Exp. 6B
Circuito RC em corrente alternada

FSC5143 - Laboratório de Física III

lemo.ufsc.br
Versão de 17 de novembro de 2020

1 Objetivos

Neste experimento, observaremos o comportamento do circuito RC (associação em série de um resistor (R) e um capacitor (C)) alimentado por uma fonte de tensão e corrente alternadas, como mostra a Figura 1. Os objetivos principais são:

- Medir tensões no circuito RC;
- Construir o diagrama de tensões do circuito;
- Estudar o comportamento do circuito conforme variação da frequência da fonte: circuito passa-baixa ou circuito passa-alta?

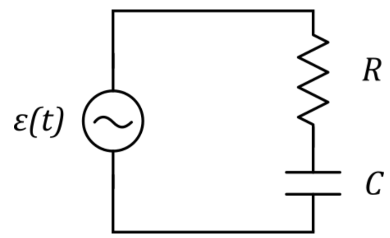


Figura 1 Circuito RC alimentado por uma fonte de tensão de alternada $\varepsilon(t)$ de frequência angular ω, a qual pode ser variada.

2 Introdução à tensão/corrente alternada

Tensão alternada é aquela que varia periodicamente no tempo, oscilando tipicamente entre valores positivos e negativos. Trataremos aqui do tipo mais simples de oscilação: a senoidal/cossenoidal. Essa oscilação tem uma amplitude, representada aqui por V_m (tensão máxima), uma frequência angular $\omega = 2\pi f$ bem definida e uma fase ϕ:

$$V(t) = V_m \cos(\omega t + \phi). \tag{1}$$

Nas situações com as quais trabalharemos aqui, ao alimentar um circuito com uma tensão de frequência angular ω, a corrente também oscilará com a mesma frequência (mas possivelmente com uma fase distinta):

$$I(t) = I_m \cos(\omega t + \phi'). \tag{2}$$

Isto só não ocorrerá em situações em que há correntes transientes (por exemplo, logo após ligar ou desligar o circuito) ou efeitos de eletrônica não linear, o que sai do escopo desta disciplina.

2.1 Tensão eficaz e corrente eficaz

Geralmente, os voltímetros e amperímetros configurados para tensão/corrente alternada mostram na tela o valor da tensão eficaz ou da corrente eficaz, ao invés da tensão máxima V_m e da corrente máxima I_m.

Conceitualmente, o *valor eficaz* de uma corrente alternada é o valor da corrente contínua necessária para dissipar a mesma quantidade de calor que a corrente alternada numa dada resistência ôhmica e num mesmo intervalo de tempo. Matematicamente, o valor eficaz é a *raiz do valor quadrático médio* da corrente, o que pode ser escrito da seguinte forma (o mesmo se aplicando à tensão):

$$I_{rms} = \sqrt{\overline{I^2(t)}} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T I^2(t)\,dt} \quad \text{e} \quad V_{rms} = \sqrt{\overline{V^2(t)}} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T V^2(t)\,dt}, \tag{3}$$

onde o símbolo $\overline{A(t)}$ denota média temporal de uma grandeza $A(t)$ e $T = 1/f = 2\pi/\omega$ é o período de oscilação da corrente alternada. O subscrito *rms* faz referência ao termo em língua inglesa *root mean square*. É comum chamar o valor eficaz de *valor RMS*.

No caso de uma corrente cossenoidal, como a descrita pela equação (2), é fácil calcular a integral acima. Se você o fizer, notará que o resultado depende apenas do valor máximo da corrente, I_m, o mesmo valendo para a tensão:

$$I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad \text{e} \quad V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}. \tag{4}$$

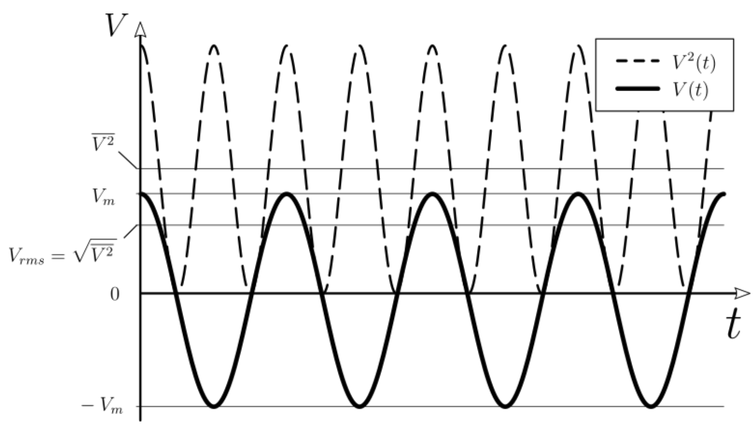


Figura 2 Interpretação gráfica do valor RMS, que vale a amplitude dividida por $\sqrt{2}$.

2.2 Notação complexa

Grandezas oscilantes como a tensão da equação (1) podem ser representadas com um tipo de notação que usa números complexos, a qual chamamos aqui de *notação complexa*. Essa notação é útil tanto na visualização de resultados quanto na resolução de equações diferenciais. Então, embora seja estranho falar de números complexos para representar tensões elétricas, esta é uma notação que nos facilitará a vida!

A notação complexa se baseia na fórmula de Euler:

$$\mathrm{e}^{\mathrm{i}\theta} = \cos\theta + \mathrm{i}\,\mathrm{sen}\,\theta\,, \tag{5}$$

que relaciona funções trigonométricas à função exponencial. Nesta equação, $\mathrm{i} = \sqrt{-1}$ é o número imaginário.

De acordo com a fórmula de Euler, a parte real da exponencial complexa é a função cosseno: $\cos\theta = \mathrm{Re}\{\mathrm{e}^{\mathrm{i}\theta}\}$. Graças a essa propriedade, podemos reescrever a equação (1) como

$$V(t) = \mathrm{Re}\{\tilde{V}(t)\}\,, \quad \text{com} \quad \tilde{V}(t) = V_m\,\mathrm{e}^{\mathrm{i}\,(\omega t+\phi)}, \tag{6}$$

onde $\tilde{V}(t)$ é a representação complexa da tensão oscilante $V(t)$. Baseando-se na equação acima, podemos ainda escrever

$$\tilde{V}(t) = \overline{V}\,\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t}\,, \quad \text{com} \quad \overline{V} = V_m\,\mathrm{e}^{\mathrm{i}\phi}, \tag{7}$$

onde $\overline{V}$ é a chamada *amplitude complexa* da tensão, que é um número complexo com módulo V_m e argumento ϕ. Note que o módulo de $\overline{V}$ corresponde à amplitude de oscilação da tensão e seu argumento é a fase dessa mesma oscilação.

Se representados no plano complexo, $\overline{V}$ é um ponto fixo e $\tilde{V}(t)$ é um ponto que descreve uma trajetória circular com frequência angular ω partindo de $overlineV$ em $t = 0$.

O mesma notação pode ser usada para descrever o comportamento da corrente, tal qual descrita pela equação (2).

$$I(t) = \mathrm{Re}\{\tilde{I}(t)\} = \mathrm{Re}\{\bar{I}\,\mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t}\}, \tag{8}$$

onde $\bar{I} = I_m\,\mathrm{e}^{\mathrm{i}\phi'}$.

Sem perda de generalidade, nós adotamos daqui em diante a convenção de que a oscilação de corrente serve como referência de fase, ou seja,

$$\boxed{\phi' \equiv 0}\,. \tag{9}$$

Deste modo, o valor da fase ϕ da tensão, sozinho, nos dirá se a oscilação de tensão está adiantada ou atrasada em relação à oscilação de corrente. Se $\phi > 0$, a tensão está adiantada; se $\phi < 0$, ela está atrasada.

Impedância: Resistência e Reatância

Em corrente alternada, é possível generalizar o conceito de resistência dividindo a amplitude complexa da tensão pela da corrente, obtendo o que chamamos de *impedância*:

$$Z = \frac{\overline{V}}{\overline{I}} = \frac{V_m\,\mathrm{e}^{\mathrm{i}\phi}}{I_m\,\mathrm{e}^{\mathrm{i}\phi'}} = \frac{V_m}{I_m}\,\mathrm{e}^{\mathrm{i}\phi}, \tag{10}$$

onde adotamos a convenção mencionada acima de que $\phi' = 0$.

O módulo de Z é a razão entre as amplitudes da tensão e da corrente: $|Z| = V_m/I_m$ e seu argumento (ou fase) ϕ é a fase da tensão, que acusa se esta está adiantada ou atrasada em relação à corrente, como já comentado.

Assim como para todo número complexo, existe a *forma polar* e a *forma cartesiana* de escrever a impedância:

$$\text{Forma polar:} \quad Z = |Z|\,\mathrm{e}^{\mathrm{i}\phi}, \tag{11}$$

$$\text{Forma cartesiana:} \quad Z = R + \mathrm{i}X. \tag{12}$$

A forma cartesiana evidencia as partes real e imaginária do número complexo. A parte real da impedância é a *resistência*, enquanto a parte imaginária é chamada de *reatância*, que tipicamente surge no circuito quando há capacitor e/ou indutor. R e X são grandezas reais e mensuráveis num circuito de corrente alternada. $|Z|$ e ϕ, também. O módulo de Z pode ser escrito em termos de R e X como

$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2}. \tag{13}$$

3 Teoria Básica

3.1 Dinâmica do circuito RC

Na experiência em que estudamos a carga e a descarga de um capacitor, vimos que, enquanto a tensão num resistor ôhmico é diretamente proporcional à corrente que o percorre, a tensão no capacitor é diretamente proporcional à carga acumulada nas suas placas.

Componente	Propriedade	Unidade (SI)	Tensão
Capacitor	capacitância (C)	farad (F)	$V_C = \frac{1}{C}Q$
Resistor	resistência (R)	ohm (Ω)	$V_R = R\frac{dQ}{dt} = RI$

Tabela 1 *A tensão em cada um dos componentes do circuito RC, expressa em termos da carga acumulada no capacitor, Q, cuja derivada temporal dQ/dt é a corrente elétrica I.*

Iniciamos a modelagem matemática do circuito RC da Fig. 1 aplicando a segunda lei de Kirchhoff (lei das malhas) à única malha do circuito:

$$V_R(t) + V_C(t) = \varepsilon(t) \tag{14}$$

onde $V_R(t)$ e $V_C(t)$ são as tensões no resistor e no capacitor, que variam a cada instante de tempo. A tensão aplicada, portanto, se distribui entre os dois componentes de tal forma que a soma $V_R(t) + V_C(t)$ é sempre igual à tensão da fonte $\varepsilon(t)$, qualquer que seja o instante de tempo considerado.

A tensão da fonte, por sua vez, pode ser escrita como:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_m \cos(\omega t + \phi), \tag{15}$$

onde ϕ é uma fase que deverá ser escolhida *a posteriori* de tal modo que a fase da oscilação **da corrente** fique nula, conforme a convenção (9) mencionada na seção anterior. Vejamos, na sequência, como fazer isso.

Inserindo, na equação (14) acima, as tensões V_R e V_C da Tabela 1, chega-se numa equação diferencial para a carga Q do capacitor:

$$Q'(t) + \frac{Q(t)}{RC} = \frac{\varepsilon_m}{R} \cos(\omega t + \phi), \tag{16}$$

em que $Q'(t)$ representa a derivada temporal de Q.

Ao resolver essa equação, encontra-se a carga do capacitor em função do tempo, $Q(t)$. O(A) aluno(a) interessado(a) em se aprofundar, pode encontrar os métodos de resolução e cálculos similares nas referências fornecidas de livros de Física Básica. Para a realização deste experimento, focamos na solução puramente oscilatória (sem transientes de tensão ou de corrente). O resultado é:

$$Q(t) = Q_m \cos(\omega t + \phi - \varphi), \tag{17}$$

onde

$$Q_m = \frac{\varepsilon_m C}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \quad \text{e} \quad \varphi = \mathrm{tg}^{-1}(\omega RC). \tag{18}$$

Para obter a corrente $I(t)$, basta tomar a derivada da equação (17), levando em conta as expressões (18). Resulta o seguinte:

$$I(t) = \frac{dQ(t)}{dt} = I_m \cos(\omega t + \phi - \varphi + \pi/2), \tag{19}$$

onde

$$I_m = \frac{\varepsilon_m \omega C}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}. \tag{20}$$

Impondo que a fase da corrente seja nula, ou seja, que $\phi - \varphi + \pi/2 = 0$, obtemos o resultado final, sumarizado abaixo:

$$\boxed{\begin{aligned} I(t) &= I_m \cos(\omega t) && \text{(21a)} \\ Q(t) &= Q_m \cos(\omega t - \pi/2) && \text{(21b)} \\ \varepsilon(t) &= \varepsilon_m \cos(\omega t + \phi) && \text{(21c)} \\ \phi &= -\mathrm{tg}^{-1}\left(\frac{1}{\omega RC}\right) < 0 && \text{(21d)} \end{aligned}}$$

Estes resultados nos mostram que a carga do capacitor oscila com atraso de $\pi/2$ em relação à corrente e que a tensão da fonte oscila com um atraso menor, de $0 < \phi < \pi/2$.

A corrente no circuito oscila com a mesma frequência angular ω que a fonte, apresentando apenas uma fase diferente. O ângulo ϕ representa o *ângulo de defasagem* (ou simplesmente *defasagem*) entre a *fem* da fonte e a corrente no circuito, assumindo valores entre $-\pi/2$ e $\pi/2$. Por exemplo, se $\phi = 0$, então a tensão e a corrente atingem seus valores máximos sempre simultaneamente: elas estão *em fase*. Já se ϕ é positivo, a oscilação de corrente está adiantada em relação à oscilação de tensão.

Fundamental observar ainda que esta defasagem depende da frequência angular ω da fonte. Por exemplo, quando ω tende a zero, então ϕ tende a $-\pi/2$, ou seja, corrente e tensão tendem a ficar *em quadratura*[1] para frequências baixas.

O quadro abaixo resume o comportamento da carga e da corrente no circuito, bem como de suas defasagens nos regimes de baixas e altas frequências.

	$\omega \to 0$	$\omega \to \infty$
Carga	$Q_m \to \varepsilon_m C$	$Q_m \to 0$
	$\phi_C \to 0$	$\phi_C \to -\pi/2$
Corrente	$I_m \to 0$	$I_m \to \varepsilon_m/R$
	$\phi_I \to \pi/2$	$\phi_I \to 0$

Tabela 2 *Comportamento da carga no capacitor e da corrente na malha nos regimes de baixas e altas frequências. São analisadas as amplitudes Q_m e I_m, bem como as fases $\phi_C = \phi - \pi/2$ e $\phi_I = \phi$.*

Finalmente, vamos agora deduzir as tensões no resistor e no capacitor, usando novamente as expressões:

$$V_R(t) = RI(t), \tag{22}$$

$$V_C(t) = Q(t)/C. \tag{23}$$

Com isso, obtemos, a partir das equações (17) e (19):

$$\boxed{\begin{aligned} V_R(t) &= \frac{\varepsilon_m\, \omega RC}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}} \cos(\omega t) && \text{(24a)} \\ V_C(t) &= \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}} \cos(\omega t - \pi/2) && \text{(24b)} \end{aligned}}$$

Devido ao termo de fase extra $-\pi/2$ na expressão de $V_C(t)$, conclui-se que as oscilações de tensão no resistor e no capacitor estão *em quadratura*. Fica como exercício para o(a) leitor(a) verificar que esses resultados respeitam as equações (14) e (15), ou seja, mostrar que $V_R(t) + V_C(t) = \varepsilon_m \cos(\omega t)$ (aplicação da lei das malhas).

[1] Diz-se que duas grandezas oscilam em quadratura quando a diferença de fase entre as oscilações é de $\pi/2$.

3.2 Circuito RC como filtro de frequências

Vamos agora tomar como base os resultados precedentes para analisar a dinâmica do circuito conforme a frequência ω é variada. De fato, as *amplitudes de oscilação* nos componentes do circuito RC em corrente alternada dependem da frequência[2]. Conforme as equações anteriores, essas amplitudes dependentes de ω valem

$$\boxed{V_{R,m} = \frac{\varepsilon_m\,\omega RC}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}}} \quad \text{e} \quad \boxed{V_{C,m} = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{1+(\omega RC)^2}}} \tag{25}$$

e estão representadas graficamente na Figura 3.

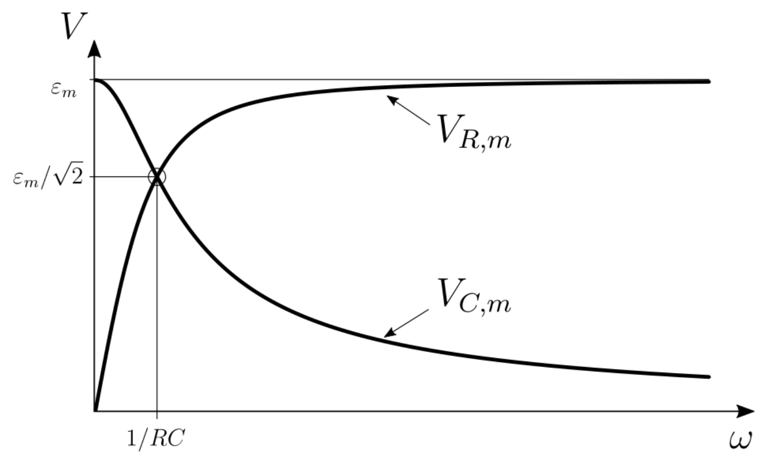


Figura 3 Comportamento das amplitudes de oscilação de tensão no circuito RC conforme se varia a frequência da fonte.

Pelo gráfico, nota-se que a tensão no capacitor praticamente se iguala à da fonte (em amplitude) para frequências baixas, ao passo que cai tendendo a zero quando $\omega \to \infty$. Em outras palavras, o capacitor fica restrito a valores baixos de tensão quando a fonte oscila "rápido demais". Isso ocorre porque o processo de carga do capacitor está associado ao tempo característico RC. Se a fonte oscila com período muito menor que RC, ou seja, com frequência muito maior que $1/RC$, o capacitor não atinge carga máxima a tempo. Portanto, ele "reage" pouco diante de frequências altas. Isto tem a ver com o conceito de *reatância*, que será definido mais adiante.

Ainda de acordo com o gráfico, existe uma frequência para a qual as amplitudes de tensão do capacitor e do resistor são iguais. Essa frequência é conhecida como **frequência de corte** do circuito RC e depende apenas do tempo característico $\tau = RC$:

$$\boxed{\omega_c = \frac{1}{RC} \Rightarrow f_c = \frac{1}{2\pi RC}}. \tag{26}$$

É acima dessa frequência que a tensão no capacitor fica menor que a tensão no resistor (em amplitude). Ela é chamada de frequência de corte pois o capacitor (associado ao resistor) pode servir como um filtro de frequências que deixa passar

[2] O mesmo vale para as tensões RMS, que diferem das tensões máximas por uma constante multiplicativa: $V_{rms} = V_m/\sqrt{2}$.

predominante as frequências abaixo de f_c, “cortando” parcialmente as frequências acima desse valor (filtro passa-baixa). Já o resistor tem uma tensão que oscila com amplitude maior para frequências acima desse valor (filtro passa-alta).

É comum conectar o circuito RC a outros mais complexos no intuito de filtrar as frequências que serão transmitidas ao outro circuito. Se este estiver conectado ao resistor, ele enxergará as frequências mais altas; se estiver conectado ao capacitor, ele receberá principalmente as frequências mais baixas. Filtros de frequência de outros tipos podem ser construídos com associações mais complexas de capacitores e resistores, assim como de indutores. Tais filtros encontram aplicações abundantes na engenharia de som, no tratamento de sinais de maneira geral e até na pesquisa básica, entre outros.

3.3 Usando notação complexa para interpretar os resultados

Os resultados (24) podem ser escritos em notação complexa (fasores) como

$$\tilde{V}_R(t) = V_{R,m}\, \mathrm{e}^{\mathrm{i}\omega t}, \tag{27}$$

$$\tilde{V}_C(t) = V_{C,m}\, \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega t - \pi/2)}, \tag{28}$$

$$\tilde{\varepsilon}(t) = \varepsilon_m\, \mathrm{e}^{\mathrm{i}(\omega t + \phi)}, \quad -\pi/2 < \phi < 0, \tag{29}$$

onde

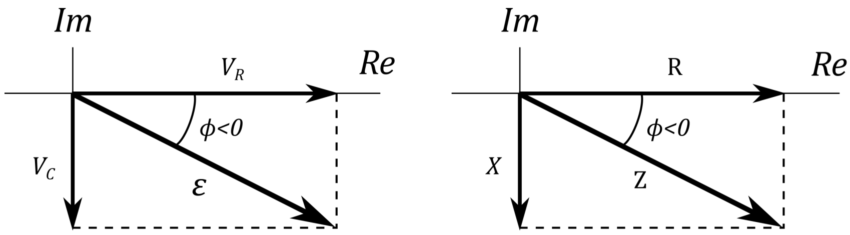
$$V_{R,m} = \frac{\varepsilon_m\, \omega RC}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}, \tag{30}$$

$$V_{C,m} = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}. \tag{31}$$

Note que

$$(V_{R,m})^2 + (V_{C,m})^2 = (\varepsilon_m)^2. \tag{32}$$

Graficamente, é possível perceber que os fasores $\tilde{V}_R(t)$ e $\tilde{V}_C(t)$ se somam vetorialmente resultando em $\tilde{\varepsilon}(t)$, como mostra a Figura 4 especificamente para $t = 0$.



(a) Diagrama de tensões (b) Diagrama de impedâncias

Figura 4 (a) Diagrama de tensões: representação dos fasores das tensões V_R, V_C e ε; (b) Diagrama de impedâncias, onde X é a reatância capacitiva

.

No caso da Figura 4(a), estes fasores giram no sentido anti-horário todos com velocidade angular ω. Na figura (b), por sua vez, as grandezas complexas ali representadas são independentes do tempo. Este gráfico também relembra o fato de

que
$$|Z| = \sqrt{R^2 + X^2},$$
onde
$$X = X_C = -\frac{1}{\omega C} \tag{33}$$
é a *reatância capacitiva.*

Daí resulta que

$$V_{R,m} = \frac{\varepsilon_m R}{\sqrt{R^2+X^2}} = \frac{\varepsilon_m R}{|Z|}, \tag{34}$$
$$V_{C,m} = \frac{\varepsilon_m/(\omega C)}{\sqrt{R^2+X^2}} = \frac{\varepsilon_m/(\omega C)}{|Z|}. \tag{35}$$

É possível ainda estabelecer generalizações da lei de Ohm usando a notação complexa e as impedâncias, conforme a equação (10), lembrando que as grandezas com barra (como $\overline{V}$ e $\overline{I}$) são números complexos com módulo e fase e representam a amplitude e a fase da oscilação:

$$\begin{cases} \overline{V}_R = Z_R \overline{I} \\ \overline{V}_C = Z_C \overline{I} \\ \overline{\varepsilon} = Z\overline{I} = (Z_R + Z_C)\overline{I} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \overline{V}_R = R\overline{I} \\ \overline{V}_C = -\mathrm{i}\frac{1}{\omega C}\overline{I} \\ \overline{\varepsilon} = \left(R - \mathrm{i}\frac{1}{\omega C}\right)\overline{I} \end{cases}. \tag{36}$$

Reescrevendo tudo isso em módulo, temos equações que se conectam diretamente com as amplitudes que se medem em laboratório:

$$\begin{cases} V_{R,m} = |Z_R|\, I_m \\ V_{C,m} = |Z_C|\, I_m \\ \varepsilon_m = |Z|\, I_m \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} V_{R,m} = R\, I_m \\ V_{C,m} = \dfrac{1}{\omega C} I_m \\ \varepsilon_m = \sqrt{R^2 + \left(\dfrac{1}{\omega C}\right)^2}\, I_m \end{cases}. \tag{37}$$

Nas equações acima, os valores máximos (amplitudes) podem ser todos substituídos em conjunto pelos valores RMS ($V_{rms} = V_m/\sqrt{2}$ e $I_{rms} = I_m/\sqrt{2}$). Portanto, quando for conveniente, podemos usar:

$$\begin{cases} V_{R,rms} = R\, I_{rms} \\ V_{C,rms} = \dfrac{1}{\omega C} I_{rms} \\ \varepsilon_{rms} = \sqrt{R^2 + \left(\dfrac{1}{\omega C}\right)^2}\, I_{rms} \end{cases}. \tag{38}$$

4 Referências Bibliográficas

- Halliday, Resnick & Walker, *Fundamentos de Física*, Vol. 3, Ed. LTC
- Moysés Nussenzveig, *Curso de Física Básica*, Vol. 3, Ed. Blucher
- Piacentini, Grandi, Hofmann, de Lima & Zimmerman, *Introdução ao Laboratório de Física*, Ed. da UFSC.
- Helene & Vanin, *Tratamento estatístico de dados em física experimental*, Ed. Blucher

5 Relação do material

- 01 fonte AC (oscilador);
- 01 osciloscópio;
- 01 resistor metálico 100 Ω ($\pm$10%);
- 01 capacitor 0,68 μF ($\pm$10%);
- Cabos para conexões elétricas.

6 Esquema Experimental

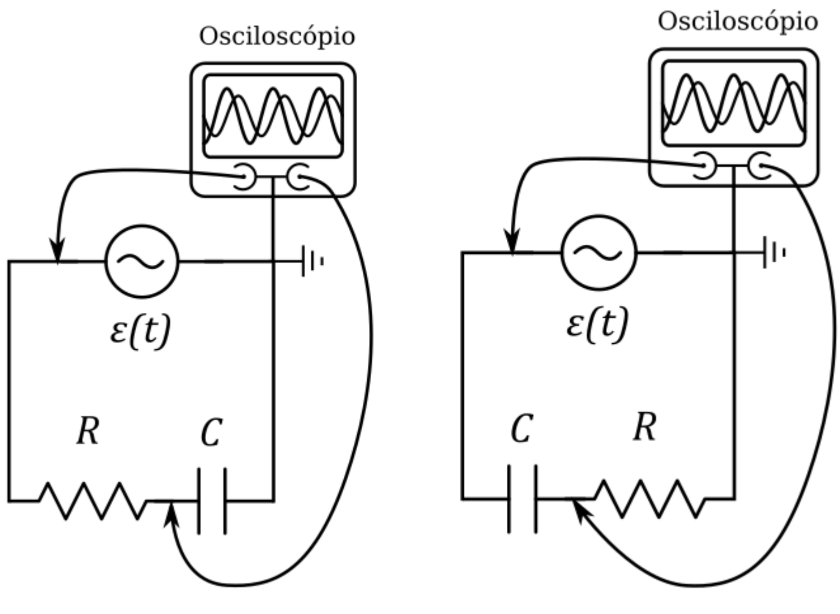


Figura 5 À esquerda, esquema de montagem da primeira parte, para medida de V_C. À diretia, montagem da segunda parte, para medida de V_R.

7 Procedimento Experimental

PRIMEIRA PARTE - Medindo V_C

1. Monte o circuito conforme o esquema, em que um dos terminais do capacitor está conectado ao terra da fonte.
2. Ligue a fonte e observe as oscilações de tensão na tela, ajustando a tensão eficaz (RMS) da fonte para 5,0 V.
3. Regule a faixa de frequência para 5K no oscilador.
4. Varie a frequência da fonte da frequência mínima à frequência máxima da faixa (e algumas centenas de hertz até 5 kHz), tomando um número de pontos suficiente para completar a tabela com valores de V_C (RMS) em função da frequência f. *OBS: toda vez que mudar a frequência do oscilador, a tensão da fonte pode variar; portanto, regule-a a cada mudança de frequência, garantindo que o valor eficaz da tensão fique em 5,0 V.*

SEGUNDA PARTE - Medindo V_R

1. Repita exatamente o processo da primeira parte, intercambiando as posições de R e C, que para agora seja possível medir V_R (RMS) com o osciloscópio.

8 Questionário

1. (a) Faça o gráfico de $V_C \times f$ e ajuste aos dados o modelo téorico (25) através dos parâmetros ε_m e $\tau = RC$.
   (b) Levando em conta as incertezas dos valores nominais e dos parâmetros ajustados, avalie se a teoria concorda com o experimento.

2. (a) Faça o gráfico de $V_R \times f$ e ajuste aos dados o modelo téorico (25) através dos parâmetros ε_m e $\tau = RC$.
   (b) Levando em conta as incertezas dos valores nominais e dos parâmetros ajustados, avalie se a teoria concorda com o experimento.

3. (a) Com base nos ajustes anteriores, determine a frequência de corte $f_c = 1/(2\pi\tau)$ (e sua incerteza) para cada gráfico.
   (b) Os valores diferem ou são compatíveis? Isso era esperado?

4. (a) Desenhe o diagrama de tensões teórico de circuito RC para o caso em que $f = f_c$;
   (b) Qual a fase relativa entre a oscilação de tensão da fonte e a oscilação de corrente no circuito?
   (c) Tente reconstruir o diagrama de tensões experimental para a frequência de corte. Se não houver dados para esta frequência exata, escolha frequência próxima ou utilize valores teóricos provenientes do modelo ajustado.

Exp. 6B - Circuito RC em corrente alternada

GRUPO: ______________ ALUNOS: ______________________________

TURMA: ______________ ______________________________

DATA: ______________ ______________________________

➤ **Valores nominais:**

C = μF

R = Ω

➤ **Valor teórico (frequência de corte):**

$f_C = \frac{1}{2\pi RC} =$ Hz

➤ **Tabela de dados**

Tensão na fonte: $\varepsilon_{\text{rms}} =$ V

Primeira parte (medidas no capacitor)		*Segunda parte (medidas no resistor)*	
f (Hz)	V_C (V) - RMS	f (Hz)	V_R (V) - RMS