



Universidade Federal do ABC

CENTRO DE ENGENHARIA, MODELAGEM E CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS - CECS

Experimento 2 - Medidas de sinais senoidais em circuito RC

Gabriel Moraes de Souza	RA: 11201811286
Giuliano Busatto Perasolo	RA: 11201811787
Lucas Moura de Almeida	RA: 11201811415
Pedro Henrique Assarito Araújo	RA: 11201810768
Rafael Balaguer Soares	RA: 11201810153

São Bernardo do Campo - 2020

Resumo

O presente experimento tem o propósito de promover a análise e posterior discussão sobre um circuito RC submetido a sinais senoidais de tensão, montado e analisado em laboratório, de modo a proporcionar a obtenção de um conjunto de dados relevantes que visam uma melhor compreensão dos conceitos fundamentais relacionados aos circuitos de corrente alternada (circuitos CA), os quais estão presentes em inúmeras aplicações cotidianas. Dentre estes conceitos, temos os fasores, que se baseiam nos chamados números complexos e são essenciais para que os fundamentos previamente estudados em circuitos de corrente contínua possam ser devidamente provados como verdadeiros e aplicados de forma correta.

Sumário

1	Introdução	4
2	Metodologia	5
2.1	Breve descrição do experimento	5
2.2	Gerador e Osciloscópio	5
2.3	O circuito RC	7
3	Resultados experimentais	9
3.1	Gerador e Osciloscópio	9
3.2	Circuito RC	11
4	Interpretação dos resultados experimentais	14
4.1	Identificação da grandeza medida pelo multímetro na função V_{AC} . .	14
4.2	Obtenção da forma de onda da corrente no circuito, através de $v_r(t)$.	15
4.3	O filtro passa-altas	16
4.4	Resultados Cálculados do Circuito RC	17
4.4.1	Frequência de 0,5 kHz	17
4.5	Comparação entre valores teóricos e medidos de tensões e defasagens	19
4.6	Aplicabilidade da LKT às tensões pico-a-pico do circuito	21
5	Discussão e conclusões	22
6	Anexo	23
6.1	Cálculos efetuados (1KHz e 10KHz)	23
6.2	Segunda Lei de Kirchhoff (Fasores)	25

1 Introdução

Um circuito RC é um circuito puramente resistivo e capacitivo que, por sua vez, através da aplicação de teoremas de análise de circuitos, pode ser simplificado a um resistor equivalente em série com capacitor equivalente, constituindo-se assim um circuito de malha única. ao se aplicar as fórmulas para resistores em série 1.1, resistores em paralelo 1.2, capacitores em série 1.3 e capacitores em paralelo 1.4. De modo que o circuito pode ser representado como é mostrado na figura 1.1, com forma simplificada que será utilizado em nosso experimento e que posteriormente haverá uma análise mais criteriosa.

$$R_s = \sum_{i=1}^n R_i \quad (1.1)$$

$$\frac{1}{R_p} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i} \quad (1.2)$$

$$\frac{1}{C_s} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} \quad (1.3)$$

$$C_p = \sum_{i=1}^n C_i \quad (1.4)$$

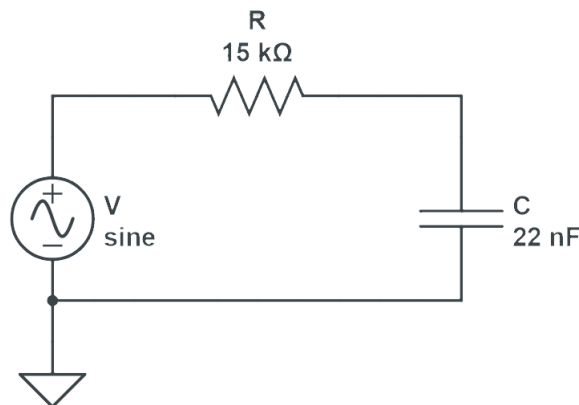


Figura 1.1: Esquema simplificado do circuito RC

2 Metodologia

2.1 Breve descrição do experimento

Dada a descrição anterior, o procedimento experimental utilizado para as análises objetivadas pelo presente relatório pode ser resumido de maneira adequada através de um fluxograma, apresentado na figura 2.1, no qual são apresentados os passos a serem seguidos durante a prática em laboratório, de forma sequencial.

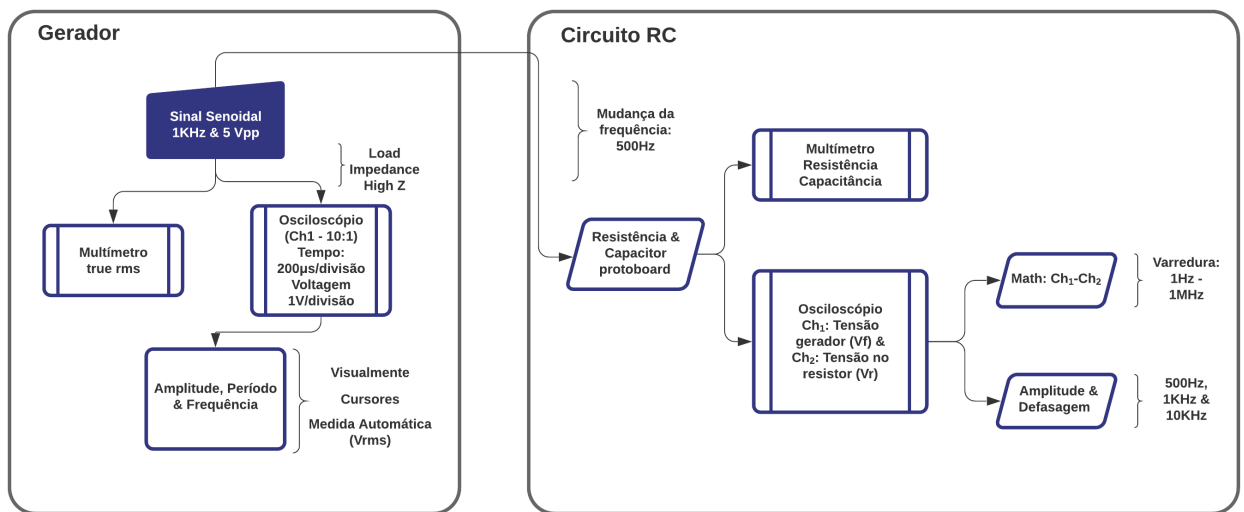


Figura 2.1: Fluxograma descritivo do experimento

2.2 Gerador e Osciloscópio

Primeiramente, foram realizados os devidos ajustes e medições nos aparelhos dispostos na bancada, para posterior aplicação na análise do circuito proposto. O gerador (Tektronix AFG3021B), representado na figura 2.2, foi ajustado de modo a gerar um sinal senoidal de 1 kHz, bem como uma tensão pico-a-pico (V_{pp}) de 5V. A resistência de carga ("Load Impedance") foi ajustada para a função "High Z".



Figura 2.2: Gerador Tektronix AFG3021B

O sinal gerado foi, finalmente, inserido no canal 1 do osciloscópio (Tektronix TDS2024C), representado na figura 2.3, sendo esse ajustado com a configuração da ponta de prova (10:1).

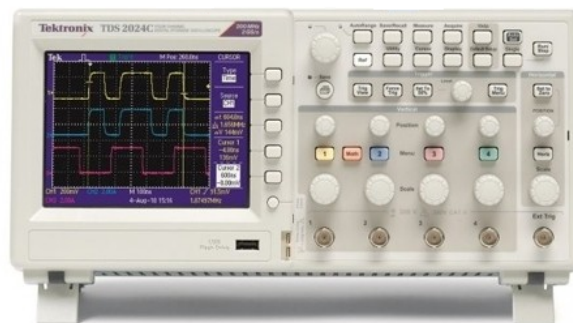


Figura 2.3: Osciloscópio Tektronix TDS2024C

Outro passo essencial foi o de ajustar as bases de tempo e tensão para $250\mu s$ e 1V por divisão, respectivamente. Através da figura 2.4, é possível a observação de 2,5 períodos, apresentados dentro dos limites da tela do dispositivo.

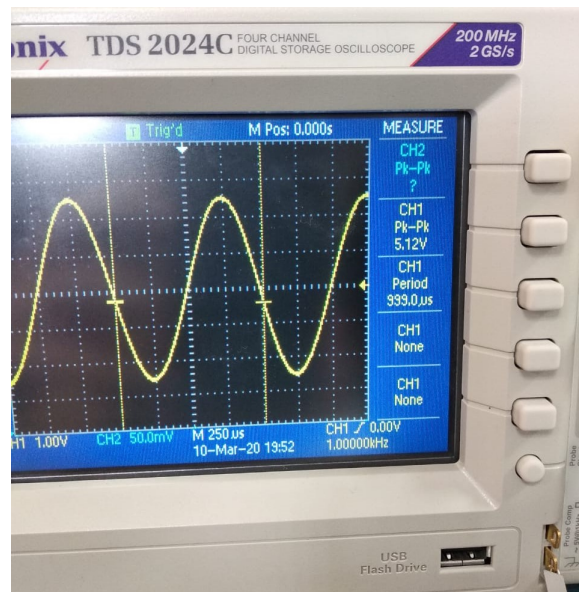


Figura 2.4: Inserção do sinal gerado no canal 1

Com todos os ajustes realizados de modo a se obter dados de forma acurada, realizou-se, posteriormente, as medições da amplitude (V_{pp}), do período P e da frequência f do sinal disposto no osciloscópio de três formas distintas:

- Visualmente, com o uso das divisões pré-estabelecidas;
- Utilizando os cursores presentes no osciloscópio;
- Utilizando-se o recurso de medida automática para obter o valor eficaz (V_{rms}) da tensão produzida pelo gerador.

2.3 O circuito RC

Posteriormente à análise supracitada, os componentes utilizados na montagem do circuito RC utilizado no experimento (resistor e capacitor) tiveram seus valores medidos através de um multímetro de bancada, o qual indicou, respectivamente, os valores de $14,759K\Omega$ (figura 2.5) e $22nF$.

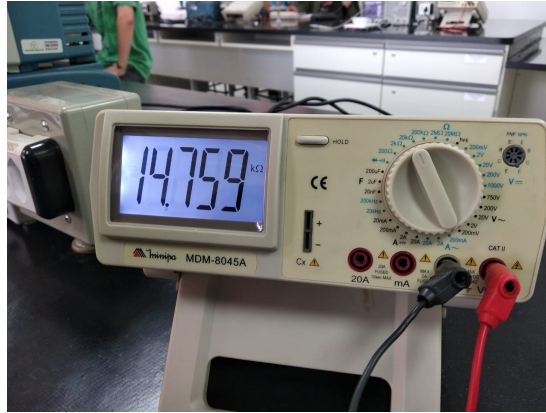


Figura 2.5: Medição do resistor

Após a realização das devidas medidas de resistência e capacitância dos elementos a serem utilizados no experimento, foi realizada a montagem do circuito RC proposto (esquematizado na figura 2.6). Tais componentes são conectados junto a uma proto-board, assim como esquematizado na figura 2.7.

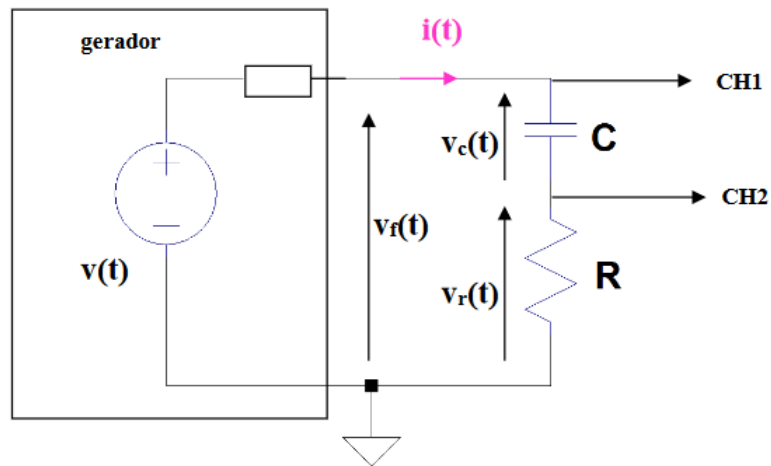


Figura 2.6: Circuito RC com indicações das ligações efetuadas

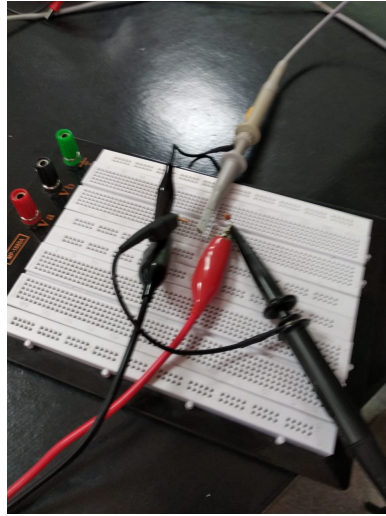


Figura 2.7: Conexões na protoboard durante o experimento

Vale-se ressaltar que, especificamente nessa fase do experimento, a frequência associada ao sinal de tensão fornecido pelo gerador foi modificada, obtendo-se, portanto um valor de 500 Hz, enquanto os outros parâmetros permaneceram inalterados, como a voltagem pico-a-pico de 5V e o ajuste da carga "Load impedance" para "High Z".

3 Resultados experimentais

3.1 Gerador e Osciloscópio

Os dados medidos em laboratório na primeira parte do experimento conduzem à tabela 1 e à figura 3.1.

	Amplitude [V]	Período [ms]	Frequência [KHz]	Valor Eficaz [V]
Visual	5,00	1,00	1,00	-
Cursors	5,04	1,19	0,84	-
Automático	5,12	0,99	1,01	1,78

Tabela 1: Medições aferidas

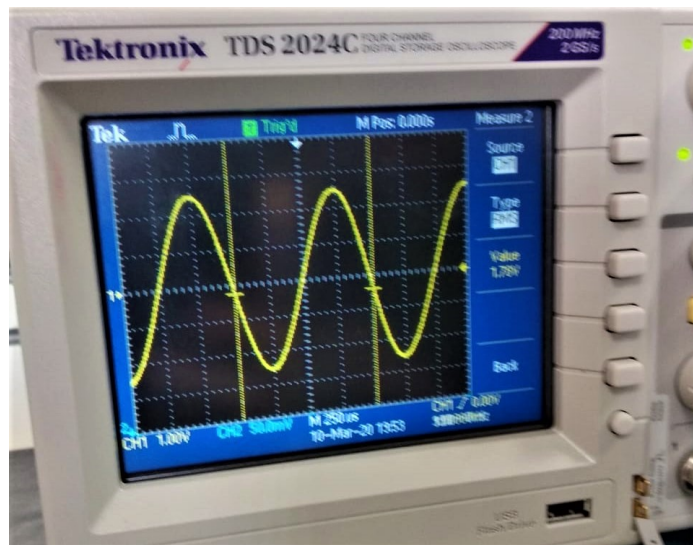


Figura 3.1: Valor de tensão explicitado no osciloscópio

Por fim, foi realizada a medida do sinal de saída de tensão do gerador, utilizando-se o multímetro de bancada presente durante o experimento. Em tal medida, o valor obtido foi de $1,759V$, como é mostrado na figura 3.2. O significado desse valor obtido de tensão pelo multímetro e pelo osciloscópio medido será explicado adiante (seção 4.1).

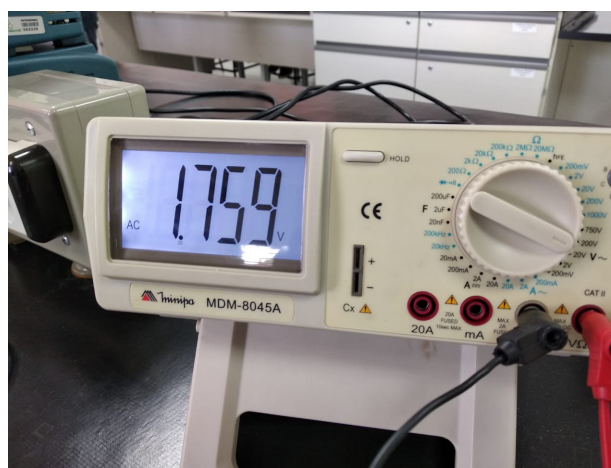


Figura 3.2: Valor de tensão medido pelo multímetro de bancada

3.2 Circuito RC

Conforme esquematizado na figura 2.6, a ponta de prova 1 (Ch1) refere-se à tensão do gerador (V_f) e a ponta de prova 2 (Ch2) refere-se à tensão no resistor (V_r), tensões essas que são simultaneamente mostradas pelo osciloscópio. Após a devida montagem do circuito, detalhada em seções anteriores, a tensão no capacitor (V_c) pode ser obtida através da função "MATH", disponível no osciloscópio. Tal função calcula a diferença $V_c = V_{Ch1} - V_{Ch2}$ e a apresenta na forma de um sinal senoidal (em vermelho na figura 3.3).

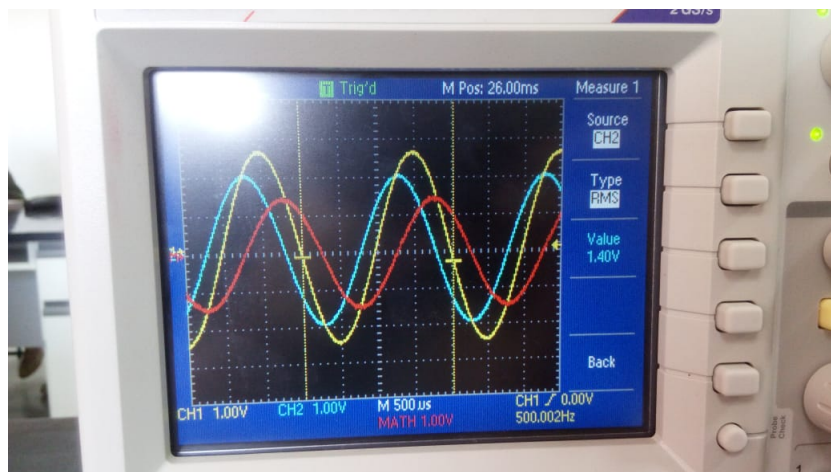


Figura 3.3: Ondas senoidais de 500Hz

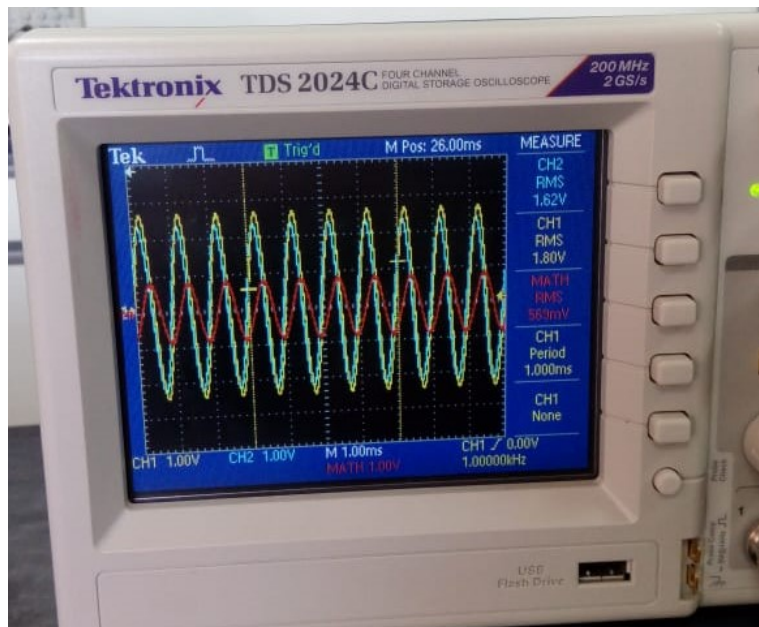


Figura 3.4: Ondas senoidais de 1KHz

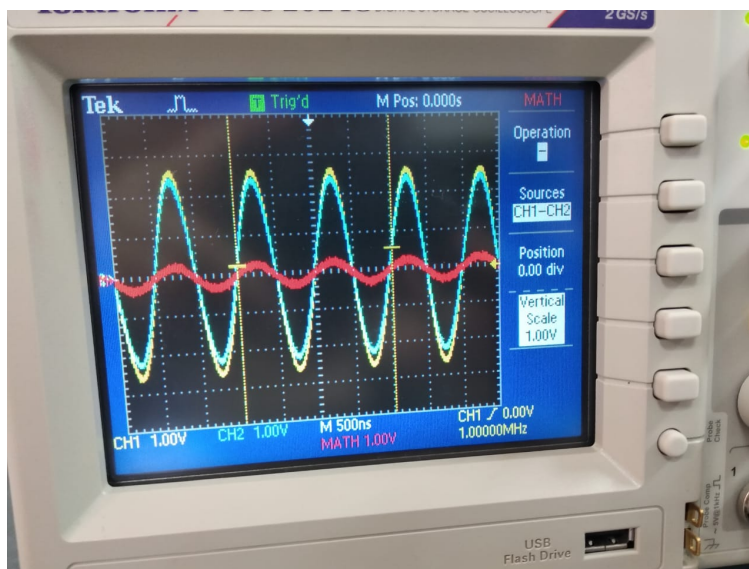


Figura 3.5: Ondas senoidais de 1MHz

Ao se observar as imagens e dados obtidos é possível constatar por meio da equação 3.1, relacionada a impedância do capacitor, que ao aumentar a frequência há uma diminuição da impedância e por consequência temos uma diminuição na amplitude da onda senoidal correspondente ao capacitor, mostrado na imagens pela colaração avermelhada, obtida pela função "MATH".

$$Z = \frac{-j}{\omega \times C} \quad (3.1)$$

Por fim com todos essas observações, dados e conhecimento dos fasores, é mostrado os dados relacionados a amplitude e defasagem para todas as frequências estudadas por meio das tabelas 2 e 3.

	Ch1 (V_f)	Ch2 (V_r)	Ch1-Ch2 (V_c)	Δt (μs)	Defasagem ($^\circ$)
500 Hz	5,12	4,04	3,00	2000	35,5
1 KHz	5,12	4,54	1,72	1000	18,2
10 KHz	5,20	4,70	0,72	100	1,8

Tabela 2: Resultados medidos do circuito RC

4 Interpretação dos resultados experimentais

4.1 Identificação da grandeza medida pelo multímetro na função V_{AC}

Quando realiza-se a medida de tensão em um circuito cuja mesma varia de forma senoidal (corrente alternada), torna-se conveniente a medida do valor médio (ou eficaz) da tensão. Tomemos um circuito no qual a tensão varia de acordo com o gráfico da figura 4.1

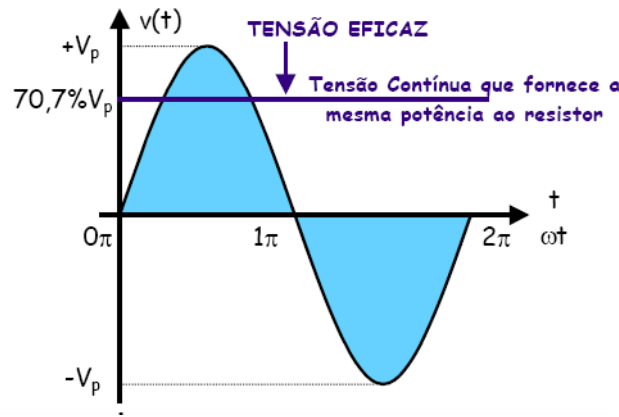


Figura 4.1: Tensão eficaz

Através do circuito da figura acima, nota-se que a tensão varia de acordo com a expressão:

$$V(t) = V_p \sin(\omega t) \quad (4.1)$$

Elevando-se a equação 4.1 ao quadrado, obtemos:

$$V(t)^2 = V_p^2 \sin^2(\omega t) \quad (4.2)$$

Pelo Teorema do Valor Médio, do Cálculo Integral, temos, por sua vez:

$$\langle V(t)^2 \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T V_p^2 \sin^2(\omega t) dt = \frac{V_p^2}{T} \frac{T}{2} = \frac{V_p^2}{2} \quad (4.3)$$

Onde T é o período de oscilação da Tensão supracitada. Por fim, temos que o valor rms (eficaz) da Tensão é dado por:

$$V_{eff} = \sqrt{\langle V(t)^2 \rangle} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \quad (4.4)$$

Tomemos agora o circuito montado experimentalmente. Para tal circuito, temos que $V_p = 2,56V$ (obtido automaticamente pelo osciloscópio). Dessa forma, de acordo com a expressão 4.4, temos:

$$V_{eff} = \frac{2,56}{\sqrt{2}} = 1,81V \quad (4.5)$$

O multímetro utilizado para medição da tensão (Minipa MDM-8045A) apresentou um valor de 1,759 V na função VAC. Considerando-se as especificações técnicas desse dispositivo, temos que a precisão do valor medido é dada por:

$$P = \pm 0,001M + 5D = \pm 0,05V \quad (4.6)$$

Sendo assim, temos que a medida do aparelho pode ser expressa como:

$$M = (1,76 \pm 0,05)V \quad (4.7)$$

Assim, como V_{eff} calculado em (4.5) está compreendido na faixa de precisão do multímetro supracitado, o valor medido está coerente com o valor calculado (teórico) de tensão eficaz para o circuito experimental.

4.2 Obtenção da forma de onda da corrente no circuito, através de $v_r(t)$

Dado o circuito explicitado na figura 2.7, através da Lei de Kirchhoff de Tensões (LKT), temos:

$$v_r(t) = v_f(t) - v_c(t) \quad (4.8)$$

Como v_f e v_c foram medidos com o auxílio do osciloscópio, temos da equação 4.8 que:

$$i(t) = \frac{1}{R} \times v_r(t) = \frac{1}{R} \times (v_f(t) - v_c(t)) \quad (4.9)$$

E assim, temos a forma de onda da corrente no circuito.

4.3 O filtro passa-altas

A partir dos dados da tabela 2, temos o seguinte gráfico:

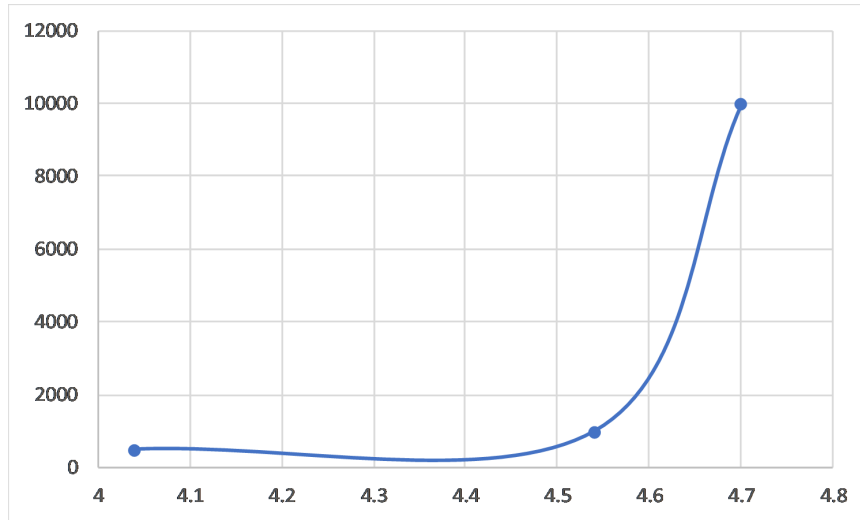


Figura 4.2: Gráfico V_R x Frequência

Para ondas senoidais de frequências altas, a impedância capacitiva assume valores baixos em comparação ao valor da resistência. Dessa maneira a tensão de saída será praticamente igual à tensão de entrada. Para frequências baixas, a impedância capacitiva assume valores altos em comparação com o valor da resistência, dessa maneira atenuando a tensão de saída para um valor praticamente nulo. Portanto, o filtro permite a passagem de sinais de frequências altas, sendo por isto denominado filtro passa-alta.

4.4 Resultados Cálculados do Circuito RC

É de extrema importância ressaltar as equações, que permitem chegar aos resultados referentes a tabela 3 e que foram utilizadas na completude deste relatório, baseadas em toda a teoria que circunda os chamados números complexos. Primeiramente definimos a chamada impedância equivalente, dada pela equação 4.10, após isso podemos calcular tanto a tensão pico a pico para o resistor quanto para o capacitor, respectivamente descritos pelas equações 4.11 e 4.12, a partir da ideia de divisão de tensão.

$$\begin{aligned} Z_{eq} &= Z_R + Z_C \\ &= R - \frac{j}{\omega \times C} \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$V_R = \frac{V_f \times R}{Z_{eq}} \quad (4.11)$$

$$V_C = \frac{V_f \times Z_C}{Z_{eq}} \quad (4.12)$$

Por fim como temos um circuito RC em série, dada toda a teoria de circuitos, podemos afirmar que a corrente que está presente no sistema é a mesma para todos os componentes, portanto com base na tensão pico a pico no resistor e sua impedância podemos chegar a equação 4.13, obtendo o módulo da corrente.

$$I_{pp} = \frac{V_R}{R} \quad (4.13)$$

	Ch1 (V_f)	Ch2 (V_r)	Ch1-Ch2 (V_c)	I (A)	Defasagem ($^\circ$)
500 Hz	5,082	3,65	3.52	0,00024	43,97
1 KHz	5,090	4,58	2,22	0,00031	25,70
10 KHz	5,090	5,08	0,25	0,00034	2,76

Tabela 3: Resultados calculados para o circuito RC proposto

4.4.1 Frequência de 0,5 kHz

Para a frequência de 0,5 kHz, temos que $v_{fpp} = 5,082$ V e a frequência angular do circuito (ω) é dada por:

$$\omega = 2\pi f = \pi \text{ krad/s} \quad (4.14)$$

Assim, dada a referência explicitada anteriormente, o fasor associado a v_{fp} é:

$$V_{fp} = 5,082 \times e^{j0} = 5,082 \text{ V} \quad (4.15)$$

Calculando-se a impedância equivalente do circuito através da equação 4.28 , temos que:

$$Z_{eq} = 15 \times 10^3 - j \frac{1}{\pi \times 10^3 \times 22 \times 10^{-9}} = (15 - j14468) \Omega \quad (4.16)$$

Através da equação 4.16, podemos concluir que o argumento e o módulo da impedância equivalente do circuito são dados por:

$$\begin{aligned} \theta &= \arctan(-14468/15000) = -43,97^\circ \\ &= |Z_{eq}| = 20840 \Omega \end{aligned} \quad (4.17)$$

Assim, podemos escrever Z_{eq} em sua forma de Euler:

$$Z_{eq} = 20840 \times e^{-j \times 43,97^\circ} \Omega \quad (4.18)$$

Dessa forma, torna-se possível a determinação dos fasores associados às formas de onda das tensões no resistor e no capacitor. Aplicando-se divisores de tensão para ambos os bipolos elétricos, temos:

$$V_r = V_f \times \frac{Z_r}{Z_{eq}} = 5,082 \times \frac{15000 \times e^{j \times 0^\circ}}{20840 \times e^{-j \times 43,97^\circ}} = 3,658 \times e^{j \times 43,97^\circ} \text{ V} \quad (4.19)$$

$$V_c = V_f \times \frac{Z_c}{Z_{eq}} = 5,082 \times \frac{14468 \times e^{-j \times 90^\circ}}{20840 \times e^{-j \times 43,97^\circ}} = 3,528 \times e^{-j \times 46,03^\circ} \text{ V}$$

Dessa forma, podemos concluir que as tensões de pico a pico no resistor e no capacitor são, respectivamente, de 3,658 V e 3,528 V. Podemos, ainda, obter o fasor representante da corrente no circuito através da equação 4.22, aplicada ao resistor, por exemplo:

$$I = \frac{V_r}{Z_r} = \frac{3,658 \times e^{j \times 43,97^\circ}}{15000 \times e^{j \times 0^\circ}} = 0,2438 \times e^{j \times 43,97^\circ} \text{ mA} \quad (4.20)$$

Assim, conclui-se que a corrente de pico a pico no circuito é de 0,2438 mA. Por fim, é possível calcularmos a defasagem ($\Delta\theta$) entre os sinais de tensão no gerador

(Ch1) e do resistor (Ch2) do circuito, que corresponde a defasagem entre a tensão do gerador e da corrente. De modo que o sinal da corrente está adiantado em relação ao sinal da tensão no gerador.

$$\Delta\theta = \phi_r - \phi_f = 43,97^\circ \quad (4.21)$$

Vale-se ressaltar que os cálculos para as outras frequências se encontram disponíveis na seção 6.1 no final do presente relatório.

4.5 Comparação entre valores teóricos e medidos de tensões e defasagens

Através do multímetro de bancada, foram medidos os valores pico-a-pico do sinal de tensão produzido pelo gerador utilizado no circuito experimental para as frequências de 0,5 kHz, 1 kHz e 10 kHz, respectivamente. Os resultados obtidos estão dispostos à seguir:

Frequência (f) [kHz]	Tensão pico-a-pico (v_{fpp}) [V]	Tensão de pico (v_{fp}) [V]
0,5	5,082	2,541
1,0	5,090	2,545
10,0	5,090	2,545

Tabela 4: Amplitudes de tensão associadas ao sinal do gerador (sob diferentes frequências)

A partir da tabela 4.5, são possíveis o cálculo e posterior explicitação das formas fasoriais das demais tensões de pico no circuito (v_{cp} e v_{rp}), para as diferentes frequências supracitadas. À Seguir, serão utilizadas as seguintes notações para os cálculos realizados:

Notação	Impedância	Fasor associado a uma grandeza g
Símbolo	Z	G

Tabela 5: Notações utilizadas nos cálculos

Lembremos, inicialmente, dos conceitos de impedância resistiva e impedância capacitiva. Define-se impedância como a resistência de um determinado bipolo elétrico do circuito à passagem de corrente. a impedância de um determinado elemento pode ser obtida matematicamente através da forma fasorial da 1ª Lei de Ohm, a saber:

$$V = Z \times I \quad (4.22)$$

Consideremos um circuito RC como o explicitado na figura 2.6, submetido a uma tensão de fonte da forma $v_f(t) = v_{fp} \cos(\omega t + \phi_f)$, onde ω é a frequência angular e ϕ_f é a fase inicial do sinal gerado pela fonte. Sabe-se, portanto, que o fasor associado a v_f é $V_f = v_{fp} e^{j\phi_f}$. Assim, para o resistor, temos:

$$\begin{aligned} v_r(t) &= v_{rp} \times \cos(\omega t + \phi_r) \\ V_r &= V_{rp} \times e^{j\phi_r} \end{aligned} \quad (4.23)$$

Assim, pela 1ª Lei de Ohm, temos que:

$$i(t) = \frac{v_r(t)}{R} = \frac{v_{rp}}{R} \times \cos(\omega t + \phi_r) \quad (4.24)$$

Portanto, o fasor associado à corrente do circuito é dado por:

$$I = \frac{v_{rp}}{R} \times e^{j\phi_r} = \frac{V_{rp}}{R} \quad (4.25)$$

Finalmente, pela equação 4.22, podemos concluir que:

$$Z_r = R \quad (4.26)$$

Em raciocínio análogo ao acima, porém para o capacitor, podemos concluir que:

$$Z_c = \frac{-j}{\omega \times C} \quad (4.27)$$

Por fim, conclui-se, através das equações 4.26 e 4.27, que a impedância equivalente de um circuito RC é dada por:

$$Z_{eq} = Z_r + Z_c = R - j \frac{1}{\omega \times C} \quad (4.28)$$

Para os cálculos realizados nas sessões posteriores, considera-se como referência, sem perda de generalidade, que a fase inicial do sinal de tensão produzido pelo gerador é nula.

4.6 Aplicabilidade da LKT às tensões pico-a-pico do circuito

Uma pergunta natural que poderia surgir durante o experimento apresentado pelo presente relatório diria respeito à aplicação direta da LKT às tensões pico-a-pico do circuito RC. Em outras palavras, coloca-se em dúvida a validade da equação 4.29:

$$V_{fpp} - V_{cpp} - V_{rpp} = 0 \quad (4.29)$$

De forma a se responder à pergunta supracitada, consideremos novamente o circuito da figura 2.6. Tomando-se os fasores associados a cada elemento desse circuito, podemos escrever a 2ª Lei de Kirchhoff em sua forma fasorial, como segue:

$$V_f - V_c - V_r = 0 \quad (4.30)$$

Desenvolvendo-se a equação 4.30, obtemos:

$$\begin{aligned} \frac{V_{fpp}}{2} \times e^{j\phi_f} - \frac{V_{cpp}}{2} \times e^{j\phi_c} - \frac{V_{rpp}}{2} \times e^{j\phi_r} &= 0 \Rightarrow \\ \Rightarrow V_{fpp} \times e^{j\phi_c} - V_{cpp} \times e^{j\phi_r} - V_{rpp} \times e^{j\phi_f} &= 0 \end{aligned} \quad (4.31)$$

Assim, através da equação 4.31, pode ser constatado que a validade da equação 4.29 só ocorre quando todos os sinais de tensão do circuito possuem a mesma fase inicial, o que nem sempre ocorre. Portanto, a equação 4.29 não é sempre válida e a aplicação da 2ª Lei de Kirchhoff diretamente às tensões pico-a-pico do circuito não é um raciocínio válido. De fato, se tomarmos os valores de tensão pico-a-pico explicitados para a frequência de 0.5 kHz na tabela 3, temos que:

$$V_{fpp} - V_{cpp} - V_{rpp} = 5.082 - 3.59 - 3.47 = -1.978 \text{ V} \neq 0 \quad (4.32)$$

O que mostra a falsidade da equação 4.29

5 Discussão e conclusões

Com base no que foi apresentado e discutido, o presente relatório proporcionou um engrandecimento na visão do que são os circuitos de corrente alternada e como certas adaptações são necessárias com relação a teoria previamente estudada, por exemplo, no que se refere a segunda lei de Kirchhoff, temos sua validade sob a condição específica de se trabalhar com fasores. Além de promover condições, na qual é possível estudar um conjunto de outras aplicações para os capacitores como as de filtro de um circuito, como já foi supracitado.

6 Anexo

6.1 Cálculos efetuados (1KHz e 10KHz)

$$2) f = 10^3 \text{ Hz} ; V_f = 5,09 \text{ V} = 5,09 \angle 0^\circ$$

$$Z_{eq} = Z_R + Z_C = R - j \frac{1}{\omega C} = (15 \cdot 10^3) - (7234)j$$

$$|Z_{eq}| = \sqrt{(15 \cdot 10^3)^2 + (-7234)^2} = 16653 \Omega$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{-7234}{15.000} \right) = -25,7^\circ$$

$$\therefore Z_{eq} = 16653 \angle -25,7^\circ$$

• No Resistor

$$\hat{V}_R = \frac{\hat{V}_f \cdot Z_R}{Z_{eq}} = \frac{5,09 \angle 0^\circ \cdot 15 \cdot 10^3 \angle 0^\circ}{16653 \angle -25,7^\circ} = 4,58 \angle 25,7^\circ$$

• No Capacitor

$$\hat{V}_C = \frac{\hat{V}_f \cdot Z_C}{Z_{eq}} = \frac{V_f \cdot \frac{1}{j\omega C}}{(R + \frac{1}{j\omega C})} = \frac{V_f}{(j\omega RC + 1)}$$

$$1 + j\omega RC = 1 + 2,07j \quad \left\{ \begin{array}{l} |1| = \sqrt{(1)^2 + (2,07)^2} = 2,29 \\ \phi = 64,2^\circ \end{array} \right.$$

$$\therefore \hat{V}_C = 5,09 \angle 0^\circ / 2,29 \angle 64,2^\circ = 2,22 \angle -64,2^\circ$$

$$3) f = 10^4 \text{ Hz}; V_f = 5,09 \text{ V} = 5,09 \angle 0^\circ$$

$$Z_{eq} = Z_R + Z_C = R - j \frac{1}{\omega C} = (15 \cdot 10^3) - (723)j$$

$$|Z_{eq}| = \sqrt{(15 \cdot 10^3)^2 + (-723)^2} = 15017 \Omega$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{-723}{15000} \right) = -2,76^\circ$$

$$\therefore Z_{eq} = 15017 \angle -2,76^\circ$$

• No Resistor

$$\hat{V}_R = \hat{V}_f \cdot \frac{Z_R}{Z_{eq}} = 5,09 \angle 0^\circ \cdot \frac{15 \cdot 10^3 \angle 0^\circ}{15017 \angle -2,76^\circ} = 5,08 \angle 2,76^\circ$$

• No Capacitor

$$\hat{V}_C = \hat{V}_f \cdot \frac{Z_C}{Z_{eq}} = \frac{V_f \cdot \frac{1}{j\omega C}}{(R + \frac{1}{j\omega C}) (j\omega RC + 1)}$$

$$1 + j\omega RC = 1 + 20,7j \quad \begin{cases} |1| = 20,7 \\ \phi = 87,2^\circ \end{cases}$$

$$\therefore \hat{V}_C = 5,09 \angle 0^\circ / 20,7 \angle 87,2^\circ = 0,25 \angle -87,2^\circ$$

6.2 Segunda Lei de Kirchhoff (Fasores)

Verificando a Lei de Kirchhoff [500Hz]

$$\hat{V}_j = \hat{V}_C + \hat{V}_R$$

$$5 \angle 0^\circ = 3,47 \angle -46^\circ + 3,59 \angle 43,9^\circ$$

$$5(1+0j) = 3,47(\cos(-46^\circ) + j\sin(-46^\circ)) + 3,59(\cos(43,9^\circ) + j\sin(43,9^\circ))$$

$$5(1+0j) = 5(1+0j)$$

Portanto é válida a Lei de Kirchhoff.