Capítulo 2

El condensador

2.1 INTRODUCCIÓN

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.

Cuando se le aplica una tensión mediante una fuente externa, se produce un efecto de campo eléctrico en su interior, y adquiere cierta magnitud de carga eléctrica (*culombios*) que da lugar a una diferencia de potencial entre sus terminales.

Los condensadores son componentes de dos terminales, cuya simbología típica se representa en la figura 2.1.

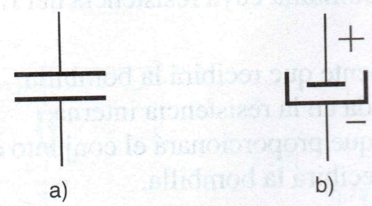


Figura 2.1. Simbología para los condensadores. a) *General.* b) *Electrolítico (tiene polaridad).*

2.2 EXPERIMENTACIÓN DE LA CARGA-DESCARGA DEL CONDENSADOR

2.2.1 Carga

Mediante el montaje de la figura 2.2 se puede comprobar el efecto de almacenaje de carga eléctrica. 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 retener (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.

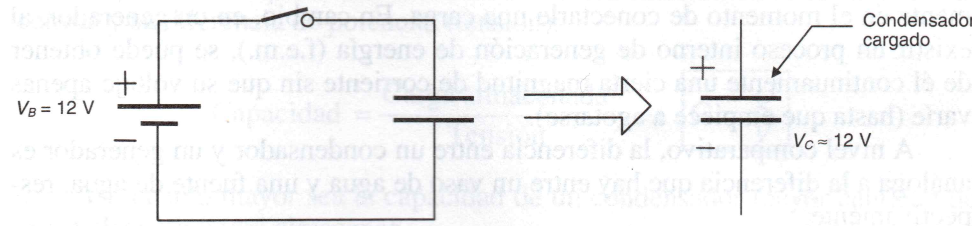


Figura 2.2. Al conectar un condensador a una fuente de tensión (V_B), éste queda cargado con un voltaje aproximadamente igual al de la fuente.

2.2.2 Descarga

Mediante el circuito de la figura 2.3 se puede comprobar el efecto de descarga del condensador. 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 ($V_R = I\,R$). Esto se puede verificar por medio de un voltímetro. A medida que el condensador va cediendo corriente (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).

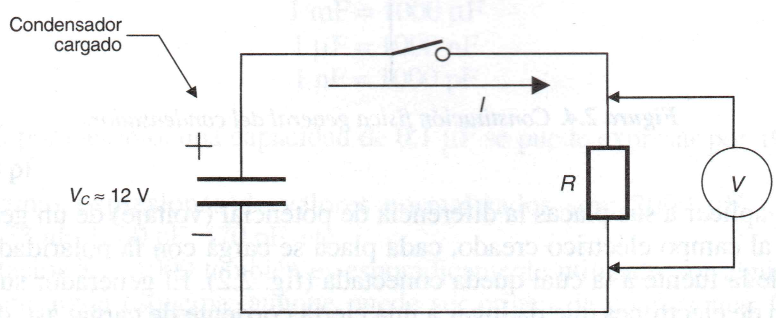


Figura 2.3. Descarga del condensador sobre una resistencia.

Así pues, los condensadores cargados de electricidad se pueden descargar sobre cierto elemento receptor. Y una vez consumida su carga, el condensador puede volver a cargarse; es, pues, un elemento que puede almacenar electricidad.

Aunque un condensador cargado presenta entre sus terminales una cierta tensión, como si fuera una pila, existe una gran diferencia entre un condensador cargado y una pila (o acumulador); en el interior del condensador no existe un proceso de generación de f.e.m. y su energía se extingue más o menos rápidamente en el momento de conectarle una carga. En cambio, en un generador, al existir un proceso interno de generación de energía (f.e.m.), se puede obtener de él continuamente una cierta magnitud de corriente sin que su voltaje apenas varíe (hasta que empiece a agotarse).

A nivel comparativo, la diferencia entre un condensador y un generador es análoga a la diferencia que hay entre un vaso de agua y una fuente de agua, respectivamente.

2.3 CONSTITUCIÓN DEL CONDENSADOR

Básicamente, el condensador está formado por dos electrodos internos denominados placas (o armaduras) separadas por un aislante que se denomina *dieléctrico* (fig. 2.4). 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.

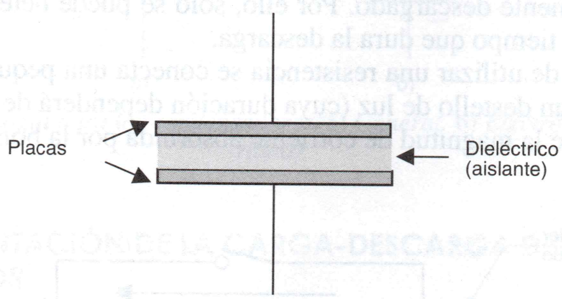


Figura 2.4. *Constitución física general del condensador.*

Al aplicar a sus placas la diferencia de potencial (voltaje) de un generador, debido al campo eléctrico creado, cada placa se carga con la polaridad del terminal de la fuente a la cual queda conectada (fig. 2.2). El generador suministra un flujo de electrones que da lugar a una cierta corriente de carga; así, de lo que realmente se carga el condensador es de unidades de carga eléctrica, culombios.

Así pues, los condensadores cargados de electricidad se pueden descargar sobre cierto elemento receptor. Y una vez consumida su carga, el condensador puede volver a cargarse; es, pues, un elemento que puede almacenar electricidad.

Aunque un condensador cargado presenta entre sus terminales una cierta tensión, como si fuera una pila, existe una gran diferencia entre un condensador cargado y una pila (o acumulador); en el interior del condensador no existe un proceso de generación de f.e.m. y su energía se extingue más o menos rápidamente en el momento de conectarle una carga. En cambio, en un generador, al existir un proceso interno de generación de energía (f.e.m.), se puede obtener de él continuamente una cierta magnitud de corriente sin que su voltaje apenas varíe (hasta que empiece a agotarse).

A nivel comparativo, la diferencia entre un condensador y un generador es análoga a la diferencia que hay entre un vaso de agua y una fuente de agua, respectivamente.

2.3 CONSTITUCIÓN DEL CONDENSADOR

Básicamente, el condensador está formado por dos electrodos internos denominados placas (o armaduras) separadas por un aislante que se denomina *dieléctrico* (fig. 2.4). 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.

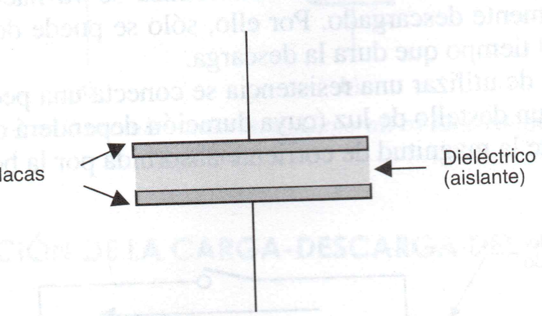


Figura 2.4. *Constitución física general del condensador.*

Al aplicar a sus placas la diferencia de potencial (voltaje) de un generador, debido al campo eléctrico creado, cada placa se carga con la polaridad del terminal de la fuente a la cual queda conectada (fig. 2.2). El generador suministra un flujo de electrones que da lugar a una cierta corriente de carga; así, de lo que realmente se carga el condensador es de unidades de carga eléctrica, culombios.

Y como consecuencia de dicha carga eléctrica aparece una diferencia de potencial entre sus terminales (tensión).

Dependiendo de las características constructivas del condensador éste puede tener más o menos capacidad de adquirir carga eléctrica.

2.3.1 Capacidad

Se denomina capacidad del condensador a la relación entre la carga almacenada y su diferencia de potencial (tensión):

$$\text{Capacidad} = \frac{\text{Carga almacenada}}{\text{Tensión}} \Rightarrow \boxed{C = \frac{Q}{V}}$$

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

La unidad de capacidad es el faradio; la capacidad de un condensador es de 1 faradio si almacena 1 culombio y da lugar a una diferencia de potencial de 1 voltio:

$$C = \frac{Q}{V} \Rightarrow 1\,\text{faradio} = \frac{1\,\text{culombio}}{1\,\text{voltio}}$$

La capacidad de los condensadores se expresa normalmente por medio de las siguientes unidades submúltiplo del faradio (F):

Milifaradio (mF) $\Rightarrow$ 1 mF = 10^{-3} F
Microfaradio (µF) $\Rightarrow$ 1 µF = 10^{-6} F
Nanofaradio (nF) $\Rightarrow$ 1 nF = 10^{-9} F
Picofaradio (pF) $\Rightarrow$ 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.

El factor K = 1000 también es esporádicamente utilizado por algún fabricante y en algún esquema, aunque puede ser origen de confusiones. Cuando aparece indica nF (1000 pF); así: 1K = 1 nF = 1000 pF.

2.3.1.1 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:

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

siendo

S = Superficie de las placas (m^2).
d = Distancia de separación de las placas (m).
ε = Constante característica del dieléctrico.

Así, se deduce que cuanto mayor sea la superficie de las placas y menor sea la separación entre ellas mayor será la capacidad.

El tipo de dieléctrico utilizado también afecta a la capacidad, ya que de él depende la constante dieléctrica ε. Por ejemplo, la del vacío es de 1 ($\varepsilon = 1$), la del papel seco está alrededor de 2,5 y con ciertos materiales cerámicos se pueden conseguir valores de 100.

En la práctica, algunas técnicas de control industrial se basan en la detección de la variación de capacidad por cambios en el dieléctrico, por ejemplo, el llenado de botellas; como el líquido tiene una constante dieléctrica diferente a la del aire, ello varía una capacidad que, electrónicamente, se detecta y se puede tener así una información sobre el llenado de las botellas.

Se denomina constante dieléctrica relativa (ε_r) a la relación entre la constante dieléctrica de cualquier material con la del vacío. La constante dieléctrica del aire, para efectos prácticos, se toma igual a 1 ($\varepsilon \approx 1$).

El valor práctico efectivo de la constante dieléctrica de cualquier material se toma de: $\varepsilon = 8{,}85 \times 10^{-12}\ \varepsilon_r$, considerando las dimensiones en metros y la capacidad en faradios.

Ejemplos. Un condensador formado por dos placas de superficie $S = 0{,}05\ m^2$ cuya distancia de separación es de 0,5 mm, siendo el dieléctrico aire, tendrá una capacidad de:

$$C = \varepsilon \frac{S}{d} = (8{,}85 \times 10^{-12} \times 1)\frac{0{,}05}{0{,}0005} = 0{,}885 \cdot 10^{-9}\ F = 0{,}885\ nF = 885\ pF$$

siendo, 0,5 mm = 0,0005 m y la constante dieléctrica del aire $\varepsilon \approx 1$.

En cambio, si en lugar de aire el dieléctrico es un material cerámico de $\varepsilon = 100$, se obtiene una capacidad 100 veces mayor:

$$C = \varepsilon \frac{S}{d} = (8{,}85 \times 10^{-12} \times 100)\frac{0{,}05}{0{,}0005} = 0{,}885 \cdot 10^{-7}\ F = 0{,}0885\ \mu F = 88.500\ pF$$

Estas cuestiones sobre detalles constructivos de los condensadores, entre otras cosas, permiten saber la relación que hay entre el tamaño físico del condensador y su capacidad; en principio mayor capacidad implica mayor tamaño. Una forma de reducir el tamaño es utilizando valores altos de constante dieléctrica, ya que a mayor constante dieléctrica (ε) se consigue mayor capacidad.

2.4 CARACTERÍSTICAS PRÁCTICAS DE LOS CONDENSADORES

En los condensadores, aparecen como características de mayor importancia práctica:

- la capacidad,
- la tensión.

Capacidad: Esta característica da cuenta de la cantidad de carga eléctrica (culombios) que puede almacenar ($Q = C \times V$), su capacidad nominal de almacenamiento.

Tensión: Indica la tensión máxima nominal que puede soportar de una forma continua. Por tanto, en cualquier aplicación que se utilice se debe tener la precaución de que no se sobrepase dicha tensión. Este valor aparece indicado en el condensador. Hay que tener en cuenta que cuando se sobrepasa la tensión máxima indicada en el condensador, éste puede explotar (aunque no es peligroso, puede ser espectacular).

Por consiguiente, el valor de los condensadores se suele expresar en los esquemas indicando su capacidad y tensión. Ejemplo de expresiones:

2000 µF 35 V; 100 nF 400 V; 47 µF 63 V; 470 pF 250 V.

Otras características relacionadas son:

Tolerancia: Al igual que en todos los componentes, el valor de capacidad nominal especificado también puede variar en un cierto margen; o sea, está sujeto a unas tolerancias. En especial en los condensadores electrolíticos esta característica suele ser bastante alta: entre –20 y +50% de variación, y hasta más. Así, un condensador electrolítico que indique una capacidad de, por ejemplo, 100 µF podría tener un valor entre 80 y 150 µF.

Corriente de fuga: Se refiere a una muy pequeña corriente que podría pasar a través del dieléctrico al estar sometido a tensión eléctrica. Idealmente, como es obvio, dicha corriente debería ser cero, o sea, no debería haber ninguna fuga. Este es un dato particularmente interesante en los condensadores electrolíticos de aluminio.

Temperatura: Este parámetro puede afectar negativamente a las características del condensador, en especial a los electrolíticos, por lo cual también puede aparecer indicado este dato en el condensador. En general, debe procurarse que los condensadores queden alejados de fuentes de calor.

2.5 TIPOS DE CONDENSADORES

Según el dieléctrico utilizado en su construcción existen distintos tipos de condensadores. Básicamente, tenemos:

- papel,
- mica,
- cerámicos,
- plásticos (poliéster, poliestireno, etc.),
- electrolíticos (aluminio y tantalio).

Excepto los electrolíticos, el resto son condensadores de relativa baja capacidad; van desde unos pocos picofaradios hasta alrededor de 1 μF.

Los condensadores con dieléctrico de *papel* están formados por unas láminas de aluminio arrolladas (son las placas) separadas por un dieléctrico compuesto por finas capas de papel.

En los condensadores de *mica* se intercalan finas capas de este material con láminas metálicas.

La constitución de los condensadores *cerámicos* se basa en una especie de lámina de material cerámico que es el dieléctrico. El aspecto de estos condensadores se caracteriza por una forma tubular o una forma de disco. Se suelen utilizar bastante en telecomunicaciones (aparatos de radio y televisión).

Los condensadores con dieléctrico de *plástico* son de los más utilizados en electrónica. Según el tipo de material en particular existen varios tipos, siendo los más populares los de poliéster, estiroflex y policarbonato. Con los de poliéster y policarbonato se consiguen capacidades del orden de 1 nF hasta unos microfaradios, con una tensión de más de 1000 V. Los de estiroflex son de menor capacidad, obteniéndose desde unos pocos picofaradios hasta 1 μF.

En los condensadores *electrolíticos* el dieléctrico está formado por una fina capa de óxido del orden de micras (1 micra = 1 μm), originada por electrólisis, en conjunción con una composición química pastosa. Esta técnica de fabricación permite obtener elevadas capacidades con una buena relación capacidad/tamaño. Es por ello que, en general, los condensadores de elevada capacidad son de tipo electrolítico.

En este tipo de condensadores se consiguen capacidades desde alrededor de 1 μF hasta 10.000 μF, y más. Valores normalmente utilizados son, por ejemplo, 2 μF, 10 μF, 22 μF, 47 μF, 100 μF, 2000 μF.

Asimismo, los condensadores de tipo electrolítico se caracterizan porque son de tipo *polarizado,* o sea, cada terminal se debe conectar a su correspondiente polaridad (fig. 2.1); por ello, en su envolvente pueden aparecer los signos de positivo (+) o negativo (–). Por el contrario, los demás tipos de condensadores (papel, mica, plásticos, etc.) no tienen polarización y no hay que vigilar este detalle al efectuar su conexión.

Dentro de los condensadores electrolíticos aparecen dos tipos: los de aluminio y los de tantalio.

Los condensadores electrolíticos de *aluminio* son los más populares. Su estructura es de aluminio de aspecto tubular, y con terminal negativo. Los normalmente utilizados en electrónica van desde 1 μF hasta alrededor de 5000 μF.

Los de *tantalio* son condensadores electrolíticos de más calidad y menor tamaño que los de aluminio, pero también algo más caros. El dieléctrico es óxido de tantalio, cuyas propiedades dieléctricas son mejores que las del óxido de aluminio. En comparación con los de aluminio, tienen menos corrientes de fuga, están menos influenciados por la temperatura, tienen menos tolerancia y son de mayor duración.

2.6 MONTAJE DE CONDENSADORES EN PARALELO Y SERIE

2.6.1 Montaje en paralelo

De la misma manera que se hacen montajes de resistencias en paralelo, también resulta interesante, a veces, montar condensadores en paralelo. En este caso, el objetivo es conseguir mayor valor de capacidad; el resultado es una capacidad superior a la del condensador de mayor capacidad del montaje.

Puesto que un condensador constituye una especie de almacén de carga eléctrica, de la misma manera que utilizando varias botellas se puede obtener mayor capacidad de almacenaje de líquido, con varios condensadores en paralelo también se aumenta la capacidad de almacenaje de carga eléctrica. La capacidad total resultante es la suma de las capacidades de los condensadores utilizados, como a continuación queda demostrado matemáticamente.

Por ejemplo, en el caso de dos condensadores en paralelo (fig. 2.5), obtenemos la carga total almacenada:

$$Q_T = Q_1 + Q_2$$

Y teniendo en cuenta que:

$$\left.\begin{aligned} Q_1 &= C_1\, V \\ Q_2 &= C_2\, V \end{aligned}\right\} \Rightarrow \quad Q_T = C_1\, V + C_2\, V$$

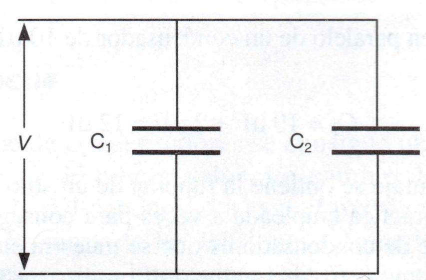


Figura 2.5. *Condensadores en paralelo.*

Y a esta carga total, Q_T, le corresponde una capacidad total:

$$C_T = \frac{Q_T}{V}$$

Por tanto, se puede poner:

$$Q_T = C_1 V + C_2 V \Rightarrow C_T V = C_1 V + C_2 V$$

Y simplificando, dividiendo por V, se obtiene (fig. 2.6):

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

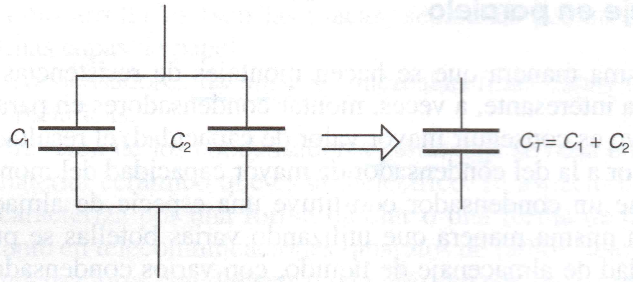


Figura 2.6. *Los condensadores en paralelo dan lugar a una capacidad total que es la suma de las capacidades de los condensadores del montaje paralelo.*

Así, en general, la conexión de condensadores en paralelo da lugar a:

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + ... + C_n$$

El resultado de conectar condensadores en paralelo se puede ver, pues, como un efecto de aumentar la superficie de las placas, lo cual da lugar a una mayor capacidad.

En cuanto a la tensión nominal total, puesto que todos los condensadores reciben el mismo voltaje, como es obvio, corresponde a la tensión del condensador que la tenga más baja.

Ejemplos. El montaje en paralelo de un condensador de 10 µF con otro de 2 µF tiene el valor resultante de:

$$C_T = 10\ \mu F + 2\ \mu F = 12\ \mu F$$

Así, con dicho montaje se obtiene la función de un solo condensador de 12 µF. Esta es una solución práctica empleada a veces para conseguir mayor valor de capacidad. En el montaje de condensadores que se muestra en la figura 2.7 se puede ver la capacidad resultante.

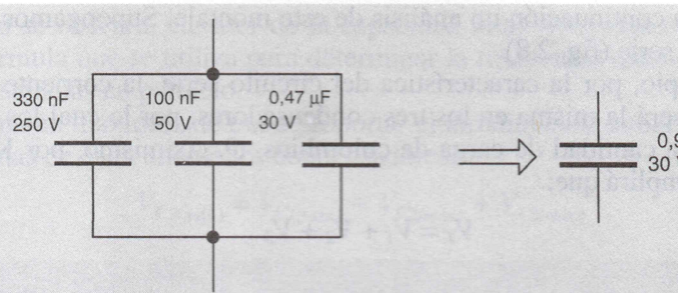


Figura 2.7. Equivalencia de los tres condensadores en paralelo.

Expresando todos los valores en microfaradios (µF), tenemos:

$$330 \text{ nF} \Rightarrow 0{,}33\ \mu\text{F}$$

$$100 \text{ nF} \Rightarrow 0{,}1\ \mu\text{F}$$

Así, el valor resultante es de:

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 = 0{,}47 + 0{,}33 + 0{,}1 = 0{,}9\ \mu\text{F}$$

Y la tensión nominal del conjunto es de 30 V, puesto que esta es la tensión del condensador que soporta menos voltaje de los tres.

Una forma de convertir los valores a picofaradios, nanofaradios o microfaradios, que son las unidades normalmente utilizadas, consiste en expresar el valor con la potencia de 10 correspondiente a la unidad que interese. Por ejemplo, el valor de 0,47 µF expresado en nanofaradios es:

$$0{,}47\ \mu\text{F} = 0{,}47 \cdot 10^{-6}\text{ F} \Rightarrow 470 \cdot 10^{-9}\text{ F} = 470 \text{ nF}$$

Para que se pueda poner la potencia 10^{-9} (correspondiente a los nanofaradios), se ha tenido que multiplicar por 1000 el valor 0,47.

Siguiendo con el ejemplo, en picofaradios:

$$0{,}47\ \mu\text{F} = 0{,}47 \cdot 10^{-6}\text{ F} \Rightarrow 470.000 \cdot 10^{-12}\text{ F} = 470.000 \text{ pF}$$

Para poder poner la potencia de 10 de pF, 10^{-12}, se ha tenido que correr la coma seis lugares hacia la derecha (equivale a multiplicar por 10^6).

Otro ejemplo; 22 nF expresado en microfaradios:

$$22 \text{ nF} = 22 \cdot 10^{-9}\text{ F} \Rightarrow 0{,}022 \cdot 10^{-6}\text{ F} = 0{,}022\ \mu\text{F}$$

2.6.2 Montaje en serie

En el montaje serie de condensadores se consigue una capacidad total inferior a la del condensador de menor valor. En cambio, la tensión nominal del conjunto es superior a la del condensador con el mayor valor de tensión nominal ya que es igual a la suma de las tensiones nominales de cada uno de los condensadores. A veces, resulta interesante este tipo de montaje para aumentar la tensión nominal, adecuándola así a las necesidades.

Veamos a continuación un análisis de este montaje. Supongamos tres condensadores en serie (fig. 2.8).

En principio, por la característica del circuito serie, la corriente de carga que circulará será la misma en los tres condensadores; por lo cual los tres recibirán la misma cantidad de carga de culombios, Q. Asimismo, por Kirchhoff, también se cumplirá que:

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3$$

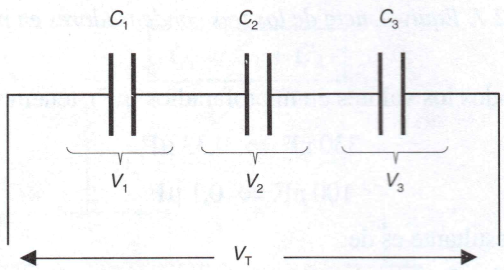


Figura 2.8. *Condensadores en montaje serie.*

Y como la tensión en el condensador se puede expresar por:

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

se tiene:

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 = \frac{Q}{C_1} + \frac{Q}{C_2} + \frac{Q}{C_3}$$

La relación entre la cantidad de carga Q y la tensión total, V_T, determina una capacidad total equivalente:

$$C_T = \frac{Q}{V_T}$$

pudiéndose poner entonces:

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

Simplificando, dividiendo por Q, se deduce finalmente:

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

Como se observa, el valor de la capacidad total viene dado por el mismo tipo de fórmula que se utiliza para determinar la resistencia total en los montajes de resistencias en paralelo.

La tensión máxima que puede soportar el circuito es la suma de las tensiones máximas de cada uno de los condensadores:

$$V_{CT(máx.)} = V_{C1(máx.)} + V_{C2(máx.)} + V_{C3(máx.)}$$

Ejemplo. En el circuito serie de tres condensadores que se muestra en la figura 2.9, la capacidad total resultante es:

$$C_T = \frac{1}{\dfrac{1}{C_1}+\dfrac{1}{C_2}+\dfrac{1}{C_3}} = \frac{1}{\dfrac{1}{0{,}1\cdot 10^{-6}}+\dfrac{1}{2\cdot 10^{-6}}+\dfrac{1}{470\cdot 10^{-9}}} = 79{,}19\cdot 10^{-9}\ \mathrm{F}$$

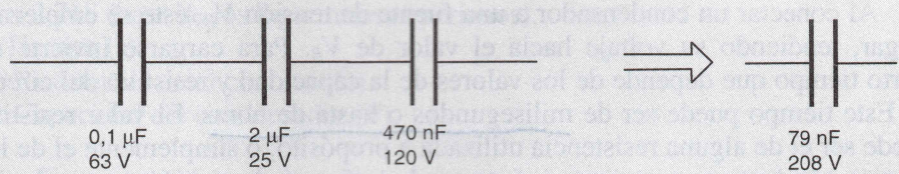


Figura 2.9. *Equivalencia de los tres condensadores en serie.*

Y la tensión nominal del montaje es:

$$V_{máx.} = 63 + 25 + 120 = 208\ \mathrm{V}$$

En el caso de sólo dos condensadores en serie, la fórmula de C_T se simplifica a:

$$C_T = \frac{1}{\dfrac{1}{C_1}+\dfrac{1}{C_2}} \Rightarrow C_T = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2},$$

fórmula equiparable a la del montaje paralelo de dos resistencias.

Ejemplo. El montaje serie de un condensador de 47 µF con otro de 100 µF da una capacidad resultante de:

$$C_T = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{47\times 100}{47+100} = 31{,}97\ \mu\mathrm{F}$$

Cuando todos los condensadores del montaje tienen el mismo valor de capacidad, el valor total resultante viene dado por:

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

siendo n el número de condensadores y C el valor de capacidad de uno de los condensadores.

Ejemplo. La capacidad resultante de tres condensadores en serie de 47 µF es de:

$$C_T = \frac{C}{n} = \frac{47}{3} = 15{,}67\ \mu F$$

2.7 CURVAS DE CARGA Y DESCARGA. CONSTANTE DE TIEMPO

2.7.1 Carga de tensión

Al conectar un condensador a una fuente de tensión V_B, éste se empieza a cargar, tendiendo su voltaje hacia el valor de V_B. Para cargarse invierte un cierto tiempo que depende de los valores de la capacidad y 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 (en cualquier circuito práctico, siempre existe algo de resistencia).

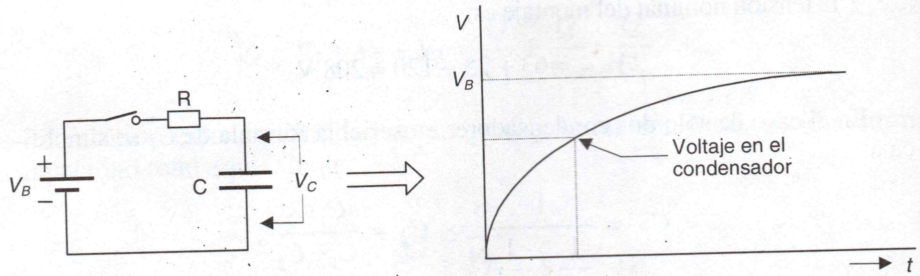


Figura 2.10. *Representación gráfica de la carga de un condensador.*

La evolución del aumento de carga se realiza de forma exponencial, según se indica en la figura 2.10. De este tipo de curva exponencial se deduce que, inicialmente, partiendo del condensador descargado ($V_C = 0$), su tensión aumenta más o menos rápidamente, pero conforme está más cargado, la adquisición de carga se realiza más lentamente. Experimentalmente, se comprueba que en el momento de conectar el condensador a la fuente de tensión, su tensión empieza a aumentar más o menos rápidamente, pero a medida que transcurre el tiempo, ésta va aumentando 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, por ejemplo, la 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, $V_{C(t)}$:

$$\boxed{V_{C(t)} = V_B - \left[(V_B - V_{C(0)}) e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)} \right]}$$

siendo:

$V_{C(t)}$: Tensión del condensador en función del tiempo.
$V_{C(0)}$: Tensión del condensador en el momento (t_0) de conectarlo a la fuente V_B.
V_B: Tensión de la fuente.
e: ≈ 2,718 (base de los logaritmos neperianos).
t: Tiempo (s).
R: Resistencia en el circuito (Ω).
C: Capacidad del condensador (F).

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

$$V_{C(t)} = V_B - \left[(V_B - V_{C(0)}) e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)} \right] = V_B - \left[(V_B - 0) e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)} \right] = V_B - V_B e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)} \Rightarrow$$

$$\boxed{V_{C(t)} = V_B \left[1 - e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)} \right]}$$

Ejemplo. Supongamos el circuito de la figura 2.11, donde $V_B = 10$ V, $R = 1$ MΩ y $C = 10$ µF. Suponiendo el condensador descargado ($V_{C(0)} = 0$ V), al cabo de 10 segundos de conectarlo a la fuente V_B, su tensión será de:

$$V_C = V_B \left[1 - e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)} \right] = 10 \left[1 - 2{,}718^{\left(\frac{-10}{10^6 \times 10 \cdot 10^{-6}}\right)} \right] \approx 6{,}32 \text{ V}$$

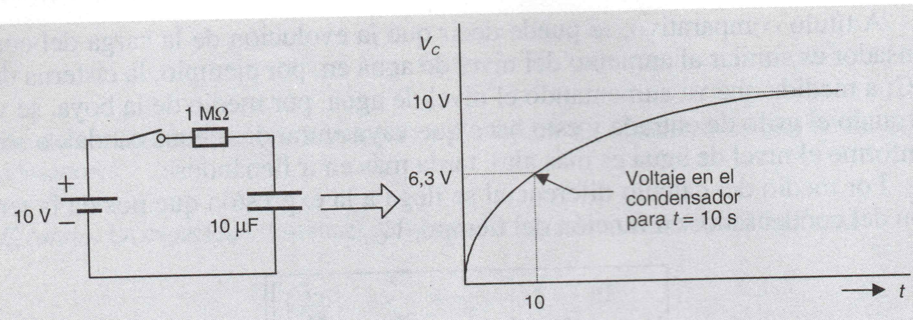


Figura 2.11. Ejemplo práctico de carga de un condensador.

De esta fórmula se deduce que, teóricamente, el condensador sólo queda totalmente cargado al cabo de un tiempo infinito, ya que sólo para $t \rightarrow \infty$ la tensión del condensador se iguala con la de la fuente de tensión ($V_C = V_B$). Esto matemáticamente se expresa así:

$$\lim_{t \to \infty} V_C = V_B \left[1 - e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)} \right] = V_B$$

Así pues, en la práctica, el condensador nunca queda totalmente cargado (siempre le falta algo, aunque sean microvoltios).

2.7.2 Constante de tiempo

Esta constante se define como el tiempo que tarda el condensador en alcanzar el 63,2% de su carga máxima (fig. 2.12). Este concepto se expresa por el producto del valor de la resistencia que se encuentre en el circuito (R) por el valor de la capacidad (C):

$$\boxed{\tau = R\,C}$$

Por tanto:

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

Este valor se puede comprobar aplicando la fórmula que nos da la tensión del condensador en función del tiempo.

Para $t = R\,C$, sustituyendo esta expresión por t:

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

Así, en el circuito de la figura 2.11, el valor de la constante de tiempo es:

$$t = R\,C = 10^6 \times 10 \cdot 10^{-6} = 10 \text{ s}$$

Por tanto, si la fuente de tensión es de $V_B = 10$ V, al cabo de 10 segundos de conectarlo su tensión será de: $0{,}632 \times 10 = 6{,}32$ V.

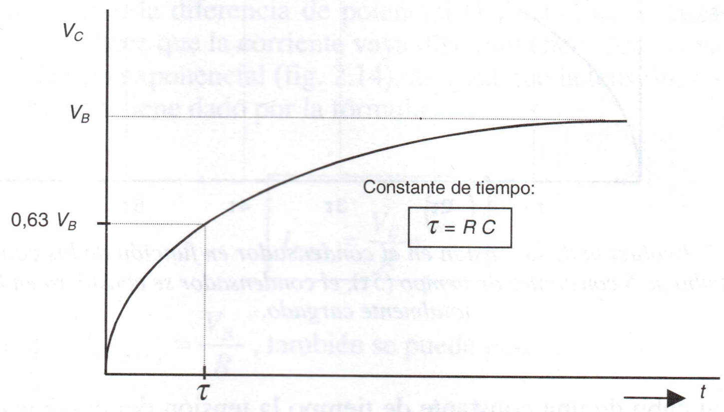


Figura 2.12. *Curva de carga con indicación de la constante de tiempo.*

Así pues, puesto que en cada constante de tiempo ($t = R\,C$) el condensador se carga a un 63,2% de lo que le falta para llegar a su carga máxima (V_B), se deduce que, en la práctica, 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. O sea:

$$\boxed{t = 5\,(R\,C) \Rightarrow V_C \approx V_B}$$

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

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

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

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

En la figura 2.13 se muestra la curva de carga del condensador en función del tiempo, indicando las sucesivas constantes de tiempo. Gráficamente, se ob-

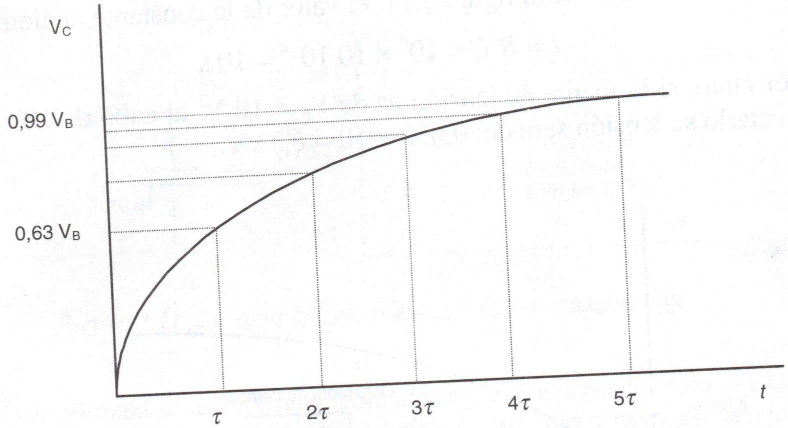


***Figura 2.13.** Evolución de la tensión en el condensador en función de las constantes de tiempo. Al cabo de 5 constantes de tiempo (5τ), el condensador se considera en la práctica totalmente cargado.*

serva que al cabo de una constante de tiempo la tensión del condensador es un poco mayor que la mitad del máximo (63,2%) y que al cabo de 5 constantes de tiempo $V_C \approx V_B$ (casi el 100%).

Ejemplo. En el circuito anterior (figura 2.11), puesto que:

$$t = 5\,(R\,C) = 5\,(10^6 \times 10 \cdot 10^{-6}) = 50 \text{ s}$$

el condensador se puede considerar prácticamente cargado a los 50 segundos de ser conectado; puesto que la fuente es de $V_B = 10$ V, su tensión será de 0,993 × × 10 = 9,93 V.

2.7.3 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 ($V_{C(0)} = 0$), la corriente toma el valor máximo. Observando el circuito (fig. 2.10) 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, puesto que $V_C = 0$, es cuando se produce el valor máximo de corriente ($I_{C(máx.)}$):

$$V_C = 0 \Rightarrow I_{C(máx.)} = \frac{V_B}{R}$$

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 (fig. 2.14), al igual que la tensión, y su valor en función del tiempo viene dado por la fórmula:

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

Puesto que $I_{C(máx.)} = \frac{V_B}{R}$, también se puede poner:

$$I_{C(t)} = I_{C(máx.)} e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)}$$

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 ($V_C \approx V_B$) y entonces, al ser $V_B - V_C \approx 0$, el valor de corriente es prácticamente cero ($I_C \approx 0$) y cesa la carga.

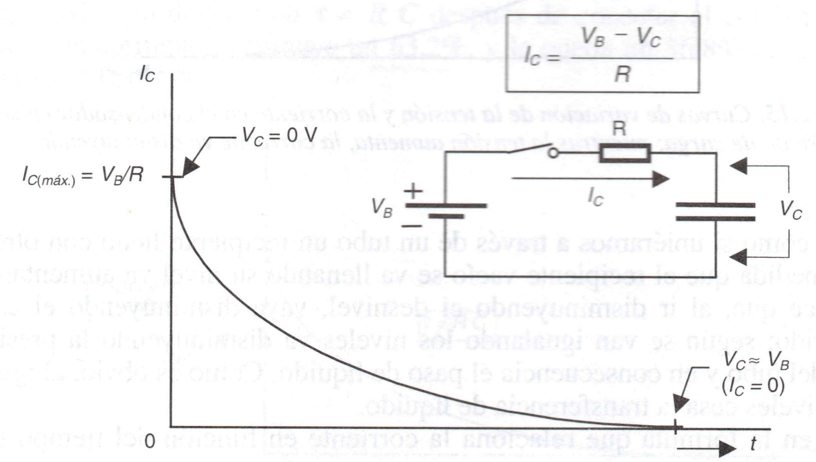


Figura 2.14. *Variación de la corriente en el condensador en su periodo de carga; máxima en el primer instante (t = 0), va disminuyendo exponencialmente en función del aumento de carga.*

Así pues, la corriente de carga va disminuyendo conforme el condensador se va cargando (fig. 2.15), con su valor máximo en el momento inicial ($t = 0$) y su valor mínimo cuando la tensión del condensador tiende a igualarse con la de la fuente.

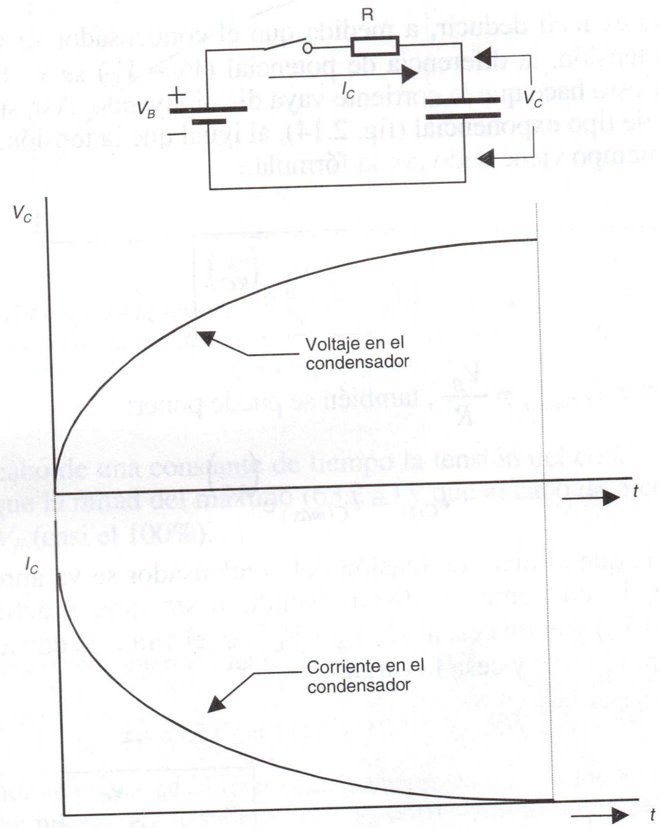


Figura 2.15. *Curvas de variación de la tensión y la corriente en el condensador en su periodo de carga; mientras la tensión aumenta, la corriente va disminuyendo.*

Es como si uniéramos a través de un tubo un recipiente lleno con otro vacío; a medida que el recipiente vacío se va llenando su nivel va aumentando y esto hace que, al ir disminuyendo el desnivel, vaya disminuyendo el caudal transferido; según se van igualando los niveles va disminuyendo la presión a través del tubo y en consecuencia el paso de líquido. Como es obvio, al igualarse los niveles cesa la transferencia de líquido.

Si en la fórmula que relaciona la corriente en función del tiempo ($I_{C(t)}$) calculamos el valor de I_C para $t = 0$, se comprueba que $I_C = \dfrac{V_B}{R}$, o sea, el valor máximo [$I_{C(máx.)}$]:

$$t = 0 \Rightarrow I_{C(t)} = \frac{V_B}{R} e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)} = \frac{V_B}{R} e^{\left(-\frac{0}{RC}\right)} = \frac{V_B}{R} \frac{1}{e^0} = \frac{V_B}{R}$$

Ejemplo. En el circuito de la figura 2.11, donde $V_B = 10$ V y $R = 1$ MΩ, la corriente instantánea máxima es:

$$I_{C(máx.)} = \frac{V_B}{R} = \frac{10}{10^6} = 10\ \mu\text{A}$$

Y si la resistencia fuera de $R = 5\ \Omega$, entonces sería de:

$$I_{C(máx.)} = \frac{V_B}{R} = \frac{10}{5} = 2\text{ A}$$

Asimismo, el valor teórico de corriente 0 sólo aparece cuando t tiende a infinito ($t \rightarrow \infty$), o sea, cuando el condensador se encuentre totalmente cargado ($V_C = V_B$):

$$\lim_{t \to \infty} I_{C(t)} = \frac{V_B}{R} e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)} = \frac{V_B}{R} e^{\left(-\frac{\infty}{RC}\right)} = \frac{V_B}{R} \frac{1}{e^{\infty}} = 0$$

Como ya se sabe, en la práctica, el condensador nunca queda totalmente cargado, siempre le falta algo; pero para efectos prácticos, al cabo de 5τ se considera totalmente cargado ($V_C = V_B \Rightarrow I_C = 0$).

Constante de tiempo

En cuanto a la corriente también aparece el concepto de constante de tiempo. Al cabo del tiempo $\tau = R\ C$ después de conectar el condensador, el valor de la corriente disminuye un 63,2%, y le queda un 36,8% hasta llegar a cero (fig. 2.16):

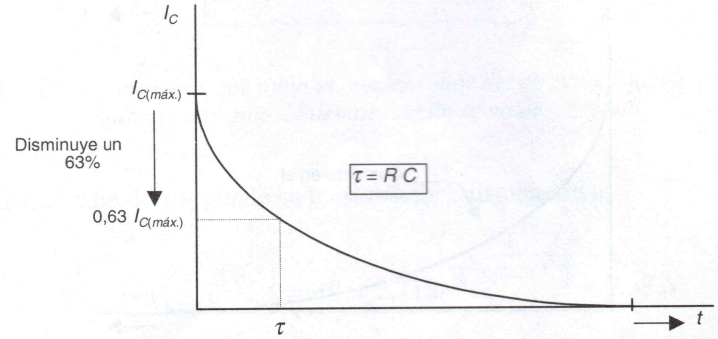


Figura 2.16. *Valor de la corriente en el condensador al cabo del tiempo* t = R C *(constante de tiempo).*

$$\boxed{\tau = R\,C \;\Rightarrow\; I_C \approx 0{,}63\; I_{C(máx.)}}$$

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

$$t = 5\,(R\,C) \;\Rightarrow\; V_C \approx V_B \;\Rightarrow I_C = \frac{V_B - V_C}{R} \approx 0$$

2.7.4 Descarga de tensión

Una vez cargado el condensador, éste se comporta como un almacén de electricidad (fig. 2.2); 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 (fig. 2.17).

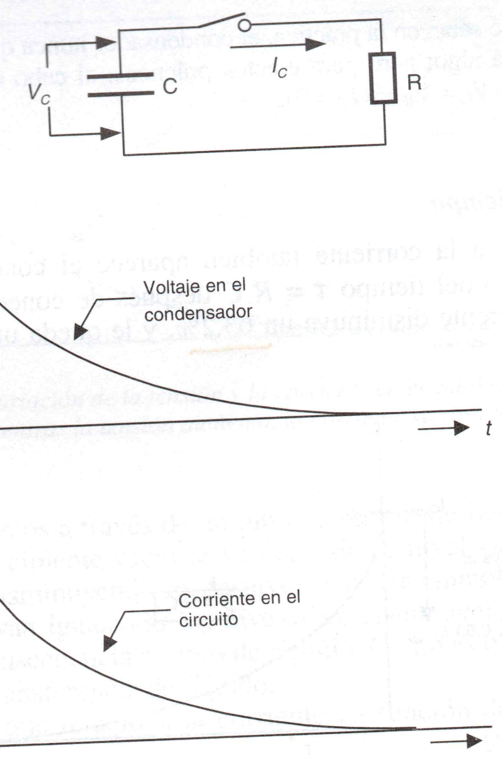


Figura 2.17. Curvas de variación de la tensión y la corriente cuando se descarga el condensador; la tensión y la corriente disminuyen a la vez.

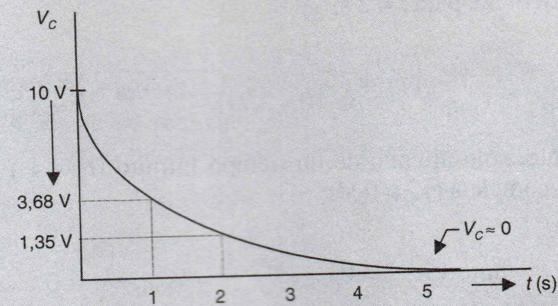
La tensión del condensador en función del tiempo viene dada por la fórmula:

$$\boxed{V_{C(t)} = V_{C(0)}\, e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)}}$$

$V_{C(0)}$ es su tensión almacenada a partir de la cual se inicia la descarga y cuyo valor tenderá hacia cero.

Ejemplo. Supongamos un condensador de $C = 100\ \mu F$ cargado con 10 V, el cual se puede descargar a través de una resistencia de 10 kΩ (fig. 2.18*b*). Al conectarle la resistencia, se inicia su descarga con una constante de tiempo de:

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



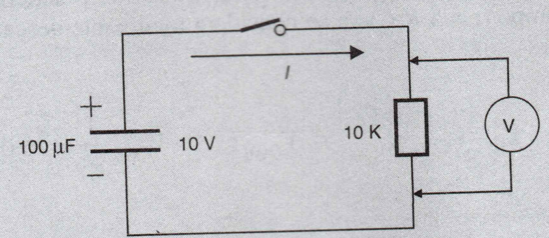


Figura 2.18. a) *Tensiones que toma el condensador del circuito,* b) *en la primera y segunda constante de tiempo, según se va descargando.*

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

$$V_{C(t)} = V_{C(0)}\, e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)} = 10 \times 2{,}718^{\left(\frac{-1}{10^4 \times 100 \cdot 10^{-6}}\right)} \approx 3{,}68\ \text{V}$$

Así, se comprueba que al cabo de una constante de tiempo, $\tau = R\,C$, su tensión disminuye en un 63,2%; o sea, se queda con un 36,8% del valor inicial $V_{C(0)}$:

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

$$\boxed{V_{C(t)} = V_{C(0)}\, e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)}}$$

$V_{C(0)}$ es su tensión almacenada a partir de la cual se inicia la descarga y cuyo valor tenderá hacia cero.

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 (fig. 2.18*b*). Al conectarle la resistencia, se inicia su descarga con una constante de tiempo de:

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

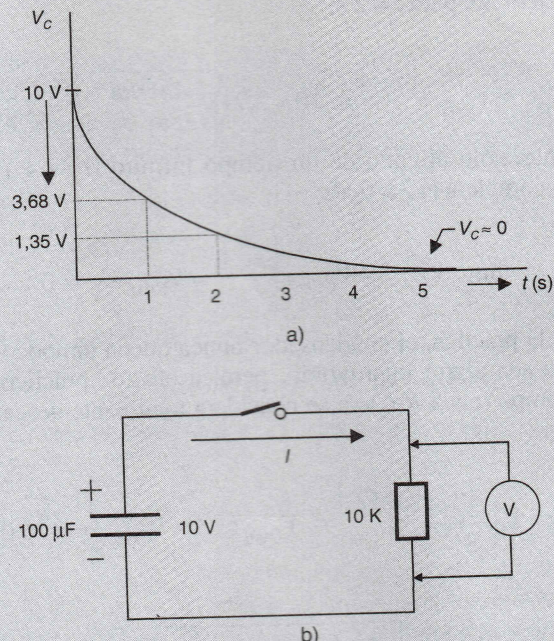


Figura 2.18. a) *Tensiones que toma el condensador del circuito,* b) *en la primera y segunda constante de tiempo, según se va descargando.*

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

$$V_{C(t)} = V_{C(0)}\, e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)} = 10 \times 2{,}718^{\left(\frac{-1}{10^4 \times 100 \cdot 10^{-6}}\right)} \approx 3{,}68 \text{ V}$$

Así, se comprueba que al cabo de una constante de tiempo, $\tau = R\,C$, su tensión disminuye en un 63,2%; o sea, se queda con un 36,8% del valor inicial $V_{C(0)}$:

$$\boxed{\tau = R\,C \;\Rightarrow\; V_C = 0{,}368\;V_{C(0)}}$$

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

Y con cada constante de tiempo transcurrida su tensión se irá reduciendo en un 63,2% de la tensión que le queda. Así (fig. 2.18*a*), 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:

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

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

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

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

$$V_{C(t)} = V_{C(0)}\,\mathrm{e}^{\left(\frac{-t}{RC}\right)} = 10 \times 2{,}718^{\left(\frac{-2}{10^4 \times 100 \cdot 10^{-6}}\right)} \approx 1{,}35\;\mathrm{V}$$

Teóricamente, sólo al cabo de un tiempo infinito ($t \rightarrow \infty$) la descarga del condensador es completa (V_C = 0 V):

$$\lim_{t \rightarrow \infty} V_{C(t)} = V_{C(0)}\,\mathrm{e}^{\left(\frac{-t}{RC}\right)} = V_{C(0)}\,\frac{1}{\mathrm{e}^{\infty}} = 0$$

Por ello, en la práctica, el condensador nunca queda tampoco totalmente descargado, aunque sea algún microvoltio, pero, a efectos prácticos, al cabo de 5 constantes de tiempo (t = 5 R C) ya se considera totalmente descargado ya que su valor es muy bajo:

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

O sea

$$\boxed{t = 5\,R\,C \;\Rightarrow\; V_C \approx 0}$$

2.7.5 Descarga de corriente

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

$$I_{C(m\acute{a}x.)} = \frac{V_{C(0)}}{R}$$

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:

$$I_{C(t)} = \frac{V_{C(t)}}{R}$$

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:

$$I_{C(t)} = \frac{V_{C(t)}}{R} \Rightarrow I_{C(t)} = \frac{V_{C(0)}\,e^{\frac{-t}{RC}}}{R} \Rightarrow \boxed{I_{C(t)} = \frac{V_{C(0)}}{R} e^{\left(\frac{-t}{RC}\right)}}$$

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 K (fig. 2.18*b*). En el momento inicial de conectar la resistencia la corriente es máxima, de valor:

$$I_{C(máx.)} = \frac{V_{C(0)}}{R} = \frac{10}{10^4} = 0{,}001\text{ A} = 1\text{ mA}$$

La constante de tiempo del circuito es:

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

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

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

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

$$\tau = R\,C \Rightarrow I_C = 0{,}368\, I_{C(máx.)}$$

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

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

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