

E3 CARGA Y DESCARGA DE UN CONDENSADOR

OBJETIVOS

Analizar experimentalmente los procesos de carga y de descarga de un condensador. Obtener sus características intensidad-voltaje en función del tiempo. Determinar la constante de tiempo del circuito.

MATERIAL

Fuente de alimentación de corriente continua, condensadores, resistencia, caja de conexiones con interruptor de tres posiciones, cables, multímetro, cronómetro, sensor de voltaje Arduino.

FUNDAMENTO TEÓRICO

Los condensadores son dispositivos eléctricos capaces de almacenar energía eléctrica. Su estructura básica consiste en dos placas conductoras (electrodos) separadas por un material dieléctrico. En la figura 1 presentamos el esquema de un condensador de placas plano-paralelas. Las placas, sometidas a una diferencia de potencial, V , adquieren una determinada carga eléctrica, Q , positiva en una de ellas y negativa en la otra, ello da lugar a un campo eléctrico \vec{E} entre las placas, aunque la variación total de carga sea nula. Desde el punto de vista físico un condensador no almacena carga ni corriente eléctrica, sino simplemente energía mecánica latente; al ser introducido en un circuito se comporta como un elemento "capaz" de almacenar la energía eléctrica que recibe durante el periodo de carga, la misma energía que cede después durante el periodo de descarga. En resumen cuando conectamos el condensador a una fuente de voltaje, comienza a circular corriente por el circuito y una de las placas adquiere carga negativa y la otra positiva. Al apagar la fuente de voltaje, si conectamos una resistencia al condensador, comenzará a circular corriente desde el condensador hacia la resistencia, hasta descargarse.

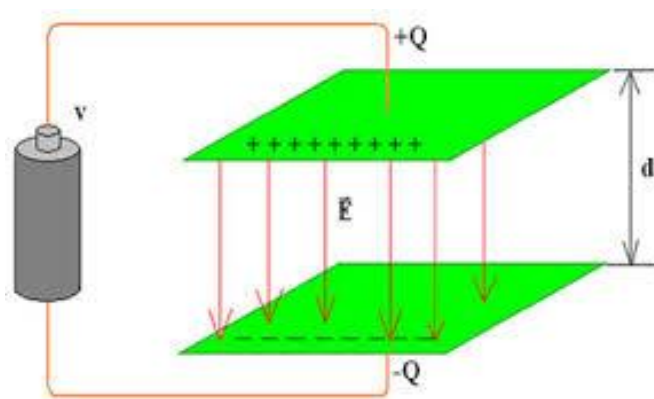


Figura 1.- Esquema de un condensador de placas plano-paralelas

En un condensador existe una relación lineal entre su carga Q y su diferencia de potencial, V_C ,

$$Q = CV_C \quad (1)$$

a la constante de proporcionalidad C se le conoce como capacidad del condensador y depende únicamente de la estructura geométrica y del dieléctrico empleado.

Sea un circuito RC serie que consiste en un condensador de capacidad C y una resistencia R conectados en serie con una fuente de tensión, \mathcal{E} , tal y como se esquematiza en la figura 2.

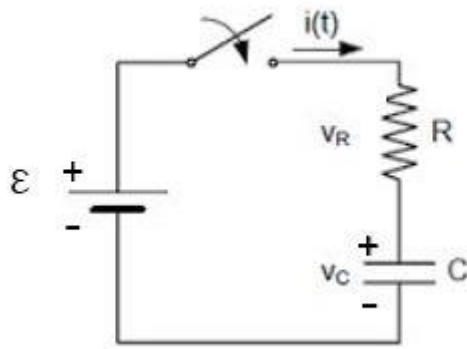


Figura 2.- Circuito RC en serie

Suponemos que el condensador está inicialmente descargado y comenzamos el proceso de carga. Si conectamos la fuente de alimentación de corriente continua, \mathcal{E} , se observará el paso de corriente $I(t)$ a través del circuito y empezará a cargarse el condensador, de forma que una vez alcanzada la carga máxima Q_{max} la corriente en el circuito será nula.

Aplicando la primera ley de Kirchhoff al circuito de la figura 2, tendremos que el voltaje \mathcal{E} aplicado al circuito es igual a las caídas de potencial en la resistencia, V_R , y en el condensador, V_C ,

$$\mathcal{E} = V_R(t) + V_C(t) \quad (2)$$

En esta expresión hemos considerado explícitamente que los potenciales V_R y V_C varían con el tiempo. Si tenemos en cuenta que se verifica la ley de Ohm para la resistencia eléctrica R , y la definición expresada en la ec.(1), podemos escribir la ec.(2) de la forma:

$$\mathcal{E} = RI(t) + \frac{1}{C}Q(t) \quad (3)$$

donde $I(t)$ es la intensidad instantánea que circula por el circuito, $Q(t)$ es la carga eléctrica instantánea del condensador y C su capacidad. Para calcular la carga y la intensidad de corriente en función del tiempo es necesario derivar la ecuación (3) con respecto al tiempo, obteniendo

$$R \frac{dI(t)}{dt} + \frac{1}{C} \frac{dQ(t)}{dt} = 0 \quad (4)$$

Si tenemos en cuenta que $I = dQ/dt$, obtenemos la ecuación diferencial del circuito:

$$R \frac{dI(t)}{dt} + \frac{1}{C}I(t) = 0 \quad (5)$$

En el instante inicial $t = 0$ el condensador está descargado, $Q = 0$, se conecta el circuito a la fuente, y la intensidad inicial será $I_{max} = \mathcal{E}/R$. Resolviendo la ecuación (5) obtenemos que la intensidad de corriente en función del tiempo viene dada por:

$$I(t) = \frac{\mathcal{E}}{R} e^{-t/RC} = I_{max} e^{-t/\tau} \quad (6)$$

donde $\tau = RC$ es lo que se denomina constante de tiempo del circuito en el proceso de carga del condensador.

La carga acumulada en el condensador $Q(t)$ en cualquier instante se obtiene integrando la intensidad con respecto al tiempo, ec.(6), e imponiendo la condición de contorno que $Q(t = 0) = 0$, obteniendo que:

$$Q(t) = \mathcal{E}C(1 - e^{-t/\tau}) = Q_{max}(1 - e^{-t/\tau}) \quad (7)$$

siendo $Q_{max} = \mathcal{E}C$ la carga máxima que puede adquirir el condensador. Así pues, durante la carga del condensador aumenta la carga almacenada en el mismo, y la diferencia de potencial, $V_C(t) = Q(t)/C$, entre sus bornes será:

$$V_C(t) = \mathcal{E}(1 - e^{-t/\tau}) \quad (8)$$

Esta ecuación nos indica el significado físico de la constante de tiempo τ . Al transcurrir un tiempo τ a partir del instante en que se conecta la fuente, el condensador tiene una diferencia de potencial entre sus placas $V_C(t) = \mathcal{E}(1 - e^{-1}) = 0.63\mathcal{E}$, es decir, un 63% de su voltaje máximo final. El condensador queda cargado totalmente cuando $t \rightarrow \infty$, pero en la práctica es usual considerar que está cargado cuando ha transcurrido un tiempo $t > 5\tau$ y su carga llegó al 99% de su valor máximo, Q_{max} .

Resumiendo, en el proceso de carga de un condensador, la corriente eléctrica que circula por el circuito RC disminuye desde su valor inicial $I_{max} = \mathcal{E}/R$, mientras que la carga almacenada en el condensador y su voltaje aumentan hasta los valores máximos de $Q_{max} = \mathcal{E}C$ y \mathcal{E} , respectivamente.

El proceso de descarga del condensador se realiza a través del circuito esquematizado en la figura 2 **SIN** la fuente de alimentación (circuito RC sin fuente). Así el condensador comenzará a descargarse a través de la resistencia debido al efecto Joule. Aplicando la ley de mallas de Kirchhoff obtenemos que

$$V_C(t) = V_R(t) \rightarrow \frac{1}{C}Q(t) = RI(t) \quad (9)$$

Si tenemos en cuenta que $I = -dQ/dt$, ya que la rapidez con la que disminuye la carga en el condensador es igual a la intensidad de corriente que pasa por el circuito (el signo menos es debido a que la carga disminuye), tendremos:

$$\frac{Q(t)}{C} + R \frac{dQ(t)}{dt} = 0 \quad (10)$$

si tenemos en cuenta la condición de contorno $Q(t=0) = Q_{max}$, la solución de la ecuación (10) nos dará que:

$$Q(t) = Q_{max}e^{-t/\tau} \quad (11)$$

lo cual indica que la carga del condensador decrece exponencialmente con el tiempo a partir del momento en que queda conectado a la resistencia. La intensidad de corriente del circuito será:

$$I(t) = I_{max}e^{-t/\tau} \quad (12)$$

y la caída de potencial en el condensador vendrá dada por:

$$V_C(t) = \mathcal{E}e^{-t/\tau} \quad (13)$$

Por tanto en el proceso de descarga del condensador la intensidad de corriente disminuye exponencialmente con el tiempo, de la misma forma que la carga y la diferencia de potencial del condensador.

METODOLOGÍA

En esta práctica se introduce el condensador como elemento de un circuito, lo cual nos permite estudiar corrientes eléctricas y diferencias de potencial variables con el tiempo.

Antes de realizar el montaje del circuito hay que asegurarse que el condensador está completamente descargado, para ello se deben de unir sus dos terminales mediante un cable de conexión.

A continuación se ha de montar el circuito RC en serie representado en la figura 3. Se usará un condensador electrolítico de capacidad C que puede cargarse y descargarse a través de una resistencia R , y un amperímetro, que permita medir la intensidad de corriente del circuito en función del tiempo. Se tendrá en cuenta que los condensadores electrolíticos deben de conectarse teniendo en cuenta su polaridad, siendo el terminal más largo el polo positivo.

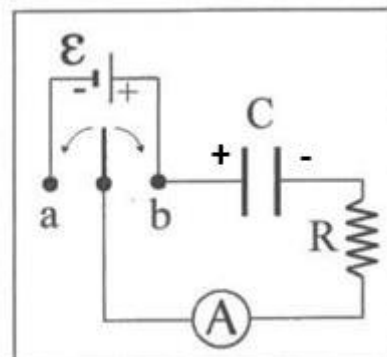


Figura 3.- Foto y esquema del circuito RC en serie que realizaremos en el laboratorio

En el proceso de carga del condensador, los elementos del circuito están conectados en serie a una fuente de alimentación de corriente continua, que suministra una diferencia de potencial constante \mathcal{E} . El condensador se va cargando hasta que la diferencia de potencial entre sus armaduras es igual a la tensión de la fuente. Una vez que el condensador está cargado, se desconecta de la fuente de alimentación (mediante el interruptor ab) y el circuito RC en serie se descarga a través de la resistencia R . Tanto en el proceso de carga y descarga del condensador mediremos con el amperímetro la intensidad de corriente del circuito en función del tiempo. Ni el proceso de carga ni el de descarga del condensador son instantáneos, requiriendo un tiempo que depende de los valores de R y C .

Inicialmente medimos la intensidad de corriente con el amperímetro a intervalos regulares de tiempo tanto para el proceso de carga como para el de descarga, utilizando los valores $R = 100 \text{ k}\Omega$, $\mathcal{E} = 12 \text{ V}$ y $C = 470 \text{ }\mu\text{F}$. Antes de realizar las medidas experimentales se debe calcular el valor máximo de la intensidad de corriente para elegir la escala adecuada del amperímetro y la constante de tiempo para elegir el intervalo de medidas de tiempos. Se deben de tomar lecturas en el instante inicial justo cuando se conecta la fuente de alimentación, y realizar medidas a intervalos regulares hasta que la intensidad de corriente sea menor del 1% de su valor inicial. Se realizarán también medidas para un condensador $C = 220 \text{ }\mu\text{F}$.

El proceso de descarga del condensador se realiza desconectando la fuente de alimentación con el interruptor de la caja de conexiones, midiendo la intensidad de corriente en función del tiempo (ver figura 3). Estas medidas nos permiten registrar la curva de la intensidad de corriente en los procesos de carga y de descarga del condensador en función del tiempo.

Cuando tenemos un circuito RC con la constante de tiempo muy pequeña es aconsejable automatizar el proceso de carga y descarga del condensador mediante un sensor para disminuir el error experimental. En este caso utilizaremos el sensor de voltaje Arduino, que es una placa basada en un microcontrolador que cuenta con un circuito integrado donde se pueden grabar instrucciones que interactúan con circuitos electrónicos. El Arduino cuenta con conexiones a cualquier periférico, en este caso a un puerto de salida USB para poder conectar a un ordenador y obtener los datos que se han procesado.

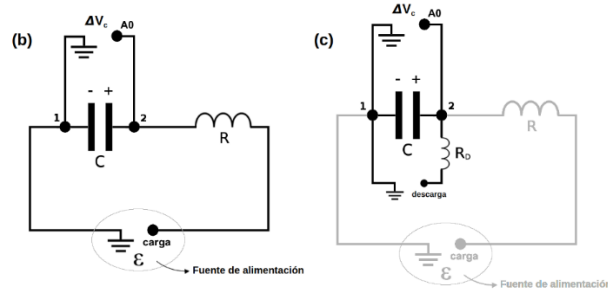


Figura 4.- Esquema del circuito de medida con un voltímetro, como hace el Arduino

Para medir la carga y descarga de un condensador con el Arduino hemos de tener en cuenta que se utiliza un voltímetro, no un amperímetro (como hemos realizado en el experimento de la figura 3), que medirá la diferencia de potencial del condensador en función del tiempo. Por tanto, el circuito que hemos de realizar será el que esquematizamos en la figura 4: La parte izquierda corresponde a la carga del condensador con una fuente de alimentación \mathcal{E} y la resistencia R en serie con el condensador C , y donde medimos la diferencia de potencial en el condensador colocando el voltímetro en paralelo. En la parte derecha se muestra la descarga del condensador, donde hemos desconectado la fuente de alimentación y la resistencia R (que aparece en gris en la figura) y hemos conectado la resistencia R_D a través de la cual se descarga el condensador, el voltímetro debe seguir en paralelo con el condensador.

En la realidad tenemos dentro de la caja azul del Arduino (que no podemos ver) una resistencia $R=100\text{ k}\Omega$ para la carga del condensador, una resistencia $R_D=100\text{ k}\Omega$ para la descarga del condensador, y un voltímetro ΔV_c , que debe de estar conectado en paralelo con el condensador. La fuente de alimentación del Arduino se la proporciona la conexión al ordenador. El polo positivo del condensador se ha de conectar con las conexiones **A0**, **carga** y **descarga** del Arduino, mientras que el polo negativo se debe de conectar a **tierra**. Como el Arduino es un sensor inteligente está programado para que inicialmente realice el proceso de carga del condensador, según el esquema de la derecha de la figura 5 y cuando el voltaje que pasa a través del condensador se satura (alcanza su valor máximo), automáticamente el Arduino realiza la conexión de la parte derecha de la figura 5 y comienza a realizarse la descarga del condensador. Tened en cuenta que las conexiones en gris de la figura 5 significa que no están conectadas.

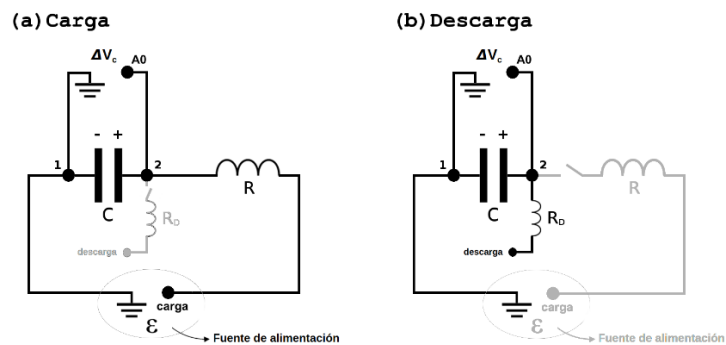


Figura 5.- Esquema del modo de funcionamiento del Arduino

Se realizarán medidas de la diferencia de potencial en función del tiempo para los procesos de carga y descarga para condensadores de capacidad $C = 10, 22, 100$ y $220\text{ }\mu\text{F}$. El puerto USB de cada Arduino se conectará al ordenador, donde se pondrá en marcha el icono de “carga y descarga”, que grabará y graficará la diferencia de potencial (en voltios) en función del tiempo (en segundos). Con este programa es posible variar el paso de tiempo (que se mide en segundos) donde se realizan las medidas por si estamos interesados en aumentar o disminuir el número de las mismas. Los datos también se pueden guardar en un pen o enviarlos por internet a vuestra cuenta.

IMPORTANTE: Cuando se está realizando el montaje del circuito, el Arduino debe de estar desconectado del ordenador por el puerto USB, ya que la fuente de alimentación del Arduino se la proporciona el ordenador, por lo tanto NO desconectar el Arduino del ordenador significa que tenemos conectada la fuente de alimentación. Cada vez que cambiemos el condensador hay que desconectar el Arduino del ordenador.

No se puede conectar el Arduino al ordenador y comenzar a realizar las medidas hasta que se haya terminado de montar completamente el circuito, y lo haya revisado un profesor. Para comenzar a realizar las medidas se debe de hacer click en el botón “inicio” de la aplicación de la práctica de “carga y descarga”. Este proceso es lento, así que hay que tener paciencia y NO darle muchas veces al botón de inicio del programa, ya que sería contraproducente.

RESULTADOS

Realiza una tabla y una representación gráfica con los valores de la intensidad de corriente del circuito RC en función del tiempo para los procesos de carga y descarga del condensador correspondiente al circuito con $R = 100 \text{ k}\Omega$, $\mathcal{E} = 12 \text{ V}$ y $C = 470 \text{ }\mu\text{F}$. Haz también medidas para un condensador de $220 \text{ }\mu\text{F}$.

Comprueba el comportamiento exponencial de la intensidad de corriente en función del tiempo. Decide la representación gráfica adecuada que debes de hacer para poder obtener la constante de tiempo τ del circuito y la intensidad inicial en el proceso de carga del condensador.

Calcula y representa el voltaje en el condensador en función del tiempo para el proceso de carga del condensador a partir de los datos medidos en este experimento.

Realiza las representaciones gráficas de los datos del voltaje V_c en el condensador en función del tiempo obtenidos con el sensor Arduino para los diferentes condensadores en los procesos de carga y descarga. Realiza la representación gráfica adecuada que te permita obtener la constante de tiempo como la pendiente de una recta. Compara los valores de τ obtenidos experimentalmente con su valor teórico.

Compara los resultados obtenidos para la constante de tiempo correspondiente al condensador de $220 \text{ }\mu\text{F}$ obtenidos mediante el amperímetro y el sensor Arduino.

Representa gráficamente los valores de la constante de tiempo que has obtenido a partir de tus medidas experimentales en función de la capacidad del condensador. Argumenta el tipo de curva debes de obtener, calcula su pendiente, y cuál es su significado físico, y compara el valor obtenido gráficamente con su valor teórico.

CUESTIONES

- 1.- Comenta el significado físico de la constante de tiempo. Demuestra que el producto RC tiene dimensiones de tiempo.
- 2.- Describe la influencia que existiría en las curvas características intensidad-voltaje de un condensador si se disminuye el valor de la resistencia de carga del circuito.
- 3.- ¿Qué sucede con la tensión del condensador en el proceso de descarga? ¿A qué crees que es debido? ¿Qué ocurriría si pusiésemos una resistencia de carga diez veces más pequeña? Justifica tus respuestas.
- 4.- Explica brevemente la causa física del proceso de descarga un condensador a través de la resistencia. ¿Qué sucedería si el circuito fuera superconductor?