así, su variación de corriente es de tipo exponencial, al igual que la tensión, y su valor en función del tiempo viene dado por la fórmula:

$$\boxed{I_C = \frac{V_B}{R} \cdot e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)}}$$

Puesto que $\boldsymbol{I}_0 = \dfrac{\boldsymbol{V_B}}{\boldsymbol{R}}$, también se puede poner:

$$\boxed{\boldsymbol{I_C} = \boldsymbol{I}_0 \cdot \boldsymbol{e}^{\left(\frac{-\boldsymbol{t}}{\boldsymbol{RC}}\right)}}$$

A medida que el nivel de tensión del condensador se va aproximando al de la fuente, la corriente va disminuyendo hasta que, prácticamente, se igualan ($\boldsymbol{V_B} \approx \boldsymbol{V_C}$) y entonces, al ser $\boldsymbol{V_B} - \boldsymbol{V_C} \approx 0$, el valor de corriente es prácticamente cero ($\boldsymbol{I_C} \approx 0$) y cesa la carga.

Así pues, la corriente de carga va disminuyendo conforme el condensador se va cargando, con su valor máximo en el momento inicial ($\boldsymbol{t} = 0$) y su valor mínimo cuando la tensión del condensador tiende a igualarse con la de la fuente.

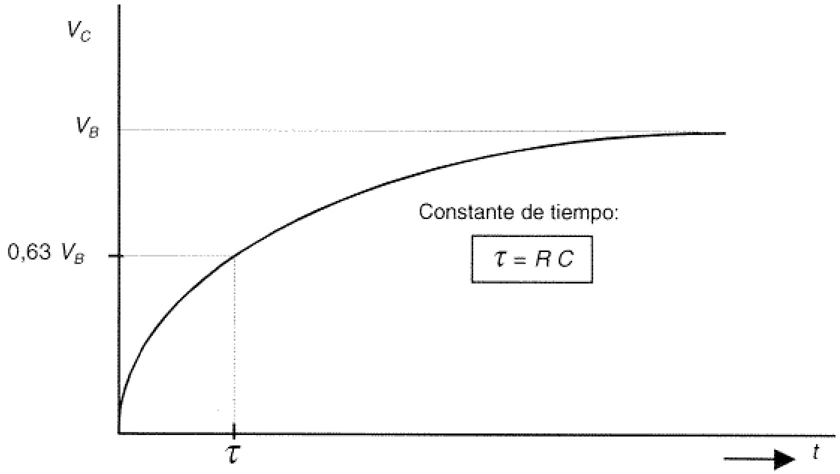
Constante de tiempo

Esta constante se define como el tiempo que tarda el condensador en alcanzar el 63,2% de su carga máxima. Este concepto se expresa por el producto del valor de la resistencia que se encuentre en el circuito ($\boldsymbol{R}$) por el valor de la capacidad ($\boldsymbol{C}$):

$$\boxed{\tau = \boldsymbol{R} \cdot \boldsymbol{C}}$$

Por tanto:

$$\boxed{\tau = \boldsymbol{R} \cdot \boldsymbol{C} \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{V_C} \approx 0{,}632 \cdot \boldsymbol{V_B}}$$



Este valor se puede comprobar aplicando la fórmula que nos da la tensión del condensador en función del tiempo. Para $\boldsymbol{t} = \boldsymbol{R} \cdot \boldsymbol{C}$, sustituyendo esta expresión por $\boldsymbol{t}$:

$$\boldsymbol{V_C} = \boldsymbol{V_B} \cdot \left[1 - \boldsymbol{e}^{\left(\frac{-\boldsymbol{t}}{\boldsymbol{RC}}\right)}\right] = \boldsymbol{V_B} \cdot \left[1 - \boldsymbol{e}^{\left(\frac{-\boldsymbol{RC}}{\boldsymbol{RC}}\right)}\right] = \boldsymbol{V_B} \cdot \left[1 - \boldsymbol{e}^{-1}\right] = \boldsymbol{V_B} \cdot \left[1 - \frac{1}{\boldsymbol{e}}\right] \approx 0{,}632 \cdot \boldsymbol{V_B}$$

Así pues, puesto que en cada constante de tiempo ($\tau = \boldsymbol{R \cdot C}$) el condensador se carga a un 63,2% de lo que le falta para llegar a su carga máxima ($\boldsymbol{V_B}$), se deduce que, en la teoría, el condensador nunca alcanzará a cargarse por completo; siempre le faltará algo. A efectos prácticos, el condensador se considera totalmente cargado al cabo de 5 constantes de tiempo (τ). O sea:

$$\boxed{\boldsymbol{t} = 5 \cdot \tau = 5 \cdot (\boldsymbol{R \cdot C}) \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{V_C} \approx \boldsymbol{V_B}}$$

Esto se puede comprobar calculando el valor de la tensión del condensador para $\boldsymbol{t = 5\ (R\ C)}$:

$$\boldsymbol{V_C} = \boldsymbol{V_B} \cdot \left[1 - \boldsymbol{e}^{\left(\frac{-\boldsymbol{t}}{\boldsymbol{RC}}\right)}\right] = \boldsymbol{V_B} \cdot \left[1 - \boldsymbol{e}^{\left(\frac{-5\boldsymbol{RC}}{\boldsymbol{RC}}\right)}\right] = \boldsymbol{V_B} \cdot \left[1 - \boldsymbol{e}^{-5}\right] = \boldsymbol{V_B} \cdot \left[1 - \frac{1}{\boldsymbol{e}^5}\right] \approx 0{,}993 \cdot \boldsymbol{V_B}$$

Al cabo de 5 constantes de tiempo (τ) la tensión del condensador es un 99,3% del máximo.

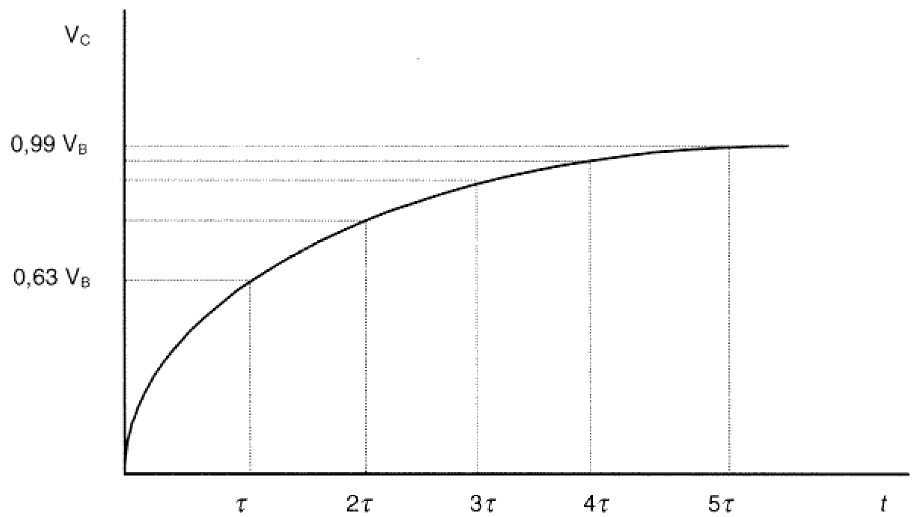
$$\boxed{5 \cdot \tau = 5 \cdot (\boldsymbol{R \cdot C}) \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{V_C} \approx 0{,}993 \cdot \boldsymbol{V_B}}$$

En cuanto a la corriente también aparece el concepto de constante de tiempo. Al cabo del tiempo $\tau = \boldsymbol{R \cdot C}$ después de conectar el condensador, el valor de la corriente disminuye un 63,2%, y le queda un 36,8% hasta llegar a cero.

$$\boxed{\tau = \boldsymbol{R \cdot C} \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{I_C} \approx 0{,}632 \cdot \boldsymbol{I_{máx}}}$$

Con cada constante de tiempo la corriente disminuye un 63,2%. Y al cabo de 5·τ el condensador está prácticamente cargado y entonces el valor de corriente es casi cero:

$$\boldsymbol{t} = 5 \cdot (\boldsymbol{R \cdot C}) \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{V_C} \approx \boldsymbol{V_B} \quad \Rightarrow \quad \boldsymbol{I_C} = \frac{\boldsymbol{V_B} - \boldsymbol{V_C}}{\boldsymbol{R}} \approx 0$$



Descarga de tensión

Una vez cargado el condensador, éste se comporta como un almacén de electricidad; es similar a una pila, con la diferencia de que, en el condensador, al no existir proceso de generación de electricidad (f.e.m.), su carga se extingue más o menos rápidamente al extraerle corriente.

En la descarga, las curvas de tensión y corriente son decrecientes, disminuyendo exponencialmente en función del tiempo.

La tensión del condensador en función del tiempo viene dada por la fórmula:

$$\boxed{V_C = V_0 \cdot e^{\left(\frac{-t}{R \cdot C}\right)}}$$

V_0 es su tensión almacenada a partir de la cual se inicia la descarga y cuyo valor tenderá hacia cero.

Descarga de corriente

En el caso de la corriente, en el momento inicial de la descarga ($(t = 0)$ el valor es máximo:

$$I_0 = \frac{V_0}{R}$$

A medida que el condensador va perdiendo carga, su tensión va disminuyendo y esto da lugar a que también la corriente vaya haciéndose cada vez menor tendiendo a cero:

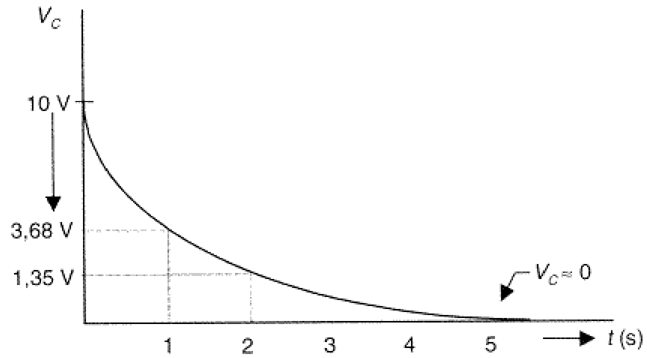
$$I_C = \frac{V_C}{R}$$

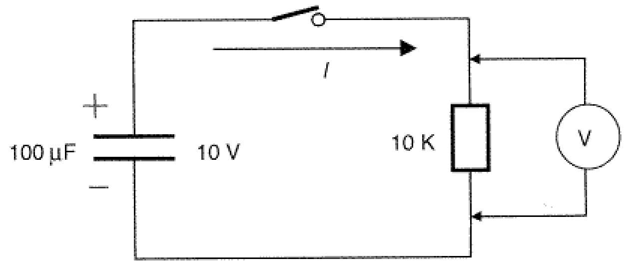
Y cuando el condensador esté prácticamente descargado, como $V_C = 0$ entonces $I_C = 0$.

Así, la fórmula general que nos da el valor de la corriente en función del tiempo se deduce que es:

$$I_C = \frac{V_C}{R} \quad \Rightarrow \quad I_C = \frac{V_0 \cdot e^{\frac{-t}{R \cdot C}}}{R} \quad \Rightarrow \quad \boxed{I_C = \frac{V_0}{R} \cdot e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)}}$$

Ejemplo.





*Supongamos un condensador de **C** = 100 µF cargado con 10 V, el cual se puede descargar a través de una resistencia de 10 kΩ (Figura 13). Al conectarle la resistencia, se inicia su descarga con una constante de tiempo de:*

$$\tau = R \cdot C = 10^4 \times 100 \cdot 10^{-6} = 1 \ s$$

O sea, al cabo de 1 segundo su tensión habrá disminuido a:

$$V_C = V_0 \cdot e^{\left(\frac{-t}{R \cdot C}\right)} = 10 \times 2{,}718^{\left(\frac{-1}{10^4 \times 100 \cdot 10^{-6}}\right)} \approx 3{,}68 \ V$$

Así, se comprueba que al cabo de una constante de tiempo, $\tau = \boldsymbol{R \cdot C}$, su tensión disminuye en un 63,2%; o sea, se queda con un 36,8% del valor inicial $\boldsymbol{V_0}$:

$$\boxed{\tau = R \cdot C \quad \Rightarrow \quad V_C = 0{,}368 \ V_0}$$

$$10^4 \ \Omega \times 100 \cdot 10^{-6} \ F = 1 \ s \quad \Rightarrow \quad V_C = 0{,}368 \times 10 = 3{,}68 \ V$$

*Y con cada constante de tiempo transcurrida su tensión se irá reduciendo en un 63,2% de la tensión que le queda. Así, en la primera constante de tiempo (**t** = 1 s) la tensión pasará de 10 V a 3,68 V, en la segunda constante de tiempo (**t** = 2 s) la tensión pasará de 3,68 V a 1,35 V, y así sucesivamente durante el proceso de descarga:*

$$t = 1 \ s \quad \Rightarrow \quad V_C = 0{,}368 \times 10 = 3{,}68 \ V$$

$$t = 2 \ s \quad \Rightarrow \quad V_C = 0{,}368 \times 3{,}68 = 1{,}35 \ V$$

$$t = 3 \ s \quad \Rightarrow \quad V_C = 0{,}368 \times 1{,}35 = 0{,}497 \ V$$

*Estos valores se pueden obtener también directamente por medio de la fórmula general. Ejemplo, para **t** = 2 s:*

$$V_C = V_0 \cdot e^{\left(\frac{-t}{R \cdot C}\right)} = 10 \times 2{,}718^{\left(\frac{-2}{10^4 \times 100 \cdot 10^{-6}}\right)} \approx 1{,}35 \ V$$

Teóricamente, sólo al cabo de un tiempo infinito $(t \to \infty)$ la descarga del condensador es completa $(V_C = 0 \ V)$: Por ello, en la teoría, el condensador nunca queda tampoco totalmente descargado, aunque sea algún microvoltio, pero, a efectos prácticos, al cabo de 5 constantes de tiempo $(t = 5 \cdot R \cdot C)$ se considera totalmente descargado ya que su valor es muy bajo:

$$t = 5 \cdot (R \cdot C) \quad \Rightarrow \quad V_C = V_0 \cdot e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)} = V_0 \cdot e^{(-5)} = V_0 \cdot \frac{1}{e^5} \approx 0{,}00674 \cdot V_0$$

O sea

$$\boxed{t = 5 \cdot (R \cdot C) \quad \Rightarrow \quad V_C \approx 0}$$

Ejemplo.

Supongamos un condensador de 100 μF cargado con una tensión de 10 V, cuya descarga se realiza a través de una resistencia de 10 kΩ (Figura 13b). En el momento inicial de conectar la resistencia la corriente es máxima, de valor:

$$I_0 = \frac{V_0}{R} = \frac{10}{10^4} = 0{,}001 \ \ A = 1 \ \ mA$$

La constante de tiempo del circuito es:

$$\tau = R \cdot C = 10^4 \times 100 \cdot 10^{-6} = 1 \ \ s$$

Y al cabo de este tiempo ($t = 1$ s) el valor de la corriente será:

$$I_C = I_0 \cdot e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)} = 0{,}001 \times 2{,}718^{\left(\frac{-1}{10^4 \times 100 \cdot 10^{-6}}\right)} = \frac{0{,}001}{2{,}718} \approx 0{,}000368 \ \ A = 0{,}368 \ \ mA$$

Lo cual, como debe ser, coincide con el cálculo práctico del valor de I_C al cabo de una constante de tiempo:

$$\tau = R \cdot C \quad \Rightarrow \quad I_C = 0{,}368 \cdot I_0$$

$$\tau = 10^4\,\Omega \times 100 \cdot 10^{-6}\,F = 1 \ \ s \quad \Rightarrow \quad I_C = 0{,}368 \times 0{,}001 \approx 0{,}000368 \ \ A \approx 0{,}368 \ \ mA$$

Y, al igual que en la tensión, al cabo de $5 \cdot \tau$, el condensador se puede considerar prácticamente descargado ya que su valor es muy bajo:

$$I_C = \frac{V_0}{R} \cdot e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)} = \frac{V_0}{R} \cdot e^{-5} = \frac{V_0}{R} \cdot \frac{1}{e^5} = \frac{V_0}{R} \cdot \frac{1}{(2{,}718)^5} \approx \frac{V_0}{R} \cdot 0{,}0067$$

así pues:

$$\boxed{t = 5 \cdot (R \cdot C) \quad \Rightarrow \quad I_C \approx 0}$$

ENERGÍA ALMACENADA EN UN CONDENSADOR

La carga eléctrica almacenada en un condensador tiene capacidad de realizar trabajo, cuya magnitud depende de la cantidad de carga almacenada. De este modo, en el proceso de carga el condensador almacena energía que después devuelve en el proceso de descarga.

Como se sabe, la diferencia de potencial entre las placas de un condensador de capacidad $\boldsymbol{C}$ cargado con una carga $\boldsymbol{Q}$ viene dada por:

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

En el proceso de carga dicha tensión varía desde 0 hasta el valor $\boldsymbol{V}$; el valor medio de tensión es, por tanto, $\boldsymbol{V/2}$. Y, por otra parte, el trabajo necesario para trasladar la carga total $\boldsymbol{Q}$ por medio de dicha tensión media es:

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{Q}\frac{\boldsymbol{V}}{2}$$

Teniendo en cuenta que $\boldsymbol{Q} = \boldsymbol{C} \cdot \boldsymbol{V}$,se deduce así que la energía eléctrica, $\boldsymbol{E}$, almacenada en el condensador viene dada por la fórmula:

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{Q}\frac{\boldsymbol{V}}{2} = \boldsymbol{C} \cdot \boldsymbol{V}\frac{\boldsymbol{V}}{2} \qquad \Rightarrow \qquad \boxed{\boldsymbol{E} = \frac{1}{2}\boldsymbol{C} \cdot \boldsymbol{V}^2}$$

Siendo:

- $\boldsymbol{E}$ = Energía almacenada por un condensador en Julios (J).
- $\boldsymbol{C}$ = Capacidad nominal del condensador en Faradios (F).
- $\boldsymbol{V}$ = Tensión nominal del condensador en Voltios (V).

Así, un condensador de 120 μF que esté cargado con una tensión de 300 V dispondrá de una energía almacenada de:

$$\boldsymbol{E} = \frac{1}{2} \cdot \boldsymbol{C} \cdot \boldsymbol{V}^2 = \frac{1}{2} \times 120 \cdot 10^{-6} \times 300^2 = 5{,}4 \ \boldsymbol{J}$$

Recordamos que un Julio (J) es la unidad de trabajo o energía, y que un Julio por segundo (J·s) da lugar a la potencia de un Vatio (W).