

Prática 3: CAPACITORES

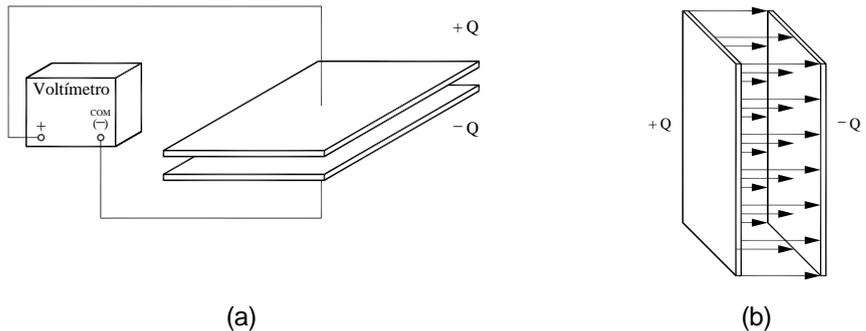
Objetivos

Quando uma tensão é aplicada a um capacitor ele não se carrega instantaneamente, mas tem uma resposta temporal característica. Analogamente, o capacitor carregado tem uma curva de descarga característica. Nesta prática serão utilizados fonte de tensão, capacitores e resistores (ou lâmpadas) para estudar o processo de carga e descarga de um circuito **RC** através de diversos experimentos qualitativos. A curva de *decaimento* da tensão de um capacitor $V_C(t)$ será medida e através dela, o valor da constante de tempo do circuito será determinado.

Introdução

Ao longo da história da eletricidade percebeu-se que era relativamente fácil obter grandes diferenças de potencial, por exemplo, através de eletrização por atrito. O problema era conseguir grande quantidade de carga e armazená-la. Percebeu-se que quando um condutor era eletrificado, seu tamanho determinava a quantidade de carga que ele conseguia armazenar. O físico italiano **Alessandro Volta**, denominou assim **condensador** qualquer dispositivo capaz de armazenar cargas. Atualmente o termo capacitor é mais utilizado.

Figura 1.1 - (a) Capacitor de placas paralelas ligado a um voltímetro; (b) Distribuição de cargas nas placas do capacitor



Fonte: Elaborada pelo Compilador

A uma determinada diferença de potencial (V), como esquematizado na Fig.3.1((a) e (b)) a quantidade de carga (Q) armazenada por um corpo depende de diversas características físicas, mas Q é proporcional a V . Ou seja, podemos definir a capacitância (C) como:

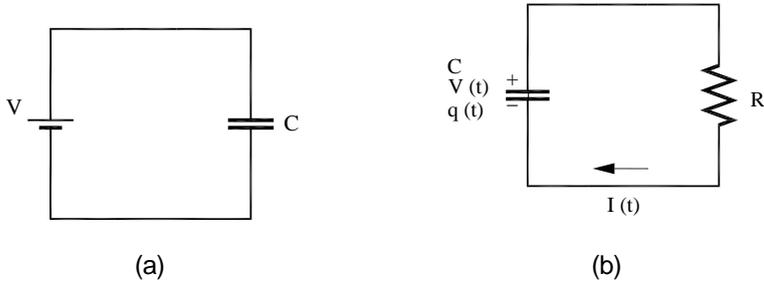
$$C = \frac{Q}{V} \quad (1)$$

No sistema MKS, a unidade de capacitância é Coulomb/Volt, que se denominou **Farad**, em homenagem ao cientista **M. Faraday**. **Volta** introduziu o termo capacidade elétrica em analogia com o conceito de capacidade térmica ou calor específico.

Descarga de um Condensador

Para determinarmos a capacitância de um condensador, C , faremos um experimento que consiste em carregar o mesmo com uma tensão inicial V . Isto é feito ligando-se o capacitor em paralelo a uma fonte, (Fig. 3.2(a)).

Figura 1.2 - a) Circuito para carregar o condensador; (b) Descarga do condensador em uma resistência **R**



Fonte: Elaborada pelo Compilador

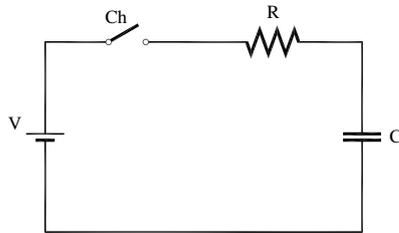
A Fig.3.2(b) ilustra que quando este capacitor carregado é ligado a um resistor, ele é descarregado pela corrente $I(t)$, ou seja, à medida que sua carga $Q(t)$ diminui a tensão no capacitor $V_c(t)$ diminui proporcionalmente a $Q(t)$. Pode-se mostrar que:

$$V(t) = V \cdot \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \quad \text{onde } \tau = RC \quad (2)$$

O decaimento da tensão no capacitor é exponencial, com tempo de resposta $\tau = RC$. Ou seja, em $t = \tau$, temos $V_c(\tau) \sim 0.37V$. No entanto é mais prático usar $t_{1/3}$ definido por $t_{1/3} = \tau \cdot \ln 3 \sim 1.10\tau$ e $V_c(t_{1/3}) = V/3$. Logo, medindo experimentalmente $V_c(t_{1/3})$, podemos determinar o valor de RC a partir da Eq.2. Nesta prática vocês irão calcular o valor da capacitância do capacitor através da medida da resposta temporal de $V_c(t_{1/3})$.

Nesta prática vamos estudar, também, o caso em que um capacitor, inicialmente descarregado, é conectado em série a uma fonte (tensão V) e a um resistor (R) (Fig.3.3).

Figura 1.3 - Circuito RC



Fonte: Elaborada pelo Compilador

Neste caso, se a chave **Ch** é fechada em **t = 0**, pode-se mostrar que a tensão no capacitor é dada por:

$$V(t) = V \left[1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \quad (3)$$

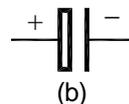
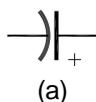
Experimentos

I. Circuito RC Simples

ATENÇÃO: Nesta prática utilizaremos capacitores que devem ser colocados na polarização correta onde uma faixa indica o terminal negativo.

Usaremos a notação ilustrada na Figura 3.4(b), onde a placa + representa a placa positiva e a outra a negativa (-).

Figura 1.4 – Notação utilizada para capacitores (a) eletrolíticos e (b) supercapacitores



Fonte: Elaborada pelo Compilador

Para não se confundirem sugerimos o uso de um cabo vermelho ligado ao terminal positivo (+) e um cabo preto ligado ao terminal negativo (-)

Obs: a placa (+) está indicada pela cor vermelha

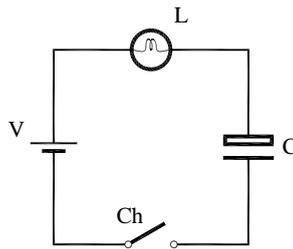
CUIDADO –

- montagem do capacitor com polaridade invertida pode danificá-lo.
- o capacitor não pode ser ligado a uma tensão maior V_0 .

I.1 Previsão: Um capacitor está conectado em série a lâmpada e a uma fonte de tensão contínua (de valor $V_0 = 10V$), tal como ilustrado na Fig.3.5. Suponham que o circuito tenha sido ligado há muito tempo, ou seja, o estado

estacionário já foi atingido. Respondam por escrito: como será o brilho da lâmpada?

Figura 1.5 - Circuito com uma lâmpada em série com um capacitor



Fonte: Elaborada pelo Compilador

I.2 Experimento. Montem o circuito da Fig.3.5 com a fonte ajustada para $V_0 = 10V$. No estado estacionário (após o transiente) meçam as tensões na Fonte (V), no Capacitor (V_C) e na Lâmpada (V_L).

Obs: *Por motivos técnicos, optamos por usar dois capacitores em série ao invés de um único capacitor. Entretanto, este fato não altera a interpretação do experimento.*

I.3 Lembrando que $Q = C.V_c$, onde Q representa a carga armazenada no capacitor, C é a capacitância e V_c o valor da tensão no capacitor. Usando o valor de $C \sim 0,05F$, estimem o valor de Q .

Removam o capacitor do circuito da parte **I.2** (tomem o cuidado para não curto-circuitar o capacitor).

I.4 Previsão: Qual deve ser o valor da tensão no capacitor?

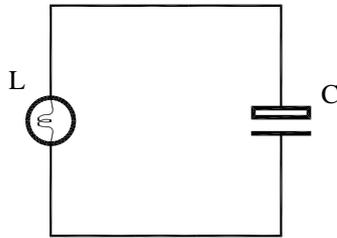
I.5 Experimento: Verifiquem, experimentalmente, com o auxílio do voltímetro digital, se seu prognóstico estava correto.

I.6 Será que vocês conseguem acender a lâmpada usando somente o capacitor, sem usar a fonte? Tentem isto experimentalmente e anotem o diagrama do circuito usado. Por fim, meçam o valor da tensão no capacitor. Expliquem o que ocorreu.

II. Carga e Descarga de Capacitores

ATENÇÃO: *Antes de montar o próximo experimento, descarreguem o capacitor. Para isso montem um circuito (Fig.3.6) com apenas o capacitor ligado uma lâmpada, em paralelo. Quando se descarrega o capacitor com um “curto circuito”, o valor da corrente pode ser muito alto podendo danificar o capacitor.*

Figura 1.6 - Circuito para descarregar um capacitor

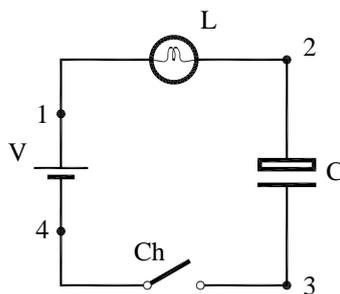


Fonte: Elaborada pelo Compilador

Experimento: Montem o circuito da Fig.3.7. Vocês vão repetir o experimento anterior, mas agora prestando mais atenção na resposta transiente do circuito, ou seja, em como o brilho da lâmpada evolui no tempo, após a chave ser fechada.

Obs: Verifiquem se polaridade do capacitor está correta assim como o valor de V_0 .

Figura 1.7 - Circuito com uma lâmpada em série com um capacitor



Fonte: Elaborada pelo Compilador

II.1 Previsão: Esbocem o gráfico da dependência temporal do brilho da lâmpada.

II.2 Sem utilizar o voltímetro, ou seja, baseando-se apenas através de suas observações visuais, respondam qual o valor de V_C (V_{23}) nos seguintes casos:

a) imediatamente após a chave ser fechada ($t \sim 0$);

b) muito tempo após a chave ter sido fechada ($t \rightarrow \infty$).

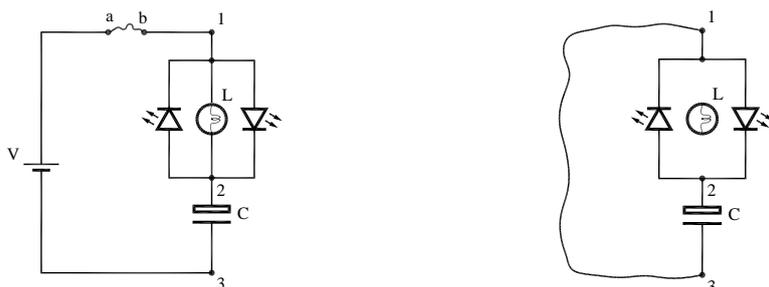
II.3 Esbocem a dependência temporal de V_L (a tensão na lâmpada, V_{12}), V_C (a tensão no capacitor, V_{23}), Q (carga no capacitor) e da corrente $I(t)$.

Antes de iniciar o experimento a seguir, mostrem seus resultados a um instrutor.

Previsões: registrem por escrito as suas previsões e/ou do grupo e justificativas.

Verificando o sentido da corrente o circuito da Fig.3.8 com o capacitor inicialmente descarregado.

Figura 1.8 - Circuito com uma lâmpada em série com um capacitor



(a)

(b)

Fonte: Elaborada pelo Compilador

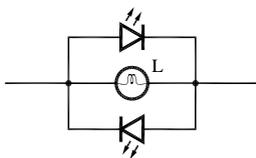
II.4 Qual o sentido da corrente quando a chave (**Ch**) é colocada na posição **a**?

II.5 Comparem o sentido da corrente nos pontos **1, 2 e 3** do circuito.

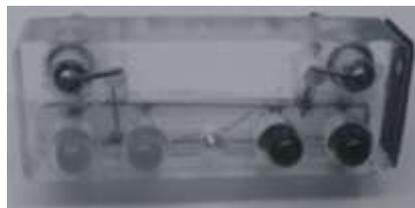
II.6 Suponham que após o sistema atingir o estado estacionário, a chave seja colocada na posição **b**. Para este instante, prevejam o sentido da corrente, nos pontos **1, 2 e 3**.

Na Fig.3.9 temos uma associação em paralelo de dois LEDs de cores diferentes, com polaridades contrárias (antiparalelos). Na prática **2**, vimos que esta configuração pode ser usada para indicar a direção da corrente

Figura 1.9 – (a) Circuito com dois LEDs em paralelo e invertidos ligados em série com uma lâmpada, (b) Foto da montagem dos dois LEDs com a lâmpada, .



(a)



(b)

Fonte: Elaborada pelo Compilador

II.7 Experimento: Montem o circuito (Fig.3.8) inserindo o conjunto de LEDs, no lugar da lâmpada. Verifiquem o sentido da corrente (nos pontos **1**, **2** ou **3**) quando o capacitor é carregado (chave na posição **a**). O sentido é o mesmo?

Obs.: *os LEDs podem ser inseridos nos pontos **1**, **2** ou **3**.*

II.8 Observem agora o caso em que o capacitor é descarregado (chave na posição **b**). Registrem os resultados.

Neste ponto é muito importante que o grupo analise e discuta os resultados. Depois discuta suas conclusões com um instrutor antes de prosseguir a prática.

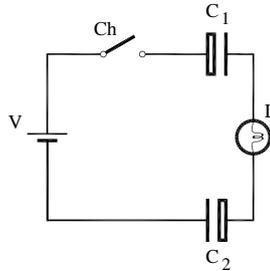
Obs.: *Se desejarem repetir o experimento lembrem-se de descarregar o capacitor através de uma lâmpada.*

III. Lâmpada entre Dois Capacitores

III.1 Previsão: Uma lâmpada é conectada a dois capacitores, inicialmente descarregados, como ilustrado na Fig.3.10. A respeito deste circuito um estudante fez o seguinte prognóstico:

“A corrente irá fluir do lado positivo da bateria para o lado negativo. Uma vez que a lâmpada está isolada da bateria por dois capacitores, a lâmpada não irá acender (ou brilhar)”.

Figura 1.10 - Circuito com uma lâmpada em série com dois capacitores



Fonte: Elaborada pelo Compilador

Vocês concordam com este prognóstico? Discutam e registrem por escrito a justificativa.

Experimento: Montem o experimento com **2** capacitores descarregados e $V_0 \sim 10V$. **Sem o usar o voltímetro** respondam, logo após a chave ser fechada ($t \sim 0$):

III.2 Qual a tensão na lâmpada? (**Obs.:** *Observe o brilho da lâmpada*)

III.3 Qual a diferença de potencial nos capacitores?

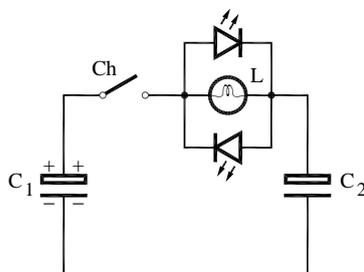
III.4 Respondam novamente as mesmas perguntas **III.2** e **III.3** para o estado estacionário (muito tempo após a chave ter sido fechada, $t \rightarrow \infty$).

III.5 Com os capacitores descarregados, substituam a lâmpada pelo conjunto de LEDs, no circuito da Figura 3.10 e verifiquem o sentido da corrente usando a dupla de LEDs (Fig.3.9(a))

IV. Conservação da Carga e Energia

A Fig.3.11 ilustra um circuito onde inicialmente o capacitor, C_1 , está carregado e o capacitor, C_2 , está inicialmente descarregado, ou seja, $V_{C_1}(0) = V_0$ e $V_{C_2}(0) = 0$.

Figura 1.11 - Circuito de uma lâmpada em série com dois capacitores, um carregado e outro descarregado



Fonte: Elaborada pelo Compilador

IV.1 Previsões: registrem por escrito as suas previsões e/ou do grupo e justificativas.

O que ocorrerá quando a chave for fechada? A lâmpada vai acender? Como será o comportamento da corrente, $I(t)$, e das cargas, $Q_1(t)$ e $Q_2(t)$, dos capacitores C_1 e C_2 , respectivamente?

IV.2 Experimento: Façam o experimento, com C_1 carregado ($V_{C1} = 10V$) e C_2 descarregado. Montem o circuito tal como ilustrado na Fig.3.11, ou seja, a placa negativa de C_1 ligada à placa negativa de C_2 . Logo em $t = 0$, $V_{C1} \sim 10V$ e $V_{C2} \sim 0V$. Registrem suas observações e comparem a previsão (não é preciso usar o voltímetro).

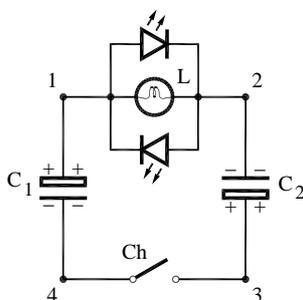
Nota: Para carregar o capacitor, basta fazer novamente o que é solicitado na Atividade I (Circuito RC Simples), fechando a chave.

IV.3 No estado estacionário ainda há carga nos capacitores? Como você pode verificar este fato experimentalmente?

obs: no vídeo fizemos o experimento carregando C_1 com tensão $V_o = 5,5 V$. No vídeo isto não ficou claro, no estado estacionário medimos $V_{C2} \sim V_{C1} = 2.7 V \sim V_o/2$.

A Fig.3.12 ilustra o caso em que dois capacitores foram carregados simultaneamente, de tal forma que $V_{C1} = V_{C2} \sim 10V$.

Figura 1.12 - Circuito de uma lâmpada em série com dois capacitores carregados



Fonte: Elaborada pelo Compilador

IV.4 Previsões: registrem por escrito as suas previsões e/ou do grupo e justificativas. O que ocorrerá? Discutam e façam um prognóstico análogo ao do item **IV.1**.

IV.5 Experimento: Realizar o experimento e discutir (análogo aos itens **IV.2** e **IV.3**).

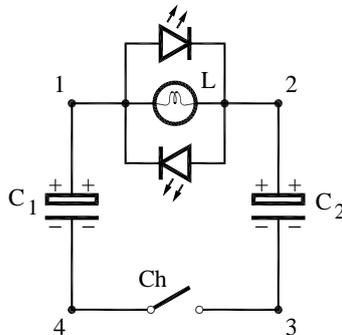
obs: no vídeo os dois capacitores foram inicialmente carregados com a mesma tensão $V_o = 5,5 \text{ V}$. Depois o capacitor C_2 é invertido de tal forma que em $t = 0$ (quando a chave é fechada) temos $V_{C_1} \sim + V_o$ e $V_{C_2} \sim - V_o$. Após a ligação, a carga dos dois capacitores diminui (em módulo) de tal forma no estado estacionário ambos estão descarregados ($V_{C_1} \sim V_{C_2} \sim 0$).

IV.6 Em qual dos experimentos (**IV.2** (Fig.3.11), ou **IV.5** (Fig.3.12)) a lâmpada brilha mais? Expliquem por que.

No vídeo isto não fica claro (os LEDs atrapalham um pouco). Fazendo o experimento somente com a lâmpada (sem os LEDs em paralelo) fica claro que o brilho inicial da lâmpada é maior no caso da Fig.3.12 comparado ao caso da Fig. 3.11.

IV.7 Previsões: Repetir o item **IV.4** na configuração ilustrada na Fig.3.13, com dois capacitores inicialmente carregados ($V_{C_1} = V_{C_2} \sim 10\text{V}$).

Figura 1.13 - Circuito de uma lâmpada em série com dois capacitores carregados



Fonte: Elaborada pelo Compilador

IV.8 Experimento: realizar o experimento e discutir (análogo aos itens **IV.2 e IV.3**).

obs: no vídeo os dois capacitores foram carregados com a mesma tensão $V_0 = 5,5 \text{ V}$. Após a chave ser fechada, a tensão permanece aproximadamente a mesma e não se observa corrente nos LEDs.

IV.9 Para o Relatório:

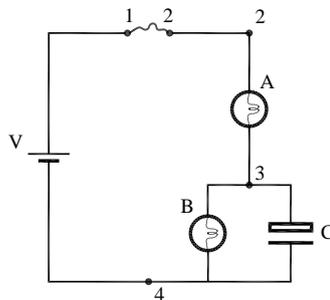
a) Suponha que os capacitores sejam idênticos, com capacitância $C = 0,05\text{F}$, a lâmpada se comporte como um resistor de valor $R = 10\Omega$ e desconsidere os LEDs. Para o circuito da Fig.3.11, calcule o valor da energia total armazenada nos dois capacitores em $t = 0$ e $t \rightarrow \infty$. Há conservação da carga, ou seja, a carga total inicial é igual a carga final? Há conservação da Energia? Qual o valor da energia dissipada na lâmpada?

b) Item para os circuitos das Fig.3.12 e Fig.3.13.

V. Capacitor em Paralelo com uma Lâmpada

Duas lâmpadas idênticas e um capacitor (inicialmente descarregado) são conectados a uma fonte ideal tal como ilustrado na Fig.3.14.

Figura 1.14 - Circuito de uma lâmpada em série com um circuito em paralelo formado por uma lâmpada e um capacitor



Fonte: Elaborada pelo Compilador

V.1 Previsões: registrem por escrito as suas previsões e/ou do grupo e justificativas.

Como se comportará o brilho das lâmpadas (**A** e **B**) quando os pontos **a** e **b** estiverem ligados por um fio em $t \sim 0$? Alguma das lâmpadas estará apagada (brilho nulo) em $t \sim 0$?

V.2 Experimento: montem o experimento com $V_0 \sim 10V$. Observem e discutam o que acontece nas situações $t \sim 0$ e $t \rightarrow \infty$ (estado estacionário).

Obs.: *NÃO* utilizem o voltímetro, ou seja, respondam somente a partir de suas observações visuais.

Logo após ($t \sim 0$) a chave ser fechada, respondam:

V.3 Qual o valor da diferença de potencial na lâmpada **A** (V_A), na lâmpada **B** (V_B), no capacitor (V_C), e na bateria (V_0)? Explique.

V.4 Classifiquem (maior, menor ou igual) as correntes nas lâmpadas (I_A , I_B) no capacitor (I_C) e na bateria (I_0).

Muito tempo após ($t \rightarrow \infty$) a chave ser fechada, respondam:

V.5 Classifiquem as correntes I_A , I_B , I_C e I_0 . Se alguma corrente for nula, indiquem explicitamente.

V.6 Classifiquem (comparem) os valores das tensões V_A , V_B , V_C , V_0 . Expliquem.

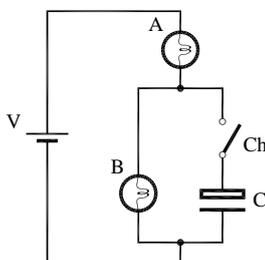
V.7 Sumarizem seus resultados descrevendo o comportamento transiente (brilho) das lâmpadas **A** e **B**.

V.8 Para o Relatório:

- a) Supondo que $V_0 = 10V$, escrevam o valor de todas as tensões (V_A , V_B e V_C) em $t=0$ e verifiquem a validade da segunda lei de Kirchhoff (lei das tensões).
- b) Idem para $t \rightarrow \infty$.
- c) Suponha que as duas lâmpadas se comportem como resistores de resistência, $R = 10\Omega$, de tal modo que as correntes sejam dadas por $I_A = V_A/R$ e $I_B = V_B/R$. Obtenham o valor de todas as correntes (I_0 , I_A , I_B e I_C) em $t = 0$ e verifiquem a validade da 1ª lei de Kirchhoff (lei das correntes).
- d) Idem para $t \rightarrow \infty$.

Considerem agora o caso em que a chave é) colocada **em série** com o capacitor (descarregado), como ilustrado na Fig.3.15.

Figura 1.15 - Circuito de uma lâmpada em série com um circuito em paralelo formado por uma lâmpada e um capacitor



Fonte: Elaborada pelo Compilador

V.9 Previsão: o que ocorre com o brilho das lâmpadas se, após a chave for fechada?

V.10 Experimento: Montem o experimento com $V_0 \sim 10V$ e verifiquem experimentalmente se suas previsões estavam corretas.

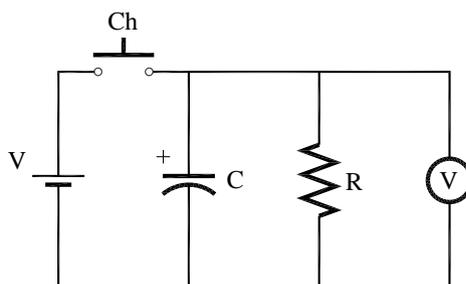
Obs.: *Certifiquem-se que o capacitor esteja inicialmente descarregado.*

VI. Medida Quantitativa da Constante de Tempo RC

VI.1 Montem o circuito da Fig.3.16 utilizando um voltímetro digital, $R = 220k\Omega$ e $C = 100\mu F$. Ajustem a fonte para $V_0 = 10V$. Com a chave **Ch** fechada leiam a tensão no voltímetro. Desliguem a chave **Ch** e observem a variação temporal da tensão sobre o capacitor que se descarrega pela resistência **R**.

Obs: Este experimento deve ser feito com um capacitor eletrolítico.

Figura 1.16 - Circuito RC em paralelo ligado a um Voltímetro



Fonte: Elaborada pelo Compilador

VI.2 Construam uma tabela dos valores da tensão $V_C(t)$ em função do tempo de descarga, medindo o tempo com um cronômetro. O cronômetro deve ser inicializado ($t=0$) quando, após ser carregado a chave é aberta e o capacitor é

descarregado. (**Obs:** *Aqui, você pode ser utilizado o celular para filmar o cronômetro e o voltímetro, ou mesmo utilizar o tempo de gravação do próprio vídeo para facilitar a coleta de dados*).

t	V_c(t)		

O estudante deve utilizar a escala de tempo do vídeo para fazer as medidas, ou seja, fazer sucessivos pause

VI.3 Façam um gráfico em papel *monolog* de **V_c(t)** contra **t**, e determinem o valor da constante de tempo do circuito **$\tau = RC$** , pelo gráfico. (**Obs:** *se o papel for di-log, usar apenas 1 ciclo da folha*)

Façam o gráfico em algum programa e façam o ajuste com uma função decaimento exponencial.

VI.4 Meçam o valor de **R** com um multímetro. Usando este valor, calculem o valor de **C**. Compare com o valor determinado pelo técnico do laboratório. Discutam o resultado obtido. A diferença entre estes dois valores está dentro da incerteza estimada para o valor de **τ** ?

valor medido **R = 221 K Ω**

VI.5 Usando os mesmos valores de **R** e **C** do experimento anterior, meçam o tempo t^* necessário para que a carga do capacitor se reduza a metade do seu valor inicial. Notem que $V(t^*) = V/2$, logo vocês podem usar a Eq. 5 para estimarem o valor de $\tau = RC$ a partir de t^* . Estimem o valor de t e comparem com sua determinação mais cuidadosa feita através do gráfico. Discutam os resultados.

Vocês podem fazer isto usando o recurso pause no vídeo. Não é necessário pegar o tempo em que a tensão cai por um fator 2, pode ser qualquer valor.

VI.6 Repitam o item **VI.5** mudando os valores de **C** e/ou **R**.

Vcs podem estimar o tempo de decaimento do circuito com capacitor de 2200 μF , medindo o tempo que demora para a tensão cair para $\sim 9\text{ V}$.

Lista de materiais (prática 03)

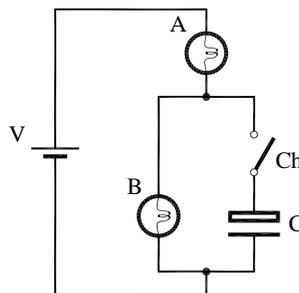
- 2 Supercapacitores (0,1F e $V_{\text{max}} = 5,5\text{V}$)
- 2 conjuntos de 2 capacitores em série ($C_{\text{eq}} \sim 0,05\text{F}$, $V_{\text{max}} = 11\text{V}$)
- 2 lâmpadas incandescentes (6V)
- 2 LEDs invertidos (conjunto indicador de corrente)
- Resistor de $220\text{K}\Omega$
- Capacitor eletrolítico $C = 100\ \mu\text{F}$
- Fonte de tensão variável
- 1 chave
- Placa de circuitos, cabos banana – banana, etc.

Exercícios

1)

a) Duas lâmpadas idênticas e um capacitor (inicialmente descarregado) de capacitância $C = 0.1F$, são conectados a uma bateria ideal (com tensão $V_0 = 10V$) tal como ilustrado na Figura ao lado.

Logo após a chave ser fechada ($t \sim 0$):



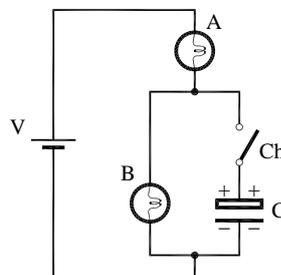
i) descreva o que observou em relação ao brilho das lâmpadas **A** e **B**.

ii) Qual o valor da diferença de potencial na lâmpada **A** (V_A), na lâmpada **B** (V_B), no capacitor (V_C)?

iii) Como uma primeira aproximação, considere que a lâmpada se comporta como um resistor ôhmico, com resistência efetiva de valor $R = 100\Omega$. Em $t \sim 0$, calcule os valores das tensões V_A , V_B e V_C ; e correntes I_0 (da bateria), I_A , I_B e I_C .

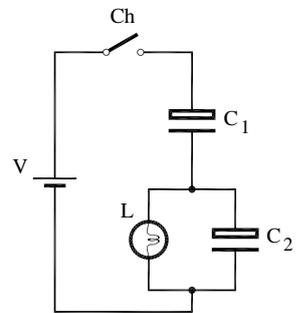
iv) repita o item (iii) no caso $t \rightarrow \infty$, ou seja, muito tempo após a chave ser fechada quando o estado estacionário é atingido.

b) considere agora o caso em que inicialmente ($t \sim 0$) o capacitor está carregado com tensão $V_C(t \sim 0) = V_0$. Repita todo o problema a) considerando esta situação.



2) Faça um prognóstico detalhado (de modo análogo ao feito no exercício 1) sobre o comportamento do circuito ao lado, supondo que inicialmente os dois capacitores estejam inicialmente descarregados e que as capacitâncias sejam iguais ($C_1 = C_2 = C$).

Dica – notem que em $t = 0$ a corrente é infinita



a) ,

