

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
Departamento de Engenharia Elétrica

Práticas de Circuitos Elétricos 1

Augusto C. C. de Oliveira
Leonardo Limongi
Daniel Chaves

Recife, 2010

Sumário

1. Lei de Ohm, Resistores e Medições em Circuitos Elétricos	2
1.1. Resumo Teórico - Lei de Ohm	2
1.2. Medição Usando o Multímetro	4
1.3. Tensões Senoidais	10
1.3.1. Valor Médio ou CC	11
1.3.2. Valor eficaz	12
1.4. Objetivos da Prática	12
1.5. Práticas de Laboratório	13
1.5.1. Prática 1	13
1.5.2. Prática 2	13
1.5.3. Prática 3	14
1.5.4. Prática 4	16
2. Fontes de Tensão e de Corrente	17
2.1. Resumo Teórico - Fontes de Tensão e Corrente	17
2.2. Objetivos das Práticas	19
2.3. Práticas de Laboratório	19
2.3.1. Prática 1	20
2.3.2. Prática 2	21
3. Equivalentes de Thevenin e Norton	22
3.1. Resumo Teórico - Equivalentes de Thévenin e Norton	22
3.2. Objetivos das Práticas	23
3.3. Práticas de Laboratório	23
3.3.1. Prática 1 (Simulação)	23
3.3.2. Prática 2 (cálculos teóricos)	24
3.3.3. Prática 3 (Prática experimental)	24
3.3.4. Prática 4	26

4. Fontes Dependentes ou Controladas	27
4.1. Resumo Teórico - Amplificador Operacional (Amp-Op)	27
4.1.1. Terminais de um Amp-Op	27
4.2. Objetivos das Práticas	30
4.3. Práticas de Laboratório	30
4.3.1. Prática 1	30
4.3.2. Prática 2	32
5. Circuitos RC	34
5.1. Resumo Teórico - Circuitos RC	34
5.2. Objetivo da Prática	35
5.3. Prática de Laboratório	35
5.3.1. Prática 1	37
5.3.2. Prática 2	37
6. Circuitos RLC	40
6.1. Resumo Teórico - Circuitos RLC	40
6.1.1. Ligação Série	40
6.1.2. Ligação Paralelo	42
6.2. Objetivo das Práticas	42
6.3. Práticas de Laboratório	42
6.3.1. Prática 1	43
6.3.2. Prática 2	44
7. Circuitos AC em regime permanente	46
7.1. Resumo teórico - As Leis de Kirchhoff utilizando fasores	46
7.2. Resumo teórico - Equivalente de Thevenin para circuitos reativos	47
7.3. Objetivo das Práticas	47
7.4. Práticas de Laboratório	48
7.4.1. Prática 1	48
7.4.2. Prática 2	49
8. Fator de potência em circuitos com elementos reativos	51
8.1. Resumo Teórico	51
8.2. Relação tensão-corrente para fasores nos elementos reativos	52
8.2.1. Indutância	52
8.2.2. Capacitância	53
8.3. Potência média e fator de potência	54
8.3.1. Método para correção do fator de potência	55
8.4. Objetivo das Práticas	57
8.5. Práticas de Laboratório	57
8.5.1. Prática 1	57
8.5.2. Prática 2	57
A. Manuais dos Equipamentos Agilent	60
Referências Bibliográficas	61

REGRAS GERAIS DE USO DO LABOTATÓRIO

1. O acesso do aluno ao laboratório e sua permanência nele só será permitida com a presença de um responsável (instrutor).
2. Cada grupo de aluno escolherá uma das bancadas e permanecerá nela durante todo o período letivo.
3. A bancada, antes de cada prática, deve ser preparada pelo instrutor. Nela:
 - (a) conterão todos os componentes necessários à cada prática;
 - (b) as ponteiros dos equipamentos devem estar devidamente plugadas nos módulos.
4. Os computadores possuem instalados dois sistemas operacionais (SO): o Linux e o Windows. Os equipamentos da Agilent (chassis e módulos) foram instalados no SO Windows e neste sistema, por questão de segurança, desabilitamos todas as outras portas USB, o drive do CDROM e o acesso a internet. Os arquivos a serem salvos no Windows devem ser colocados na pasta **PraticaLab**, a qual estará disponível no Linux para uma possível cópia dos arquivos via portas USB. No SO Linux as portas USB e a internet estão disponíveis para acesso.
5. Terminada a(s) prática(s) do dia o instrutor deve guardar os componentes e ponteiros no armário/estante.
6. Antes de fechar a sala, o instrutor deve verificar os condicionadores de ar e luzes e por conseguinte desligar o disjuntor geral do QD de cada sala.

Capítulo 1

Lei de Ohm, Resistores e Medições em Circuitos Elétricos

1.1 Resumo Teórico - Lei de Ohm [1–5]

RESISTÊNCIA É A OPOSIÇÃO DOS MATERIAIS à passagem de corrente ou, mais precisamente, ao movimento de cargas elétricas. O elemento ideal usado como modelo para este comportamento é o **resistor**. As Figuras 1.1 e 1.2 mostram alguns tipos de resistores, cujo símbolo é mostrado na Figura 1.3.

Para fins de análise de circuitos, a corrente em um resistor deve ser indicada em relação à tensão entre seus terminais. Escolhendo a direção da corrente no sentido da queda de tensão, Figura 1.4, a relação entre tensão e corrente será dada por

$$v = Ri \tag{1.1}$$

A equação (1.1) é conhecida como **lei de Ohm**.

Os códigos de cores dos resistores são mostrados na Figura 1.5.



Figura 1.1: Diferentes tipos de resistores.



Figura 1.2: Resistores variáveis - *potenciômetros*.

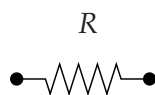


Figura 1.3: Símbolo de um resistor cuja resistência é R .

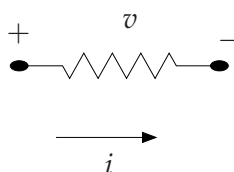


Figura 1.4: Convenção para a corrente e a tensão nos terminais de um resistor.

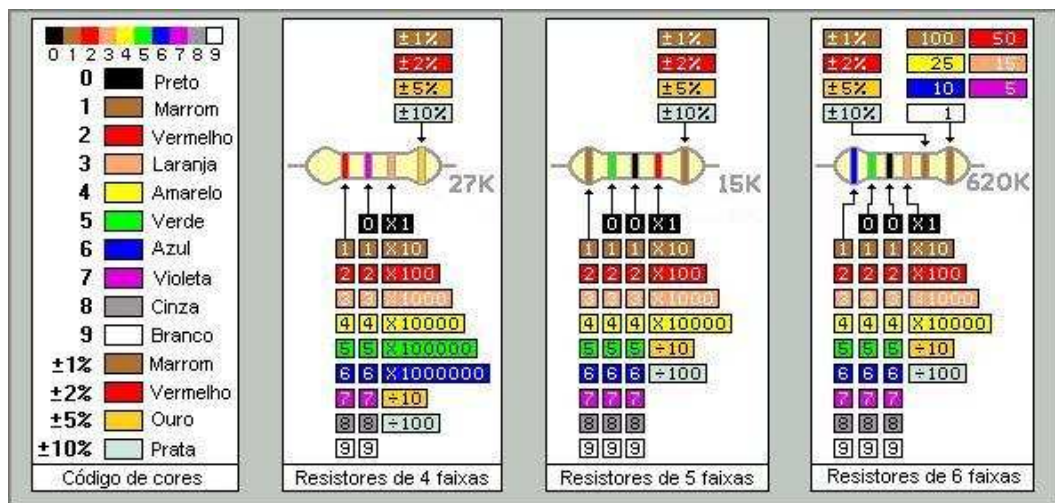


Figura 1.5: Código de cores dos resistores.

1.2 Medição Usando o Multímetro

Um dos equipamentos mais comuns de medição é o *multímetro*, Figura 1.6. Ele tem a capacidade de medir diferentes variáveis: tensão, corrente, resistência entre outras. Deve-se ter o cuidado ao se manusear o multímetro, pois o manuseio incorreto do multímetro pode ser uma fonte de perigo. Existem diferentes tipos de multímetros, o mostrado na Figura 1.6 refere-se a uma ilustração genérica de um multímetro digital.

As marcações do multímetro, Figura 1.6, são as seguintes: partindo da posição "OFF" no sentido horário, tem-se o modo da leitura da tensão em corrente contínua (CC), ou da leitura da tensão em corrente alternada (CA), ou da leitura da resistência, ou da leitura da corrente em CA ou finalmente da leitura da corrente em CC.

No multímetro há três diferentes *sockets* onde são plugadas as *ponteiras*. As ponteiras são usadas para conectar o multímetro ao circuito em teste e são de cores preta e vermelha, Figura 1.7.

A ponteira preta **deve ser sempre** plugada no terminal "COM", que significa comum. Enquanto que a ponteira vermelha pode ser plugada no terminal da tensão/resistência (V Ω) ou no terminal da corrente (A) dependendo do que se deseja medir.

Exemplo 1.1 Medir a tensão de uma bateria.

Primeiro deve-se plugar a ponteira vermelha na marcação da tensão e a ponteira preta na marcação COM e depois escolher o modo da leitura da tensão em CC, conforme Figura 1.8.

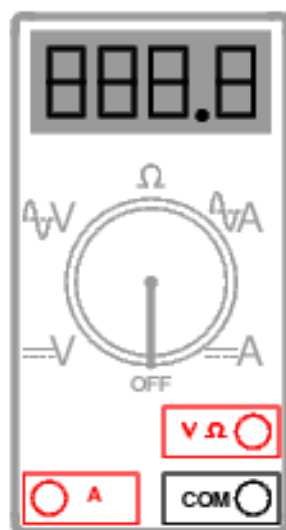


Figura 1.6: Multímetro.

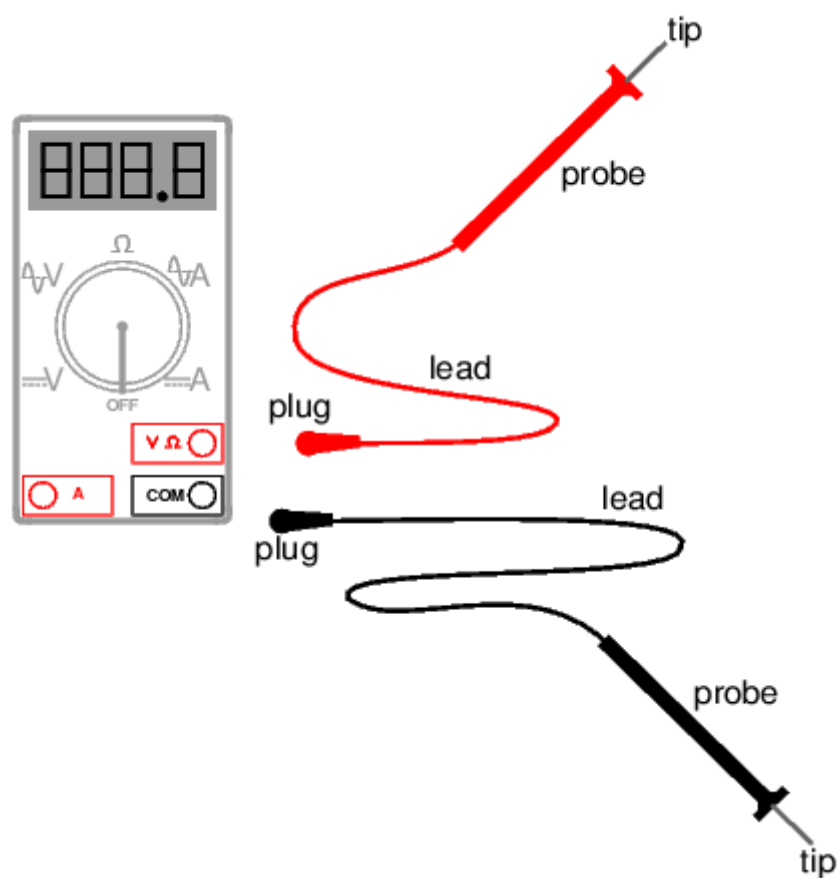


Figura 1.7: Ponteiros do multímetro.

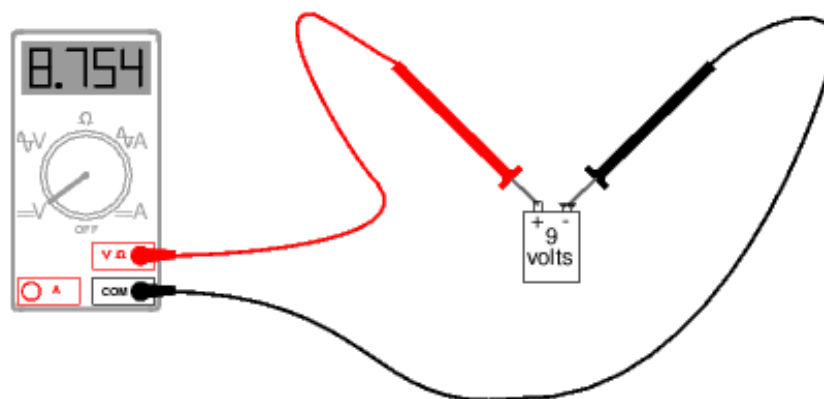


Figura 1.8: Medição da tensão de uma bateria.

Exemplo 1.2 *Medir a tensão de uma tomada CA.*

Neste caso deve-se apenas mudar o modo da leitura para tensão CA no multímetro, conforme Figura 1.9. É imperativo que os terminais das ponteiros não se toquem. Se isso ocorrer, ocasionará um curto-circuito, como mostra a Figura 1.10.

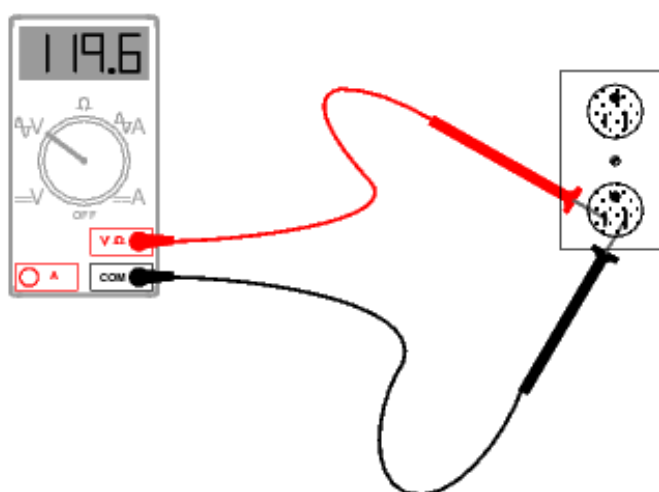


Figura 1.9: Medição da tensão de uma tomada CA.

Exemplo 1.3 *Medir a resistência de um resistor.*

Pluga-se a ponteira vermelha no terminal da tensão/resistência ($V \Omega$), a ponteira preta sempre no terminal COM e escolhe-se o modo de leitura da resistência, conforme Figura 1.11. Um detalhe importante é que o componente deve estar desenergizado, caso contrário pode-se danificar o instrumento.

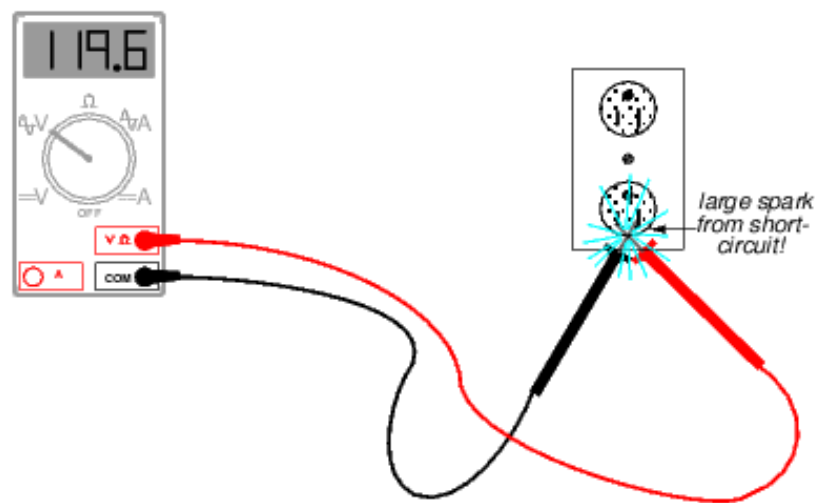


Figura 1.10: Uso incorreto do multímetro.

O multímetro pode ser usado para identificar a continuidade de um cabo/fio (desenergizado), para isso deve-se proceder como na medida da resistência de um resistor, ou seja, se o cabo/fio estiver partido o valor mostrado pelo instrumento será infinito. É importante lembrar que antes da medição de resistências deve-se calibrar o instrumento, curto-circuitando as ponteiros e ajustando o instrumento no zero. Isto é possível através de um botão de calibre.

No modo da resistência quando os terminais das ponteiros são tocados o instrumento deve indicar um valor zero e quando as ponteiros não se tocarem deve indicar um valor de resistência infinita (normalmente no display do instrumento aparece uma abreviação "O.L"), conforme Figura 1.12.

Exemplo 1.4 Medir a corrente do circuito de uma bateria que alimenta uma lâmpada.

Conecta-se o instrumento em série com o circuito, ligando-se a ponteira preta ao terminal negativo da bateria e a ponteira vermelha no terminal de corrente (no ramo da lâmpada) como mostra a Figura 1.13.

Deve-se ter cuidado quando as ponteiros estão conectadas para se medir corrente e se deseja medir tensão. Se isso ocorrer, acontecerá um curto-circuito, conforme ilustrado na Figura 1.14.

Todos os multímetros de qualidade contêm fusíveis com a finalidade de proteção interna que se rompem caso uma sobrecorrente circule por ele. Além disso, o multímetro pode ser usado para checar seu próprio fusível, indicando se o mesmo está rompido ou

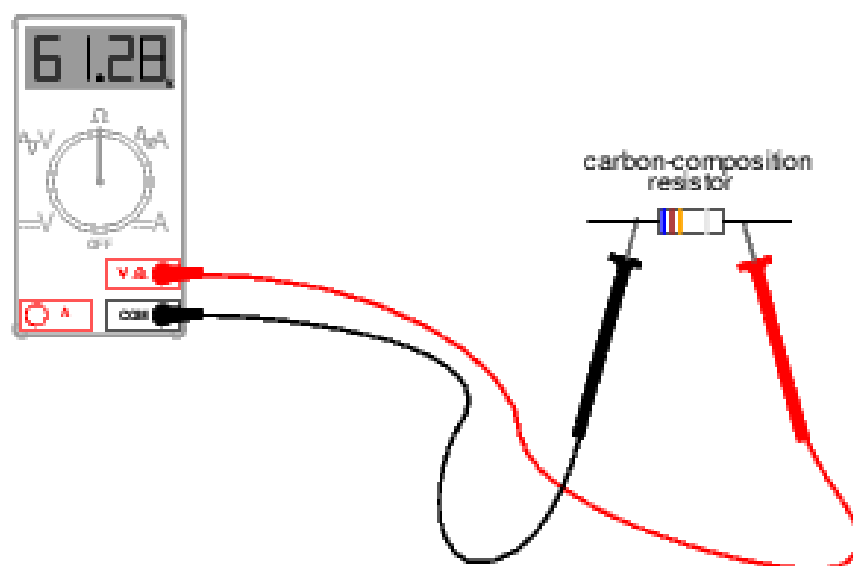


Figura 1.11: Medição de resistência.

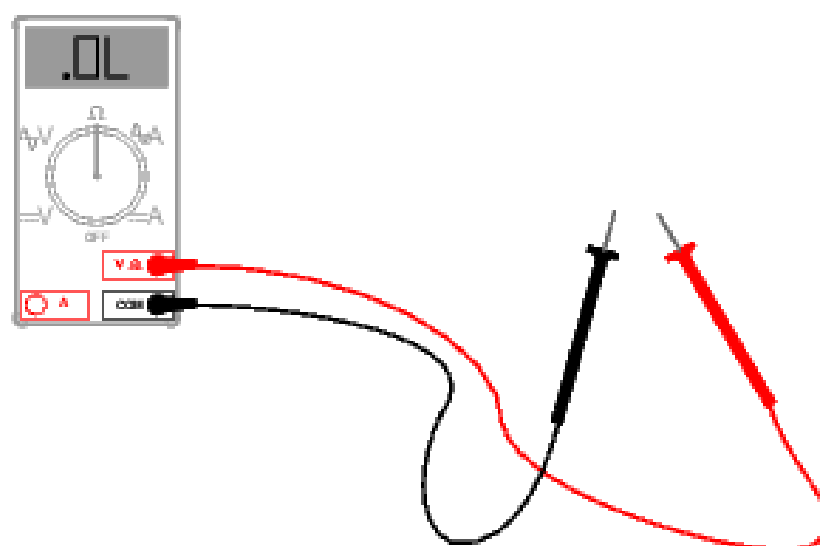


Figura 1.12: Aferição do instrumento.

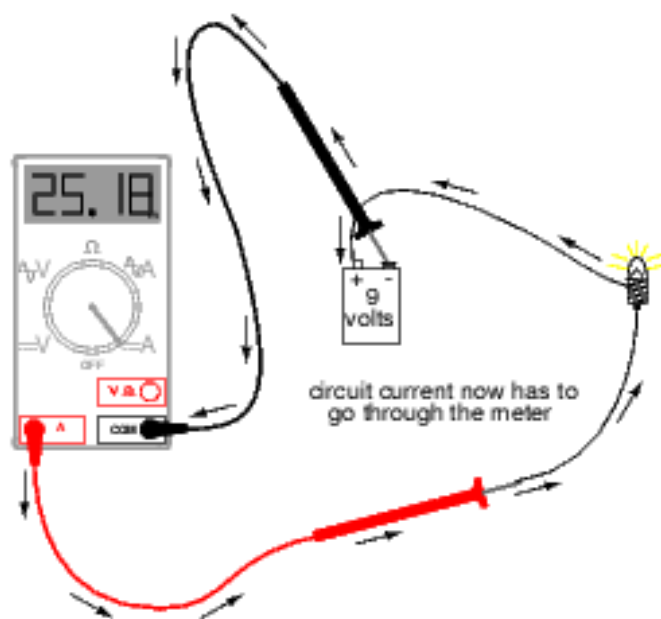


Figura 1.13: Medição de corrente.

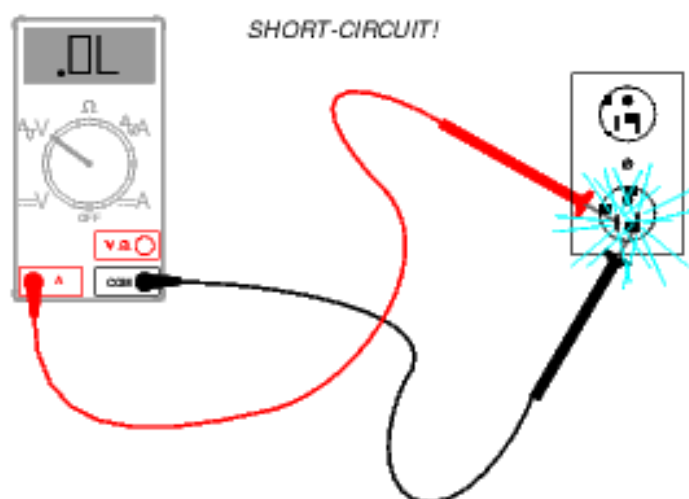


Figura 1.14: Uso incorreto do multímetro ao se medir a tensão.

não. Para isso, deve-se plugar a ponteira preta no terminal de medição de corrente, e a vermelha no terminal de medição de tensão. Em seguida escolhe-se o modo de resistência e junta-se as pontas das ponteiros. Se o fusível estiver em perfeito estado a indicação no display mostrará um pequeno valor de resistência, caso contrário ele sempre mostrará uma indicação "OL", conforme mostra a Figura 1.15.

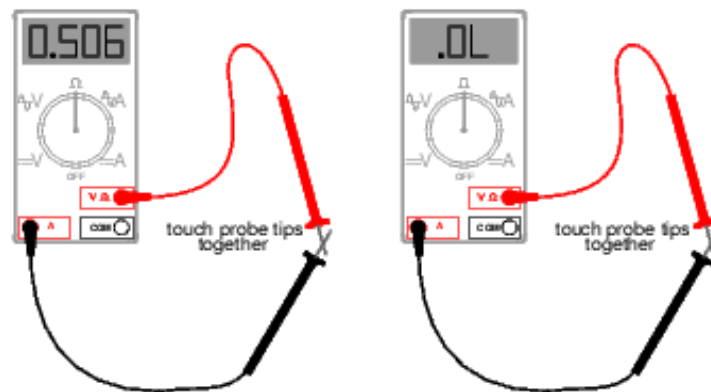


Figura 1.15: Verificação do estado do fusível do multímetro.

1.3 Tensões Senoidais

Na seção anterior aprendemos a manusear o multímetro e vimos que o mesmo é capaz de medir grandezas contínuas (CC) e alternadas (CA) como correntes e tensões. No caso das formas de onda alternadas, o multímetro exibe como medição em seu display digital o valor eficaz da grandeza medida. Por exemplo, se usamos o multímetro para medir a tensão da rede elétrica, o mesmo encontrará um valor próximo de 220 Volts. Esse medição (220 Volts), e o valor eficaz da tensão da rede elétrica. Portanto, essa seção tem o objetivo de definir e conceituar o valor eficaz de uma grandeza elétrica.

Uma fonte de tensão (corrente) senoidal produz uma tensão (corrente) que varia com o tempo. Podemos expressar uma função senoidal através da função seno ou da função co-seno. Para nossa discussão escolhemos a função co-seno. A tensão senoidal é escrita da forma

$$v = V_m \cos(\omega t + \phi) \quad (1.2)$$

Uma função senoidal se repete a intervalos regulares (funções periódicas), Figura 1.16. O tempo necessário para que uma função senoidal complete um ciclo é chamado de **pe-**

ríodo (T). O inverso do período é a **frequência** (f), que é dada em Hz. O coeficiente de t na equação (1.2), ω , é a **frequência angular**.

$$\omega = 2\pi f = 2\pi/T \quad (\text{rad/s})$$

O coeficiente V_m é a **amplitude** da função senoidal e o ângulo ϕ é o **ângulo de fase** da função senoidal e determina o valor da função em $t = 0\text{s}$.

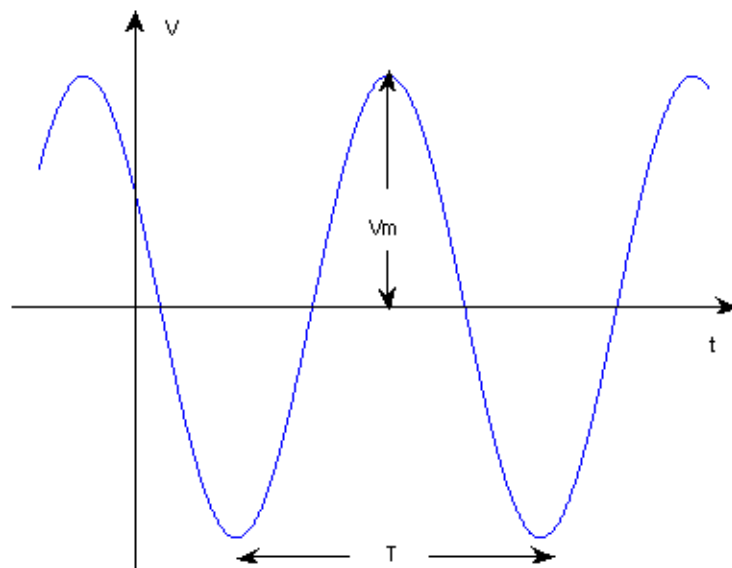


Figura 1.16: Uma tensão senoidal.

1.3.1 Valor Médio ou CC

Para um sinal de tensão ou corrente periódico, cujo valor varia com o tempo, é possível se definir uma média desse sinal. Suponha uma tensão periódica $v(t)$ variante no tempo. Seu valor médio V_{medio} , ou CC, é definido como sua integral em um intervalo dividido pelo seu período. Expressando matematicamente temos:

$$V_{medio} = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v(t) dt, \quad (1.3)$$

onde, T é o período de $v(t)$ e t_0 é um instante arbitrário qualquer.

Alguns sinais de grande interesse apresentam valores médio nulos. Tomemos com

exemplo $v(t) = V_m \cos(\omega t)$. Calculando o seu valor médio obtém-se:

$$V_{medio} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} V_m \cos(\omega t) dt = 0, \quad (1.4)$$

Note que V_{medio} para $v(t) = V_m \cos(\omega t)$ independentemente do valor de A . Assim, $v_1(t) = 10 \cos(\omega t)$ e $v_2(t) = 20 \cos(\omega t)$ têm o mesmo valor médio. Isso torna essa média não muito aplicável a este tipo de sinal. Em geral, o valor CC é utilizado para caracterizar correntes e tensões que não mudam de sinal ao longo do tempo.

1.3.2 Valor eficaz

Para evitar o problema levantado na seção anterior, um outro tipo de média pode ser definida: valor médio quadrático ou valor rms¹. Em circuitos elétricos esta média é geralmente referida como valor eficaz de corrente ou valor eficaz de tensão. Um sinal de tensão/corrente $v(t)$, periódico no tempo cujo período é T , tem seu valor eficaz V_{eficaz} definido como a raiz quadrada do valor médio do quadrado da função. Definindo matematicamente:

$$V_{eficaz} = V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} v^2(t) dt}. \quad (1.5)$$

Calculando-se V_{eficaz} para uma sinal de tensão senoidal/cosseional do tipo $v(t) = V_m \cos(\omega t + \phi)$, tem-se o seguinte resultado:

$$V_{eficaz} = V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} V_m^2 \cos^2(\omega t + \phi) dt} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}. \quad (1.6)$$

1.4 Objetivos da Prática

- Interpretar e aplicar a lei de Ohm aos diferentes circuitos;
- Efetuar medidas com o multímetro, aprendendo a manuseá-lo de forma cuidadosa e correta;
- Montar os circuitos em plataformas dedicadas (*protoboards*), Apêndice A.3, obedecendo às recomendações na montagem dos componentes;
- Interpretar o código de cores padronizados nos diversos resistores;
- Familiarizar-se com os termos **valor médio** e **valor eficaz** para um sinal de tensão e corrente periódica;

¹root mean square

1.5 Práticas de Laboratório

Os materiais necessários às práticas são:

1. Fonte CC
2. Protoboard
3. Gerador de funções
4. Osciloscópio com ponteiros dedicadas
5. Resistores (um de cada): prática 1 ($1,0\text{ k}\Omega$, $220\ \Omega$, $330\ \Omega$, $10\text{ k}\Omega$), prática 2 ($1,2\text{ k}\Omega$, $2,2\text{ k}\Omega$, $3,3\text{ k}\Omega$), prática 4 ($100\text{ k}\Omega$ e $560\text{ k}\Omega$).

1.5.1 Prática 1

Fazer as seguintes anotações na Tabela 1.1:

1. Leitura do código de cores dos resistores.
2. Medir, com o multímetro, a resistência dos componentes.
3. Comparar os valores da leitura e da medição.

Tabela 1.1: Valores das resistências

Resistor	Leitura	Medição	Tolerância (%)	Erro (%)
1	$1\text{k}\Omega$			
2	220Ω			
3	330Ω			
4	$10\text{k}\Omega$			

1.5.2 Prática 2

Dado o circuito, Figura 1.17.

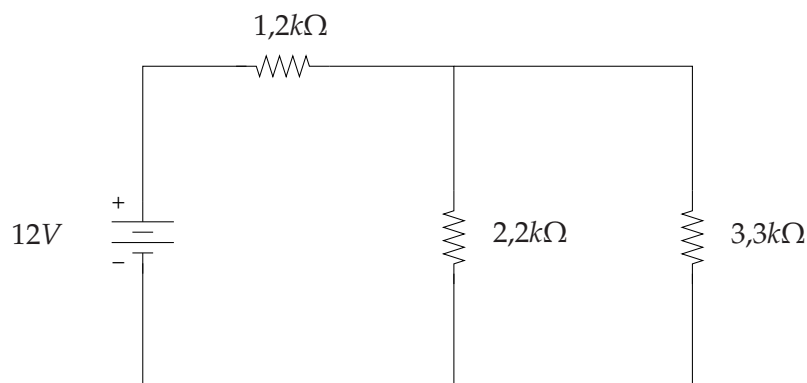


Figura 1.17: Circuito da prática 2.

1. Calcular as tensões em cada elemento do circuito.
2. Calcular as correntes em cada ramo do circuito.
3. Calcular a potência dissipada no resistor de $3,3k\Omega$.
4. Simular o circuito utilizando a biblioteca SimPowerSystems do MATLAB/Simulink. Medir as correntes e tensões em cada elemento resistivo do circuito de acordo com a Figura 1.18.
5. Montar o circuito no protoboard.
6. Medir as tensões sobre cada elemento do circuito e medir a corrente no ramo do resistor de $3,3k\Omega$.
7. Comparar os valores medidos e calculados.

1.5.3 Prática 3

Desenvolver um circuito cuja entrada V_i seja uma tensão CC fixa e a saída V_o seja uma tensão CC ajustável.

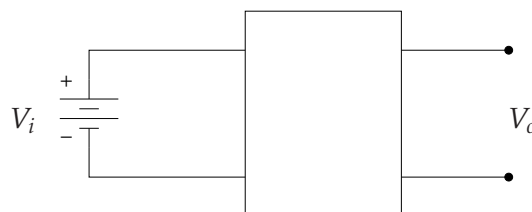
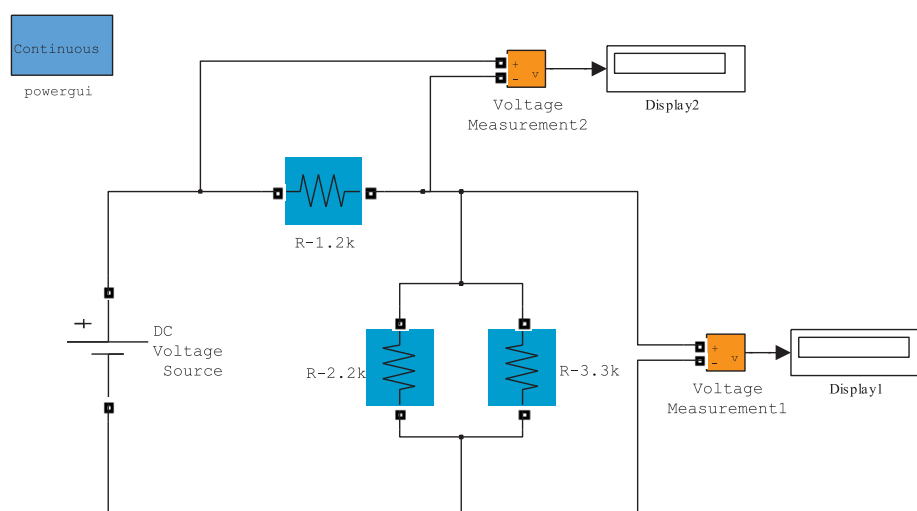
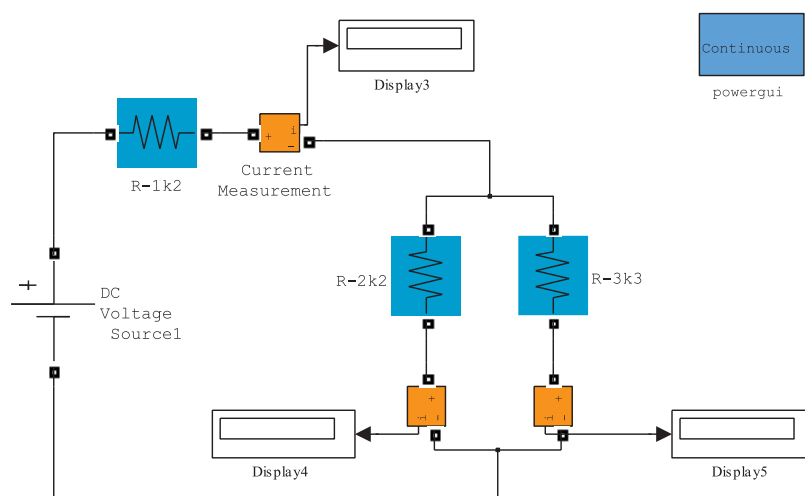


Figura 1.19: Circuito da prática 3.



(a) Circuito com medicao de tensao



(b) Circuito com medicao de corrente

Figura 1.18: Simulação do circuito resistivo da Figura 1.17.

1.5.4 Prática 4

1. Montar o circuito da Figura 1.20

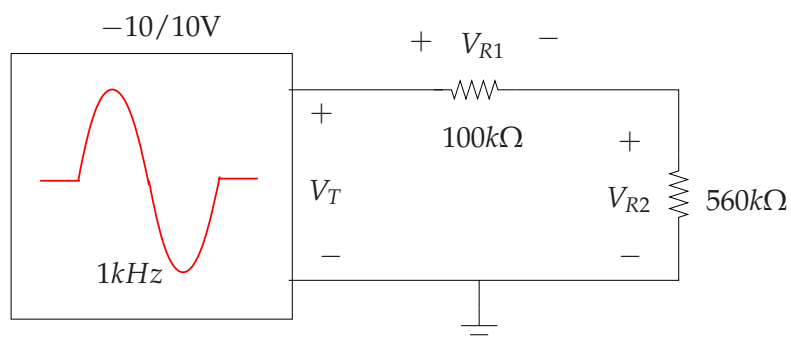


Figura 1.20: Circuito da prática 4.

2. Visualize no osciloscópio a forma de onda das tensões indicadas. Com ajuda do osciloscópio e do multímetro preencha a Tabela 1.2.

Tabela 1.2: Medições do circuito da Figura 1.20

Valor eficaz		Valor de pico		Valor de pico a pico	
V_T		V_T		V_T	
V_{R1}		V_{R1}		V_{R1}	
V_{R2}		V_{R2}		V_{R2}	

Capítulo 2

Fontes de Tensão e de Corrente

2.1 Resumo Teórico - Fontes de Tensão e Corrente [1,2,4]

UMA FONTE DE ELETRICIDADE é um dispositivo capaz de transformar outras formas de energia em energia elétrica e vice-versa. A Figura 2.1 representa uma fonte de tensão e uma de corrente, em que R_s é a resistência interna das fontes.

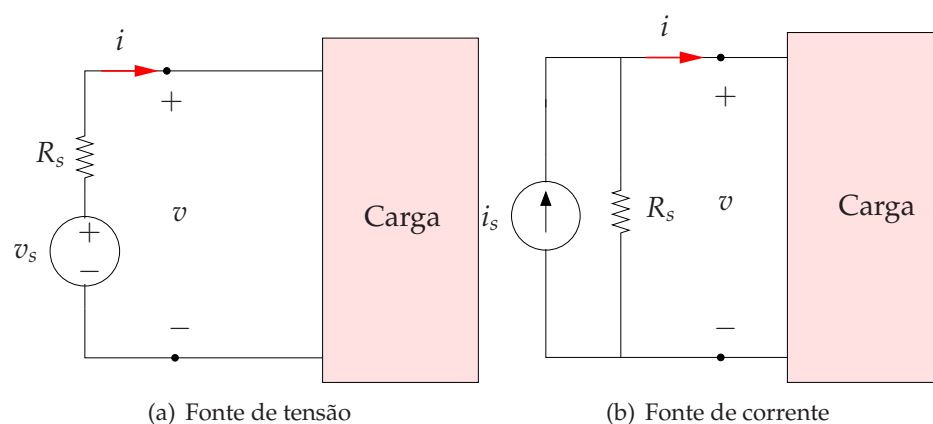


Figura 2.1: Fonte de tensão e corrente

Tem-se que para uma fonte de tensão

$$v_s = v - R_s i \quad (2.1)$$

enquanto que para uma fonte de corrente

$$i_s = i - \frac{v}{R_s} \quad (2.2)$$

Substituindo a equação (2.2) na equação (2.1), tem-se:

$$\begin{aligned} v_s &= v - R_s \left(i - \frac{v}{R_s} \right) \\ &= v - R_s i + v_s \end{aligned}$$

ou ainda

$$i = \frac{v}{R_s} \quad (2.3)$$

Dependendo do valor de R_s , uma curva característica $v \times i$, Figura 2.2, pode ser tomada como representativa de uma *fonte de tensão* ($R_s \ll 1$) ou de uma *fonte de corrente* ($R_s \gg 1$).

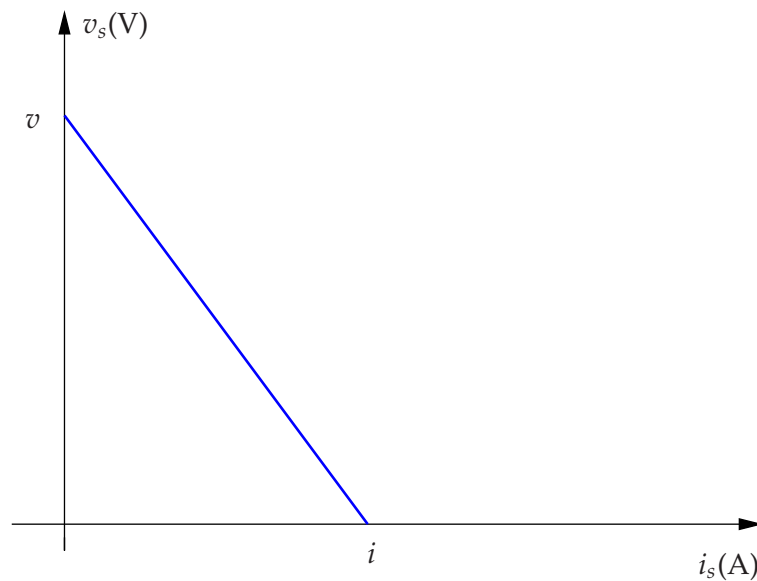


Figura 2.2: Característica $v \times i$ das fontes de tensão ou corrente.

As fontes de tensão ou de corrente devem ter uma faixa de tolerância menor ou igual a 5%, cuja faixa é especificada em função do valor da resistência da carga R_c . Assim, a tolerância de uma fonte de tensão é definida por:

$$\begin{aligned}
t(\%) &= \frac{\Delta v}{v} 100\% \\
&= \left[\frac{v_s - v}{v_s} \right] 100\% \\
&= \left[1 - \frac{v}{v_s} \right] 100\% \\
&= \left[1 - \frac{R_c}{R_c + R_s} \right] 100\% \\
&= \left[\frac{R_s}{R_c + R_s} \right] 100\%
\end{aligned}$$

ou seja, para $t(\%) \leq 5\%$, tem-se que $R_c \geq 19R_s$. Em outras palavras, a resistência interna da fonte de tensão deve ser no mínimo dezenove vezes menor do que a resistência da carga.

Semelhantemente, para o caso de uma fonte de corrente, tem-se:

$$\begin{aligned}
t(\%) &= \frac{\Delta i}{i} 100 \\
&= \left[\frac{i_s - i}{i_s} \right] 100\% \\
&= \left[1 - \frac{i}{i_s} \right] 100\% \\
&= \left[1 - \frac{G_c}{G_c + G_s} \right] 100\% \\
&= \left[\frac{G_s}{G_c + G_s} \right] 100\%
\end{aligned}$$

em que, G_c e G_s são as condutâncias da carga e da fonte, respectivamente. Para $t(\%) \leq 5\%$, tem-se $G_c \geq 19G_s$. Em outras palavras, a resistência interna da fonte de corrente deve ser no mínimo dezenove vezes maior do que a resistência da carga.

2.2 Objetivos das Práticas

- Analisar o comportamento das fontes de sinais quanto a tensão e a corrente de saída para diversos valores de resistência de carga.
- Obter as faixas de operação onde as fontes podem ser caracterizadas como fontes de tensão ou fontes de corrente.

2.3 Práticas de Laboratório

Para as práticas são requeridos os seguintes materiais:

- 1 gerador de funções.
- 1 protoboard.
- 1 osciloscópio com ponteiros dedicadas.
- resistores de 1Ω , $4,7\Omega$, 100Ω , $10k\Omega$, $100k\Omega$, $4,7k\Omega$, $1M\Omega$

2.3.1 Prática 1

- Monte o circuito mostrado na Figura 2.3.
- Ajuste a tensão do gerador em aberto para $8V_{pp}$, senoidal com frequência de $1kHz$.
- Preencha as colunas v e i da Tabela 2.1 para valores de R_c medindo a tensão e a corrente sobre o mesmo.
- Analise o comportamento dos resultados da Tabela 2.1 e faça seus comentários.

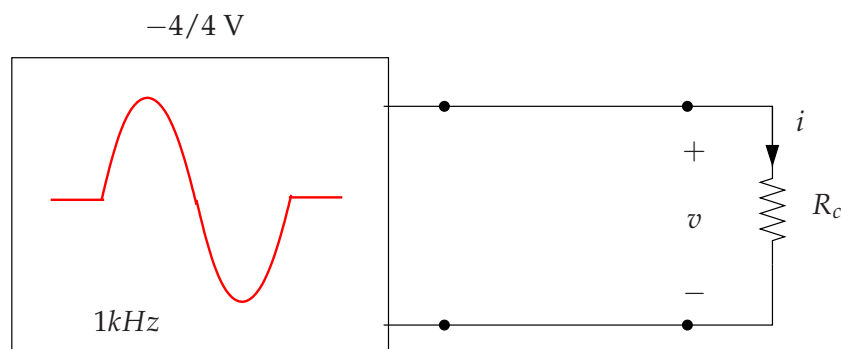


Figura 2.3: Circuito da prática 1.

Tabela 2.1: Tabela da prática 1.

R_c	v	i	R_c/R_s
1Ω			
2Ω			
$4,7\Omega$			
100Ω			
$10k\Omega$			
$100k\Omega$			
$1M\Omega$			

2.3.2 Prática 2

- Monte o circuito mostrado na Figura 2.4.
- Obtenha o valor da resistência interna R_s utilizando o método da comparação de impedâncias assim descrito: utilizando um resistor variável de $1k\Omega$ varie o resistor até que a tensão v seja igual a $4 V_{pp}$. Em seguida retire o resistor variável do circuito e meça o valor de sua resistência. Esse valor é numericamente igual ao valor da resistência interna R_s do gerador de funções.
- De posse do valor encontrado para a resistência interna R_s do gerador de sinal preencha a coluna R_c/R_s da Tabela 2.1. Tendo em vista a figura de mérito $t(\%) < 5\%$, determine para que valores de R_c o gerador de sinal funciona como fonte de corrente e para que valores funciona como fonte de tensão.
- Calcule o rendimento do gerador excitando as cargas resistivas de $4,7\Omega$ e de 100Ω .

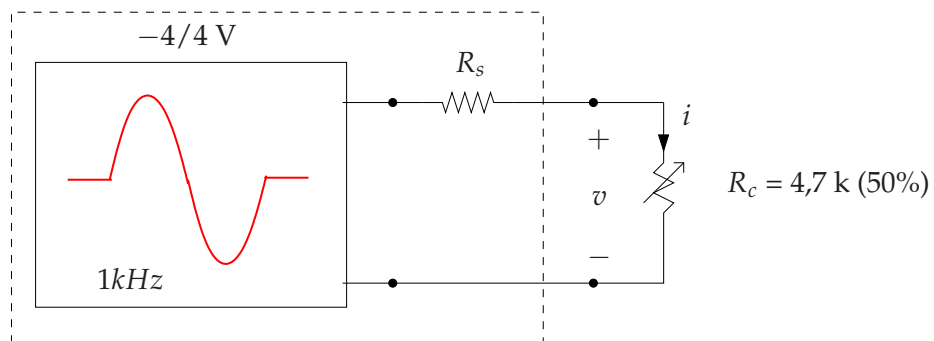


Figura 2.4: Circuito da prática 2.

Capítulo 3

Equivalentes de Thevenin e Norton

3.1 Resumo Teórico - Equivalentes de Thévenin e Norton [1–5]

UM CIRCUITO EQUIVALENTE DE THEVENIN OU NORTON é constituído por uma fonte independente de tensão (corrente), e um resistor em série (paralelo), que substituem todas as fontes e resistores do circuito, Figura 3.1.

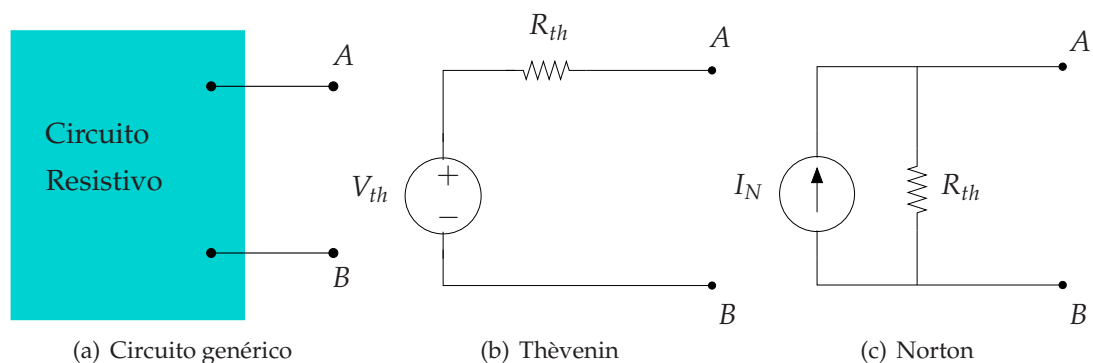


Figura 3.1: Circuitos equivalentes de Thévenin e Norton

Para se poder representar o circuito original pelo seu equivalente de Thévenin, precisa-se determinar a tensão de Thévenin, V_{th} , isso é feito medindo-se a tensão entre os pontos A e B. Em seguida determina-se a resistência de Thévenin, R_{th} , aplicando-se um curto-circuito nos terminais A e B, e medindo-se a corrente de curto, I_{cc} , feito isso, calcula-se a

resistência de Thévenin da seguinte forma:

$$R_{th} = \frac{V_{th}}{I_{cc}} \quad (3.1)$$

O equivalente de Norton é obtido fazendo-se uma transformação de fonte, ou seja,

$$I_N = \frac{V_{th}}{R_{th}} \quad (3.2)$$

em que, I_N corresponde a corrente de Norton.

3.2 Objetivos das Práticas

Mostrar que um determinado circuito resistivo pode ser substituído por um equivalente de Thévenin ou Norton nos terminais de interesse. O equivalente será determinado por medições da tensão de circuito aberto e da corrente de curto-circuito nesses terminais.

3.3 Práticas de Laboratório

Para as práticas serão necessários os seguintes materiais:

- Fonte de alimentação CC com ajuste de tensão e limitação de corrente.
- Multímetro digital.
- Protoboard
- Osciloscópio com ponteiros dedicadas.
- Resistores: 3 de 1,2 kΩ, 2 de 1,8 kΩ, 1 de 2,2 kΩ, 1 de 3,3 kΩ e um último a ser calculado durante a experiência.

3.3.1 Prática 1 (Simulação)

Dado o circuito resistivo da Figura 3.2, simular o mesmo utilizando a biblioteca SimPowerSystems do MATLAB/Simulink e fazer o que se pede abaixo:

- a. Medir nos terminais de saída a tensão V_o , que corresponde a tensão de Thévenin utilizando um scope (biblioteca simulink) como mostra a Figura 3.3).
- b. Curto-circuitar os terminais A e B e medir a corrente de curto I_{cc} como mostra a Figura 3.4.

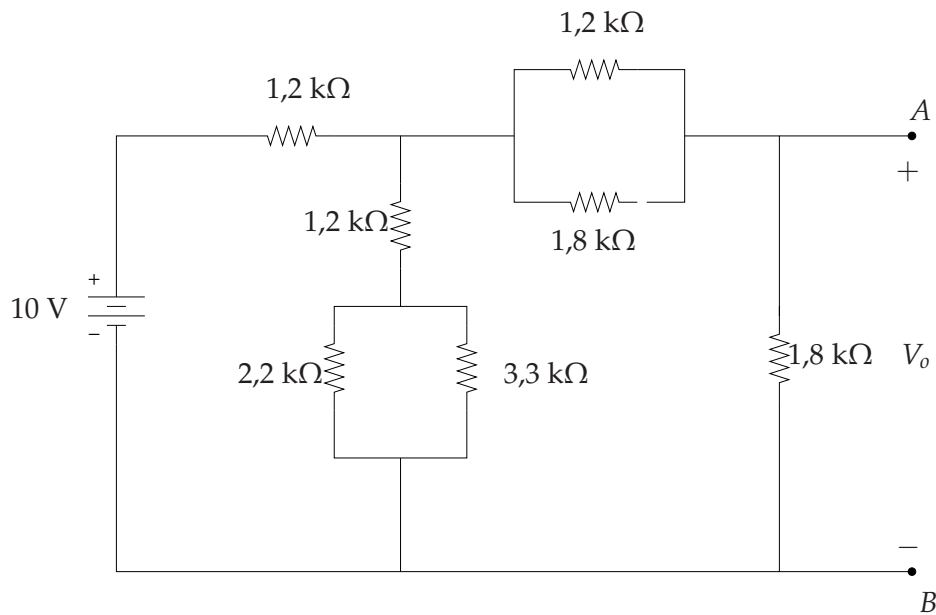


Figura 3.2: Circuito das práticas 1 e 2.

- c. Medir a resistência de Thèvenin de acordo com o mostrado na Figura 3.5.
- d. Anotar os valores simulados de V_o , I_{cc} e R_{eq} na Tabela 3.1.

3.3.2 Prática 2 (cálculos teóricos)

Considerando ainda o circuito da Figura 3.2, calcular:

- a. A tensão de Thèvenin V_o .
- b. A corrente de curto-circuito I_{cc} .
- c. A resistencia equivalente R_{eq} .
- d. Anotar os valores calculados de V_o , I_{cc} e R_{eq} na Tabela 3.1.

3.3.3 Prática 3 (Prática experimental)

Montar o circuito mostrado na Figura 3.2 no protoboard.

- a. Medir nos terminais de saída, com o multímetro digital, a tensão de saída V_o .
- b. Curto-circuitar os terminais A e B e medir com o multímetro a corrente de curto I_{cc} .
- c. Retirar a fonte de alimentação de 10 V, curto circuitando os terminais de conexão da fonte. Medir a resistência nos terminais A e B com o uso do ohmímetro. Essa resistência corresponde a R_{th} .

- d. Anotar os valores de medidos de V_o , I_{cc} e R_{eq} na Tabela 3.1.
- e. Comparar os valores simulados, calculados e medidos Tabela 3.1.

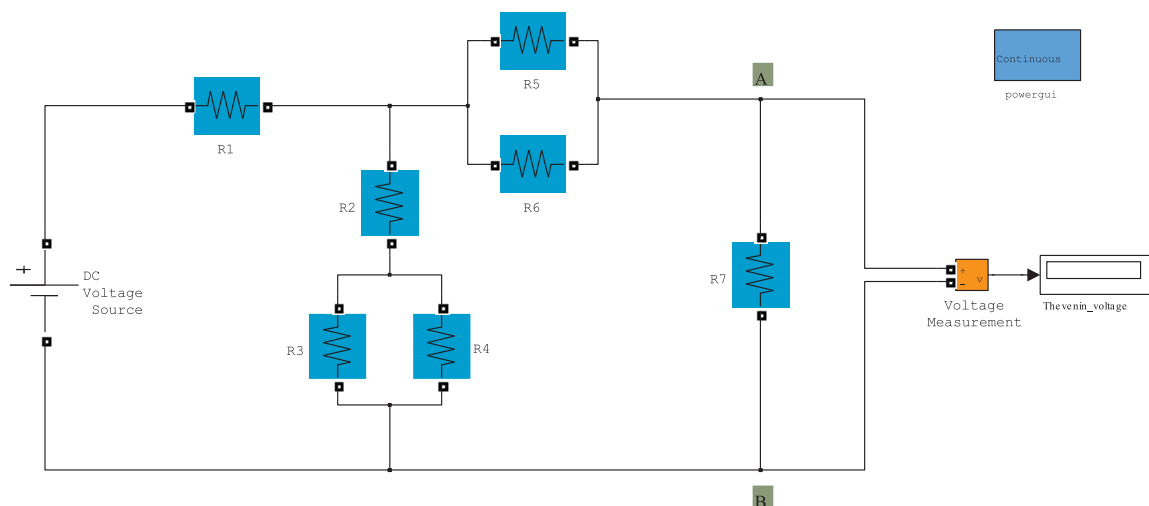


Figura 3.3: Medição da tensão de Thèvenin.

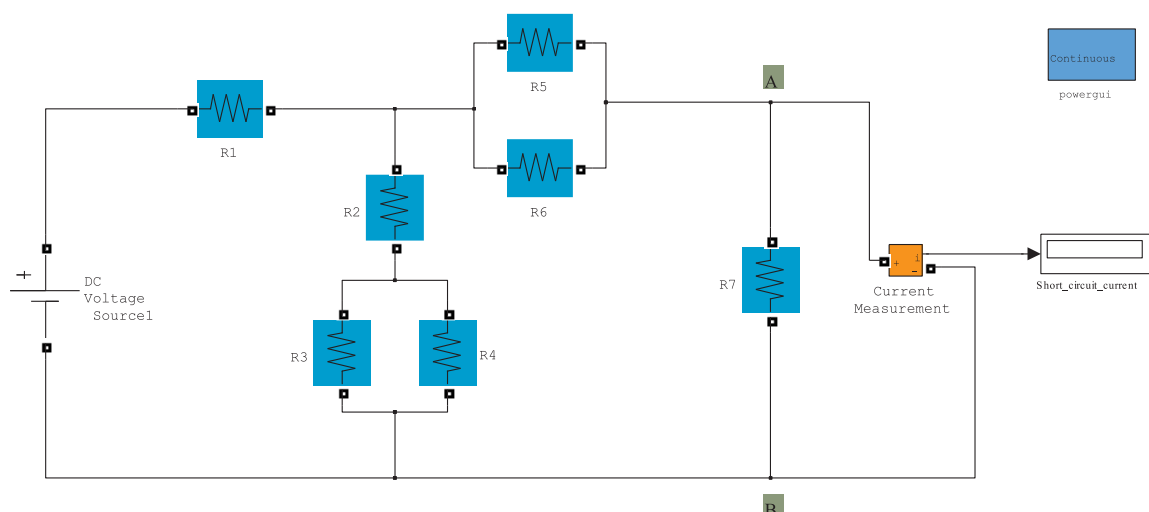


Figura 3.4: Medição da corrente de curto-circuito.

Tabela 3.1: Prática 1.

Variáveis	Valores simulados	Valores medidos	Valores calculados
V_o			
I_{cc}			
R_{eq}			

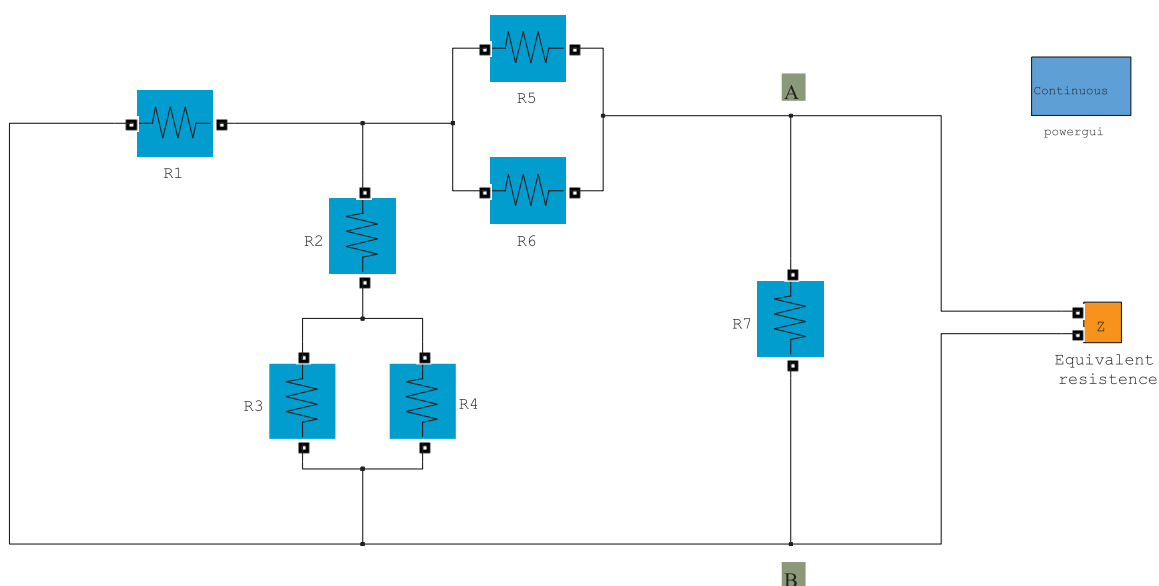


Figura 3.5: Medição da resistência equivalente.

3.3.4 Prática 4

- Para a montagem dos modelo equivalente de Thèvenin utilizar um resistor de valor comercial mais próximo ao calculado.
- Representar esquematicamente o equivalente de Thèvenin, conforme Figura 3.1.
- Montar o circuito equivalente de Thèvenin e medir a tensão nos terminais de saída V_o . Curto circuitar esses terminais e medir a corrente de curto, anotar as medidas efetuadas na Tabela 3.2.
- Comparar os valores das Tabelas 3.1 e 3.2.

Tabela 3.2: Valores medidos nos equivalentes.

Variáveis	Eq. de Thévenin
V_o	
I_{cc}	

Capítulo 4

Fontes Dependentes ou Controladas

4.1 Resumo Teórico - Amplificador Operacional [1,2]

UM AMPLIFICADOR OPERACIONAL (Amp-Op) é um amplificador diferencial de ganho elevado usado para implementar operações matemáticas como integração, diferenciação, adição (daí o nome operacional). No entanto, a aplicação dos Amp-Op's vai além da implementação das operações matemáticas. Uma das razões para a popularidade do Amp-Op é a sua versatilidade. Além disso, os circuitos com Amp-Op trabalham em níveis muito próximos daqueles previstos no projeto teórico.

Na modelagem do circuito de um Amp-Op usa-se o conceito de *fonte dependente* de tensão, que se constitui num elemento ativo cuja quantidade de energia é controlada, ou melhor dizendo, depende de outra tensão de nó.

4.1.1 Terminais de um Amp-Op

O Amp-Op é fabricado em um circuito integrado (CI) conforme mostra a Figura 4.1 para o Amp-Op tipo 741. Do ponto de vista do sinal, o Amp-Op tem três terminais: dois terminais de entrada e um terminal de saída. A Figura 4.2 mostra o símbolo que devemos utilizar para representar o Amp-Op. Os terminais 2 e 3 representam a entrada e o terminal 6 a saída. Além dos sinais, os Amp-Op's devem ser alimentados com uma fonte cc simétrica

(na grande maioria dos casos). Os terminais 7 e 4 são usados para essa finalidade.

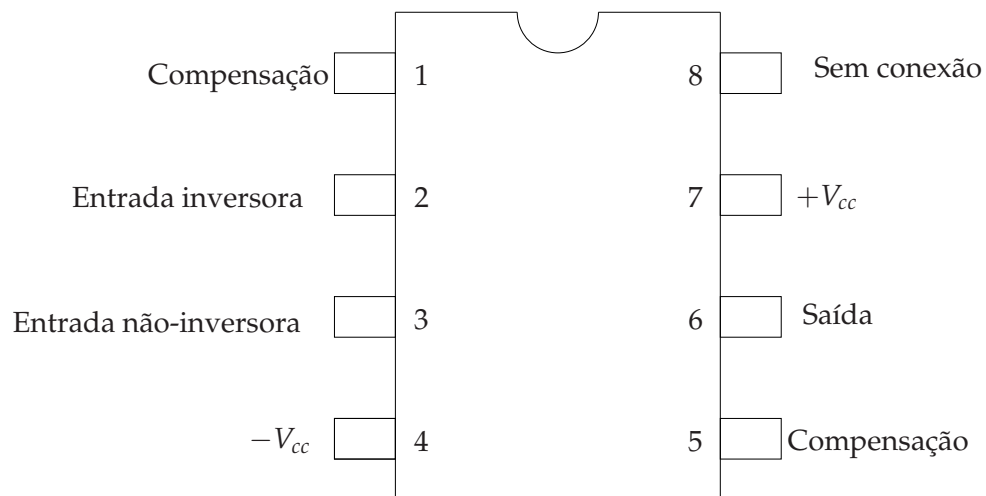


Figura 4.1: Terminais de um CI Amp-Op 741.

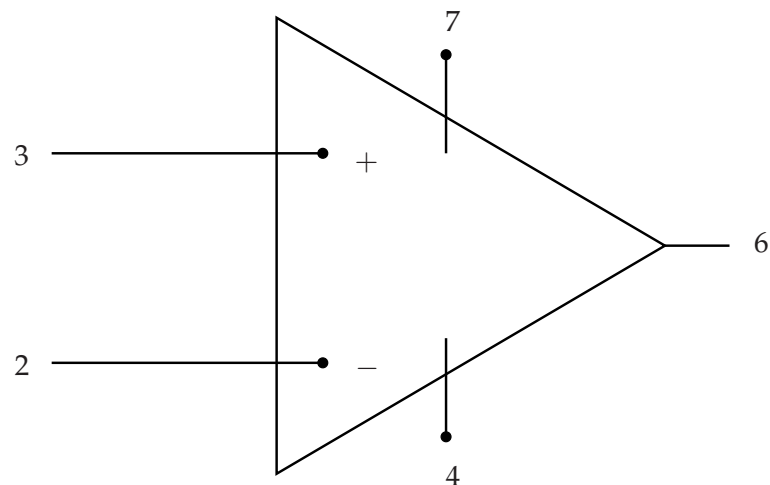


Figura 4.2: Símbolo de um CI Amp-Op 741.

Na Figura 4.3 é mostrado o modelo de um Amp-Op ideal. Um Amp-Op é considerado ideal quando ele possui as seguintes características:

- A resistência de entrada R_i é infinita.
- O ganho de malha-aberta A é infinito.
- A resistência de saída R_o é nula.

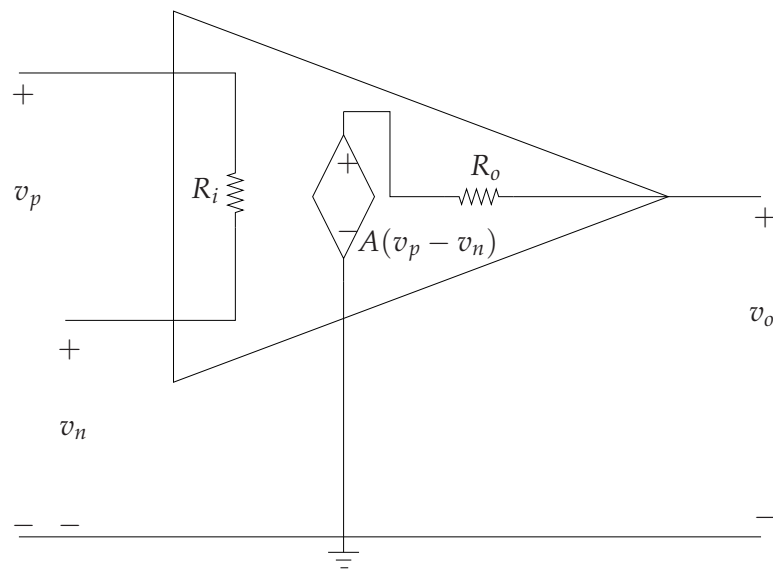


Figura 4.3: Modelo de circuito de um Amp-Op.

Considerando que $R_o = 0$, na análise do circuito, quando elementos de circuitos são conectados externamente aos terminais do AOP, deve-se levar em conta as restrições imposta pelo Amp-Op, são elas:

$$v_o = A(v_p - v_n) \quad (4.1)$$

e

$$-V_{cc} \leq v_o \leq V_{cc} \quad (4.2)$$

O gráfico da Figura 4.4 sintetiza as equações (4.1) e (4.2). Particularmente, v_o deve estar entre os valores limites $\pm V_{cc}$ para que o Amp-Op não sature.

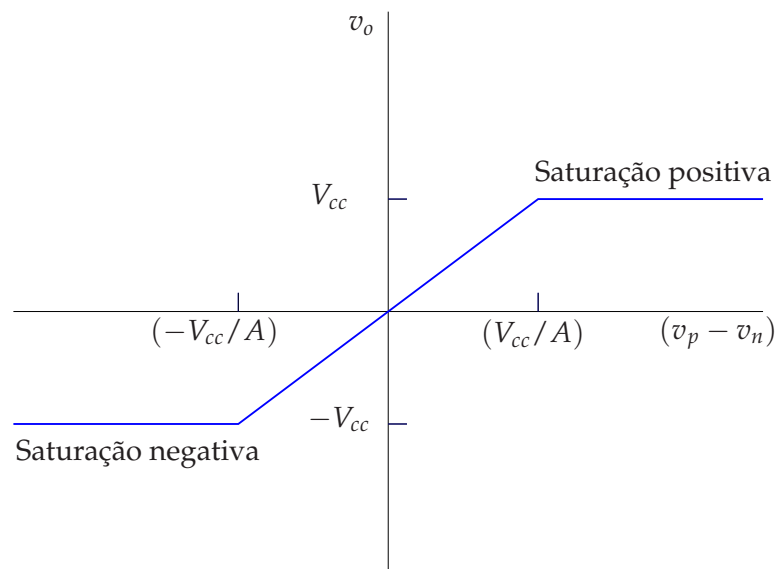


Figura 4.4: Curva de transferência de tensão do Amp-Op.

4.2 Objetivos das Práticas

Nesta prática pretende-se mostrar:

- Como manipular o CI amplificador operacional.
- O comportamento de fontes dependentes ou controladas.

4.3 Práticas de Laboratório

Para essa prática serão necessários os seguintes materiais:

- Gerador de funções.
- Protoboard.
- Osciloscópio com ponteiros dedicadas.
- CI LM741.
- Resistores de $100k\Omega$, $20k\Omega$, $2,2k\Omega$, $4,7k\Omega$ e $3,3k\Omega$.

4.3.1 Prática 1

O circuito da Figura 4.5 é referente a um amplificador operacional na configuração inversora.

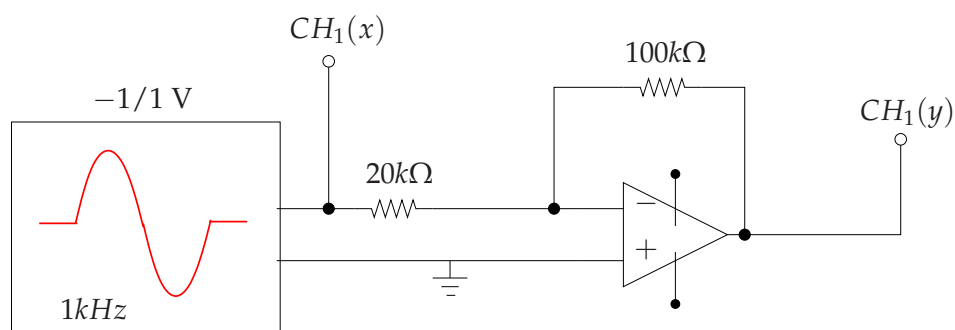


Figura 4.5: Circuito amplificador na configuração inversora.

- a. Simular o circuito utilizando a biblioteca SimPowerSystems do MATLAB/Simulink de acordo com a Figura 4.6. Ajustar o gerador de sinais para $2 V_{pp}$, frequência de 1 kHz , senoidal.

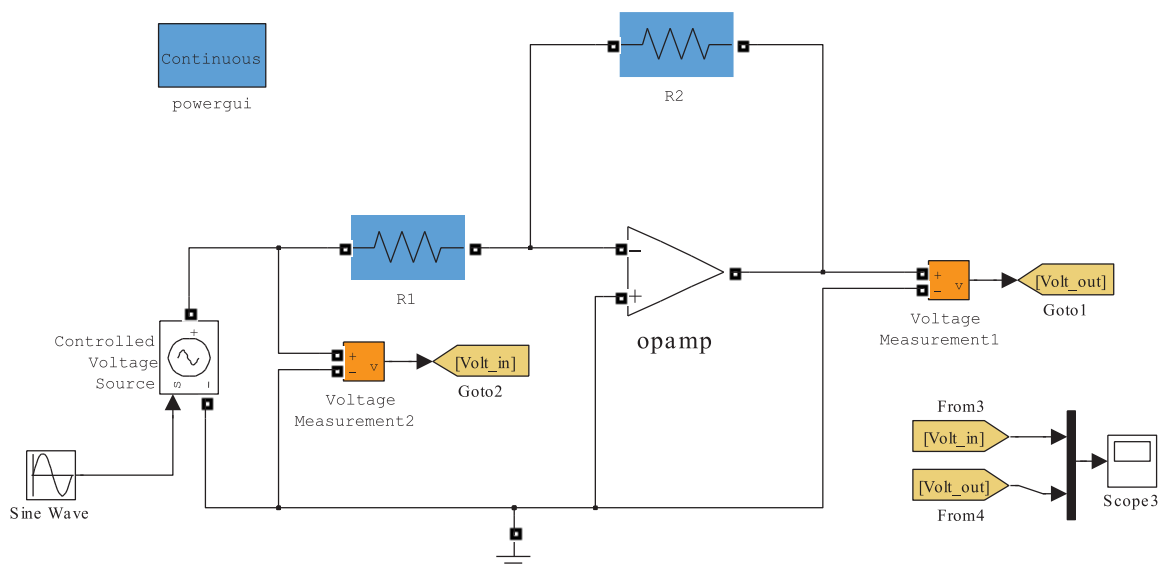


Figura 4.6: Simulação do amplificador operacional na configuração inversora.

- b. Montar o circuito da Figura 4.5 com os mesmos parâmetros de simulação.
- c. Verificar se as formas de onda simuladas são compatíveis com as encontradas no experimento.
- d. Monte o circuito da Figura 4.7. Qual a sua relação com o circuito da Figura 4.5 ?
- e. Calcule os valores RMS de V_x e I_x .
- f. Verifique os resultados com os instrumentos de medidas.

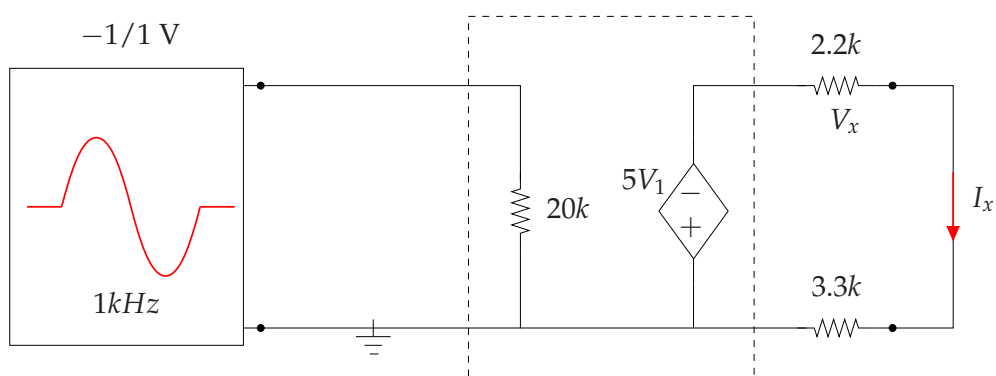


Figura 4.7: Circuito com fonte dependente de tensão.

4.3.2 Prática 2

A Figura 4.8 é referente a um circuito amplificador somador.

1. Simular o circuito utilizando a biblioteca SimPowerSystems do MATLAB/Simulink de acordo com a Figura 4.9. Os resistores R_a e R_b valem respectivamente 200Ω e 100Ω .
2. Montar o circuito da Figura 4.8 com os mesmos parâmetros de simulação.
3. Verificar se as formas de onda simuladas são compatíveis com as encontradas no experimento.

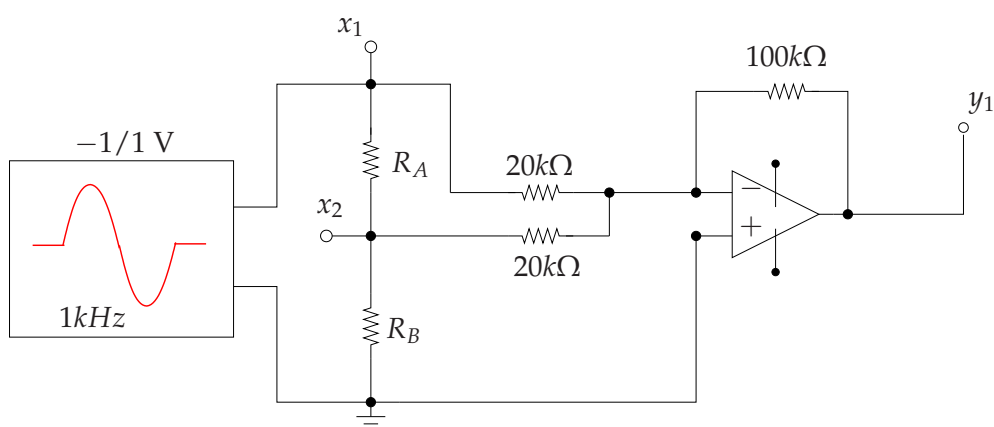


Figura 4.8: Circuito amplificador somador.

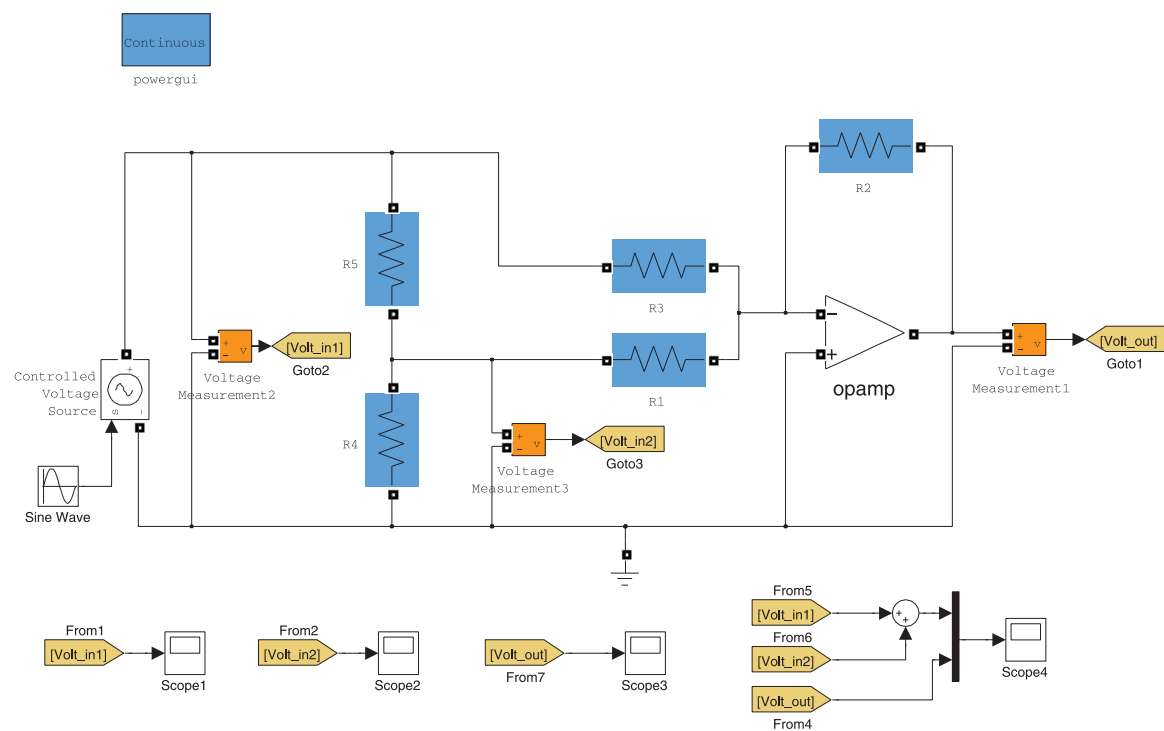


Figura 4.9: Simulação do circuito amplificador somador.

Capítulo 5

Circuitos RC

5.1 Resumo Teórico - Circuitos RC [1–5]

SEJA O CIRCUITO MOSTRADO NA FIGURA 5.1, no qual o capacitor linear invariante com capacitância C é carregado ao potencial V_o por uma fonte de tensão constante. Em $t = 0$, que chamamos de instante inicial, a chave k_1 é aberta e a chave k_2 é fechada simultaneamente. Assim, o capacitor carregado é desligado da fonte e ligado ao resistor R , em $t = 0$. Em virtude da carga armazenada no capacitor ($Q_o = CV_o$) haverá uma corrente especificado pelo sentido de referência assumido para $i(t)$ na Figura 5.1. A carga do capacitor decrescerá gradualmente até se tornar nula; com a corrente ocorre o mesmo. Durante o processo, a energia elétrica armazenada no capacitor é dissipada sob a forma de calor no resistor.

Após a operação das chaves, tem-se que

$$\begin{aligned} i_c(t) + i_R(t) &= 0 \\ C \frac{dv_c}{dt} + \frac{v_c}{R} &= 0 \end{aligned} \quad (5.1)$$

A equação (5.1) é uma equação diferencial linear de primeira ordem homogênea, cuja

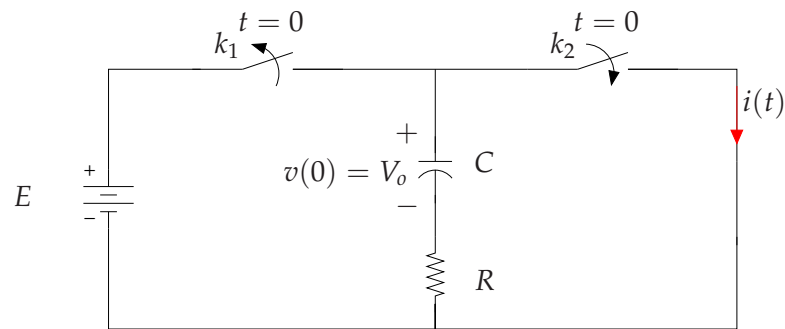


Figura 5.1: Um capacitor carregado é ligado a um resistor.

solução é da forma exponencial

$$v_c(t) = K e^{\alpha t} \quad (5.2)$$

em que $\alpha = -\frac{1}{\tau}$, $\tau = RC$ é a constante de tempo do circuito e K é uma constante a ser definida pela condição inicial.

Fazendo $t = 0$ na equação (5.2) obtemos que $K = v(0) = V_o$. Portanto, a solução do problema é dada por

$$v_c(t) = V_o e^{-(1/RC)t} \quad t \geq 0 \quad (5.3)$$

Enquanto que a corrente no capacitor será dada por

$$\begin{aligned} i_c(t) &= C \frac{dv_c}{dt} \\ &= -\frac{V_o}{R} e^{-(1/RC)t} \quad t \geq 0 \end{aligned} \quad (5.4)$$

A tensão $v_c(t)$ está traçada na Figura 5.2 e na Figura 5.3 é traçada a corrente no capacitor.

5.2 Objetivo da Prática

Trabalhar com um circuito que seja possível observar o comportamento de carregamento e descarregamento de um capacitor, bem como sua constante de tempo.

5.3 Prática de Laboratório

Para essa prática serão necessários os seguintes equipamentos e componentes:

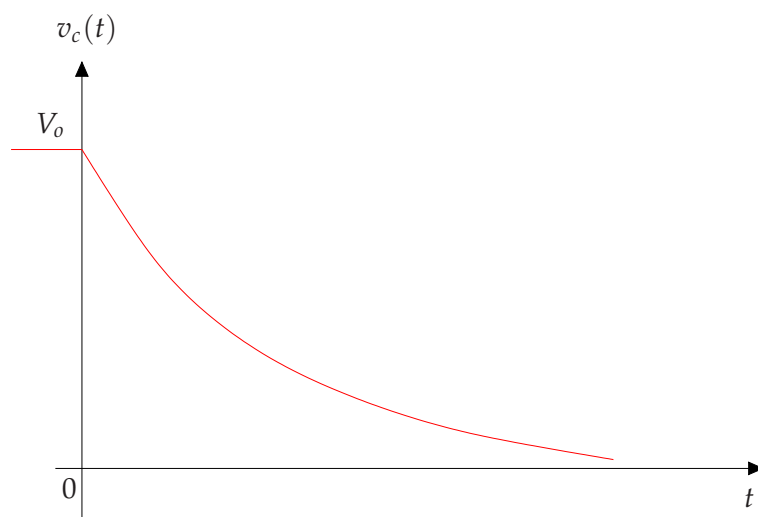


Figura 5.2: Tensão no capacitor da Figura 5.1.

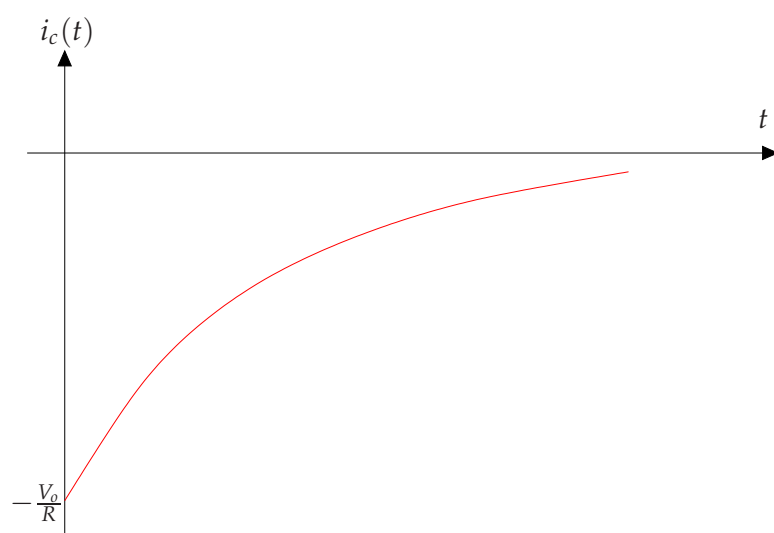


Figura 5.3: Corrente no capacitor da Figura 5.1.

- Gerador de funções.
- Protoboard.
- Osciloscópio com ponteiros dedicadas.
- Resistores de $39\text{ k}\Omega$, $390\text{ }\Omega$.
- Capacitores de $5,6\text{ nF}$, 22 nF .

5.3.1 Prática 1

Dado o circuito da Figura 5.4.

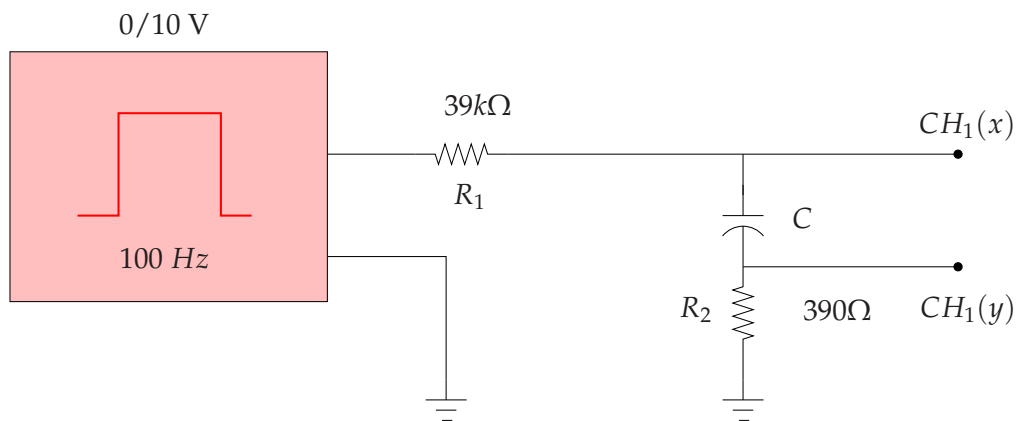


Figura 5.4: Circuito da prática 1.

1. Simular o mesmo utilizando a biblioteca SimPowerSystems do MATLAB/Simulink de acordo com a Figura 5.5. Selecione a fonte de tensão para uma onda quadrada com frequência de 100 Hz e amplitude de 10 V . O resistor R_1 e o capacitor são os componentes principais do circuito RC; o resistor R_2 é usado apenas para possibilitar a medição da corrente no circuito com o osciloscópio e deve ser escolhido de modo a introduzir um erro desprezível, ou seja, R_2 deve ser muito menor do que R_1 (use $R_2 \simeq R_1/100$).

5.3.2 Prática 2

Montar o circuito mostrado na Figura 5.4.

1. Usando o gerador de funções, ajuste a fonte de tensão para a onda quadrada com frequência de 100 Hz e amplitude de 10 V .

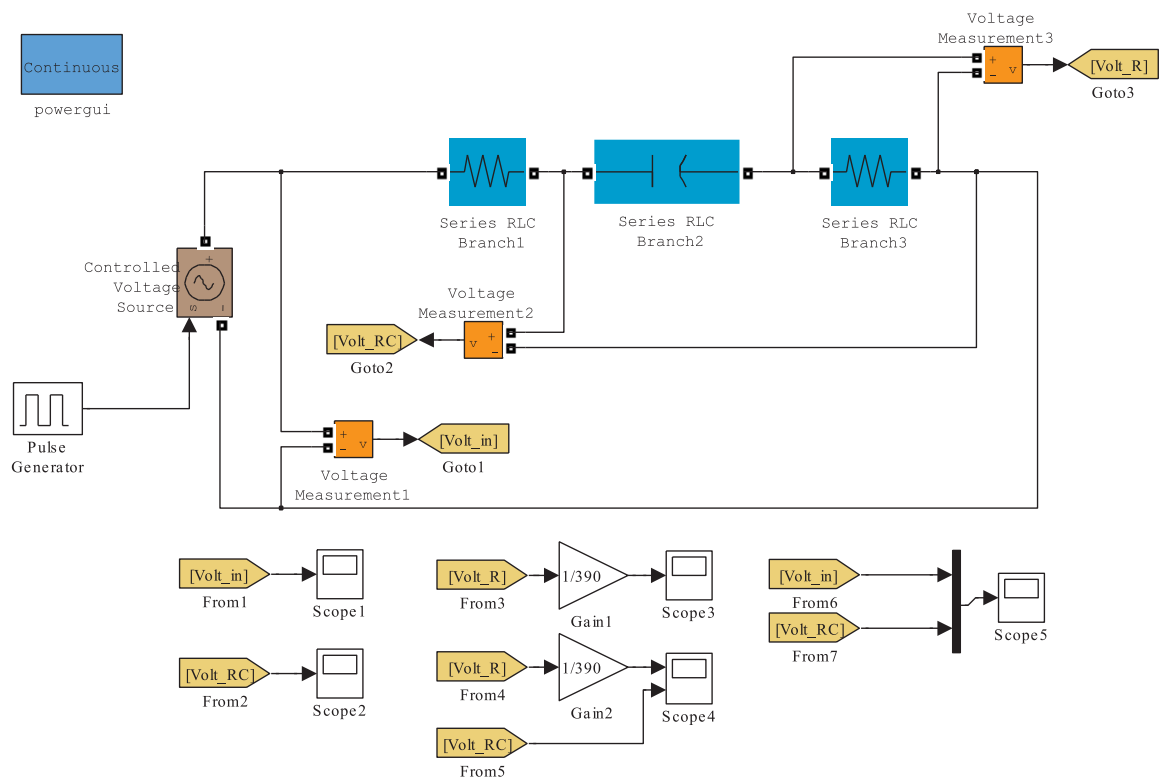


Figura 5.5: Simulação de um circuito RC.

- Os canais 1 e 2 do osciloscópio devem ser ligados nos pontos indicados $CH_1(x)$ e $CH_1(y)$, respectivamente, e no terra. O canal 1 fornecerá a leitura da tensão no capacitor e o canal 2 a leitura da corrente.
- Ajuste as escalas de tempo e amplitude do osciloscópio de modo a obter uma melhor precisão nas medidas (utilize a ponta de prova X_1). Escolha o sincronismo com a subida do canal 2.
- Meça a tensão e a corrente no capacitor em função da constante de tempo $\tau = R_1 C$. Considere $t = 0$ o tempo correspondente ao pico positivo da corrente do circuito.

Tabela 5.1: Medidas do circuito da Figura 5.1

	$t = 0$		$t = 0,5\tau$		$t = \tau$		$t = 2\tau$	
$R_1 = 39k\Omega$	V	I	V	I	V	I	V	I
$C = 5,6nF$								
$C = 22nF$								

- Utilizando as equações (5.3) e (5.4) calcule os valores de tensão e corrente para cada valor de t e C da Tabela 5.1.

6. Compare os valores calculados com os valores medidos e assinale os casos em que o erro é maior do que 20%, opine sobre as prováveis fontes de erro.
7. Desenhe num mesmo gráfico a tensão e a corrente no capacitor para um dos casos da Tabela 5.1.

Capítulo 6

Circuitos RLC

6.1 Resumo Teórico - Circuitos RLC [1–5]

AS ANÁLISES DO CIRCUITOS RLC normalmente são feitas considerando-se a resposta à *excitação nula* ou a um *degrau* considerando as ligações em série ou paralelo dos componentes R , L e C .

Neste capítulo abordaremos apenas o comportamento dos circuitos RLC submetidos a um degrau unitário para a ligação série e paralelo dos seus componentes.

6.1.1 Ligação Série

A aplicação da LKT¹ ao circuito da Figura 6.1 conduz a seguinte equação

$$\begin{aligned} v_R + v_L + v_C &= v_s \\ Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt + V_0 &= v_s \end{aligned} \quad (6.1)$$

Diferenciando a equação (6.1), obtém-se

¹Lei de Kirchhoff para as Tensões

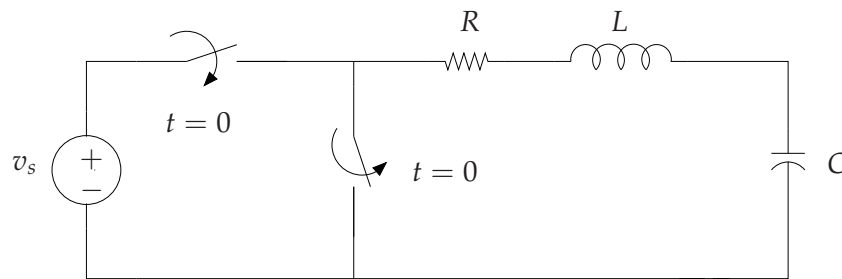


Figura 6.1: Circuito RLC série.

$$\begin{aligned} L \frac{di^2}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{i}{C} &= 0 \\ \frac{di^2}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{di}{dt} + \frac{i}{LC} &= 0 \end{aligned} \quad (6.2)$$

Esta é uma equação diferencial de segunda ordem homogênea de coeficientes constantes. O *polinômio característico* para essa equação diferencial é

$$\begin{aligned} s^2 + \frac{R}{L}s + \frac{1}{LC} &= 0 \\ s^2 + 2\alpha s + \omega_0^2 &= 0 \end{aligned} \quad (6.3)$$

com $\alpha \triangleq \frac{R}{2L}$ e $\omega_0 \triangleq \frac{1}{\sqrt{LC}}$. O parâmetro α é chamado de **constante de amortecimento** (em radianos por segundo) e o parâmetro ω_0 é chamado de **frequência de ressonância** (angular).

Os zeros do polinômio característico são chamados de raízes características, elas são

$$s_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}$$

A forma da resposta depende dos valores de α e ω_0 , ou seja

1. Circuito superamortecido ($\alpha > \omega_0$)
2. Circuito criticamente amortecido ($\alpha = \omega_0$)
3. Circuito subamortecido ($\alpha < \omega_0$)

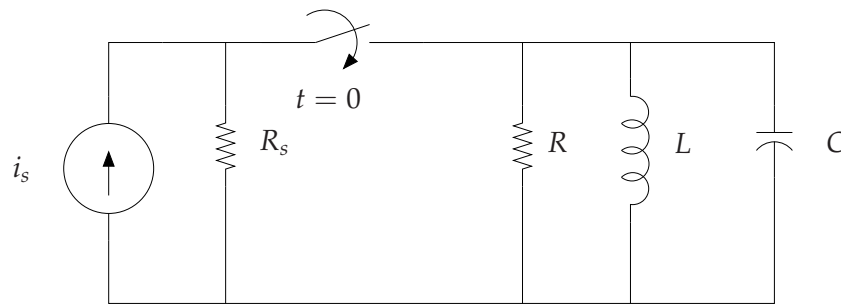


Figura 6.2: Circuito RLC paralelo.

6.1.2 Ligação Paralelo

Para o circuito RLC em paralelo, Figura 6.2, tem-se

$$i_R + i_L + i_C = i_s$$

Definindo $R = R_1 \parallel R_s$ tem-se:

$$\frac{v}{R} + \frac{1}{L} \int v dt + I_0 + C \frac{dv}{dt} = i_s \quad (6.4)$$

Diferenciando, obtém-se

$$\begin{aligned} C \frac{dv^2}{dt^2} + \frac{1}{R} \frac{dv}{dt} + \frac{v}{L} &= 0 \\ \frac{dv^2}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{dv}{dt} + \frac{v}{LC} &= 0 \end{aligned} \quad (6.5)$$

As expressões da constante de amortecimento e frequência de ressonância para o circuito RLC paralelo são $\alpha \triangleq \frac{1}{2RC}$ e $\omega_0 \triangleq \frac{1}{\sqrt{LC}}$, respectivamente.

6.2 Objetivo das Práticas

Analisar o comportamento de um circuito RLC submetido a um degrau de tensão, registrando seus estados sub, sobre e criticamente amortecidos.

6.3 Práticas de Laboratório

Para as práticas serão necessários os seguintes equipamentos e componentes.

- Gerador de funções.
- Protoboard.

- Osciloscópio com ponteiras dedicadas
- Resistor a ser calculado.
- Indutor de 1 mH .
- Capacitor de 100 nF .

6.3.1 Prática 1

Dado o circuito RLC série da Figura 6.3.

1. Calcular R para os três tipos de amortecimento, anotando-os na Tabela 6.1.

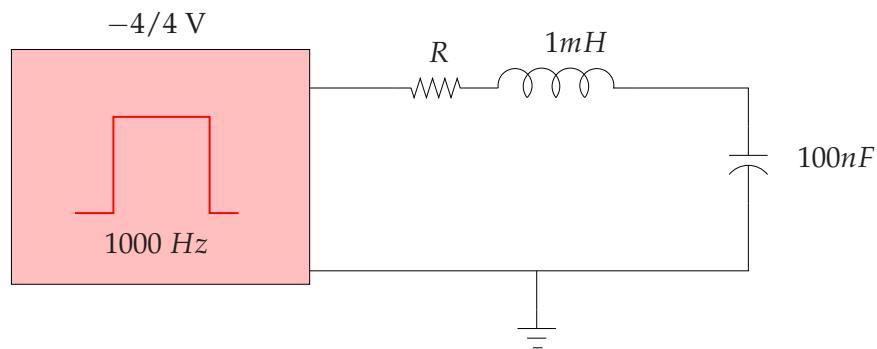


Figura 6.3: Circuito da prática 1.

Tabela 6.1: Valores da resistência R da Figura 6.3

	Valores de R
Subamortecido ($\alpha < \omega_0$)	
Criticamente amortecido ($\alpha = \omega_0$)	
Superamortecido ($\alpha > \omega_0$)	

2. Simular o circuito RLC utilizando a biblioteca SimPowerSystems do MATLAB/Simulink para os 3 casos mostrados na Tabela 6.1 como mostra a Figura 6.4.
3. Comparar a tensão no capacitor com a tensão de entrada do circuito. Além disso, visualizar as formas de onda de tensão no resistor e indutor.
4. Montar utilizando o protoboard, o circuito RLC série da Figura 6.3.
5. Observar no osciloscópio as formas de onda de tensão no resistor, indutor e capacitor.
6. Comparar os resultados teóricos e simulados com os experimentais.

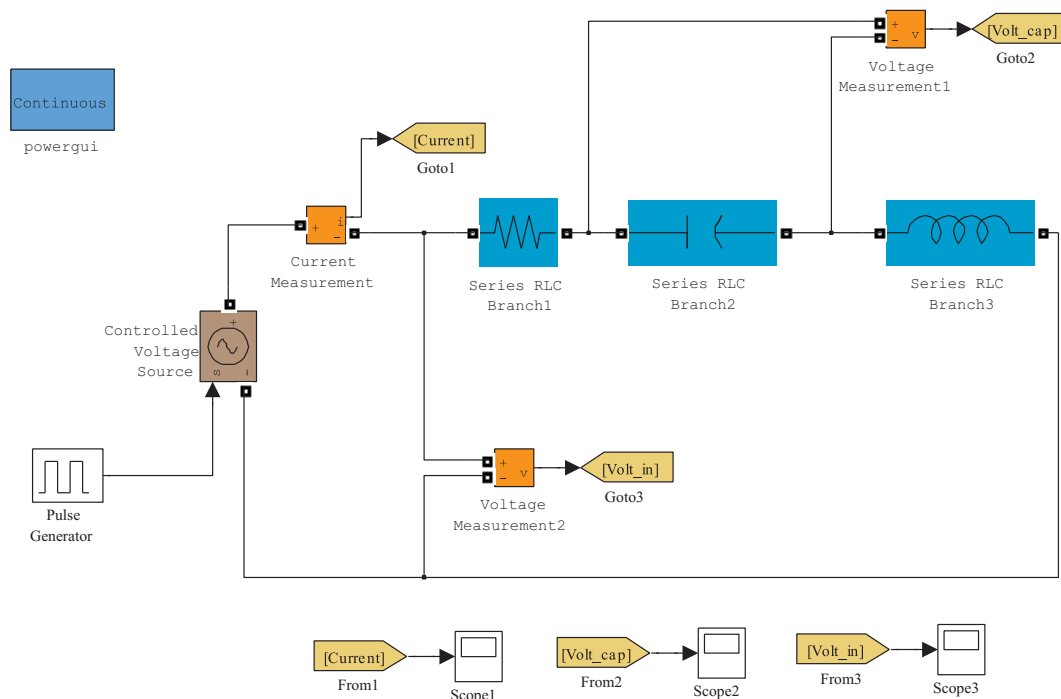


Figura 6.4: Simulação do circuito da prática 1.

- Calcule a frequência de ressonância f_0 do circuito da Figura 6.3. Coloque um resistor $R = 100\Omega$ e ajuste a fonte de sinal para a forma de onda quadrada na frequência de ressonância calculada. Observe simultaneamente no osciloscópio as formas de onda na entrada do circuito (fonte de sinal) e na saída (tensão no capacitor). Qual a forma de onda observada na saída? Explique.

6.3.2 Prática 2

Dado o circuito RLC paralelo da Figura 6.5.

- Calcular R para os três tipos de amortecimento, anotando-os na Tabela 6.2.
- Simular o circuito RLC paralelo utilizando a biblioteca SimPowerSystems do MATLAB/Simulink para os 3 casos mostrados na Tabela 6.2 como mostra a Figura 6.6.
- Comparar as correntes no indutor com a correntes de entrada do circuito para os 3 casos da Tabela 6.2. Além disso, visualizar as formas de onda de corrente no resistor e capacitor.
- Montar no protoboard o circuito RLC paralelo da Figura 6.5 fazendo uma transformação de fonte entre os terminais A e B.

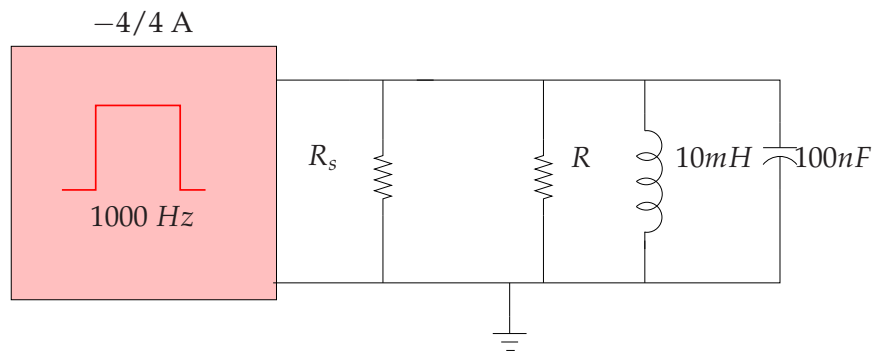


Figura 6.5: Circuito da prática 2.

5. Observar no osciloscópio as formas de onda de tensão no resistor, indutor e capacitor.
6. Comparar os resultados teóricos e simulados com os experimentais.

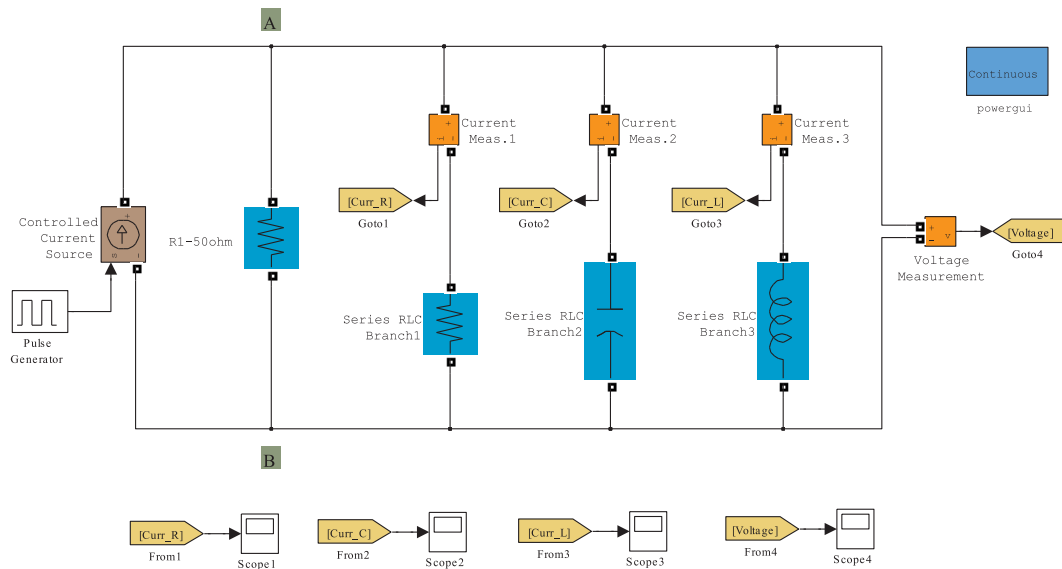


Figura 6.6: Simulação do circuito da prática 2.

Tabela 6.2: Valores da resistência R da Figura 6.5

	Valores de R
Subamortecido ($\alpha < \omega_0$)	
Criticamente amortecido ($\alpha = \omega_0$)	
Superamortecido ($\alpha > \omega_0$)	

Capítulo 7

Circuitos AC em regime permanente

7.1 Resumo teórico - As Leis de Kirchhoff utilizando fasores [1]

As Leis de Kirchhoff constituem importante ferramenta para análise de circuitos elétricos. Na prática 1 foi verificado experimentalmente que estas leis podem ser aplicadas para obtenção dos valores de tensão e corrente em circuitos de corrente contínua. Na presente prática será verificada a aplicação da LKT em circuitos de corrente alternada em regime permanente descritos por fasores.

Sabemos que as Leis de Kirchhoff são válidas para as tensões e correntes no domínio do tempo assim como para a excitação complexa correspondente. Considere uma malha de um circuito arbitrário cujas tensões em cada elemento de circuito são dadas por $V_n \cos(\omega t + \phi_n)$, $n = 1, 2, 3, \dots, N$. Neste caso, as excitações complexas correspondentes em cada elemento de circuito são $V_n e^{j(\omega t + \phi_n)}$, $n = 1, 2, 3, \dots, N$. Aplicando a LKT na referida malha tem-se:

$$V_1 e^{j(\omega t + \phi_1)} + V_2 e^{j(\omega t + \phi_2)} + \dots + V_N e^{j(\omega t + \phi_N)} = 0, \quad (7.1)$$

dividindo ambos os membros pelo fator $e^{j\omega t}$, tem-se:

$$V_1 e^{j\phi_1} + V_2 e^{j\phi_2} + \dots + V_N e^{j\phi_N} = 0. \quad (7.2)$$

Observe que $V_n e^{j\phi_n}$ corresponde ao fasor $\mathbf{V}_n = V_n \angle \phi_n$ no qual, V_n corresponde ao valor de

pico ou o valor rms do sinal de tensão e $\angle\phi_n$ corresponde a fase desse sinal. Substituindo-se os fasores na Eq. 7.2 obtém-se:

$$\mathbf{V}_1 + \mathbf{V}_2 + \dots + \mathbf{V}_N = 0, \quad (7.3)$$

que constitui na forma fasorial da LKT. Note que a LKT fazendo uso de grandezas complexas definida na Eq 7.3 utiliza somas fasoriais, em lugar das somas algébricas vista na forma padrão da LKT (LKT no domínio do tempo). Observe também que há apenas uma frequência presente no circuito conforme indicado na Eq. 7.1.

7.2 Equivalente de Thevenin para circuitos reativos [1]

Na prática 5, os teoremas de rede de Thevenin e de Norton foram aplicados em circuitos resistivos para obtenção de circuitos equivalentes. Estes teoremas também podem ser usados, com alguns ajustes, para análise de circuitos contendo elementos reativos como capacitores e indutores. O procedimento adotado para obtenção de circuitos equivalentes contendo elementos reativos é similar ao adotado para circuitos resistivos que foi investigado na Prática 5. As mudanças consistem na substituição da tensão de circuito aberto (V_{th}), da corrente de curto circuito (I_{cc}) e da resistência de Thevenin (R_{th}) por suas representações fasoriais $\mathbf{V}_{th}$, $\mathbf{I}_{cc}$ e $\mathbf{Z}_{th}$. Feitas essas substituições, o processo de obtenção dos circuitos equivalentes de Thevenin e Norton seguem o mesmo procedimento discutido na Prática 5. Note também que a aplicação direta dos equivalentes de Thevenin e Norton em circuitos reativos somente é possível em circuitos lineares excitados por apenas uma frequência.

Do ponto de vista experimental, obter circuitos equivalentes de Thevenin e Norton contendo elementos reativos exige um esforço extra uma vez que grandezas fasoriais são necessária para obtenção desses equivalentes. As grandezas fasoriais são definidas por módulo e fase. Assim, para se obter $\mathbf{V}_{th}$, $\mathbf{I}_{cc}$ e $\mathbf{Z}_{th}$ duas medições são necessárias, uma para se obter o módulo, e outra para se obter a fase do fasor de interesse.

7.3 Objetivo das Práticas

- Verificar a aplicação das leis de Kirchhoff em circuitos regime permanente AC utilizando a análise fasorial.
- Verificar a aplicação do teorema de Thevenin em circuitos regime permanente AC contendo elementos reativos.

7.4 Práticas de Laboratório

Nas práticas serão necessários os seguintes equipamentos e componentes:

- 1 protoboard
- 1 osciloscópio
- 1 multímetro
- capacitores de $1\mu\text{F}$ e 1nF
- indutor de $10\mu\text{H}$
- resistores de 1Ω e $5\text{k}\Omega$

7.4.1 Prática 1

1. Simule o circuito da Figura 7.1 usando a biblioteca SimPowerSystems do MATLAB/Simulink e meça as tensões rms em todos os elementos do circuito.
2. Monte o circuito da Figura 7.1

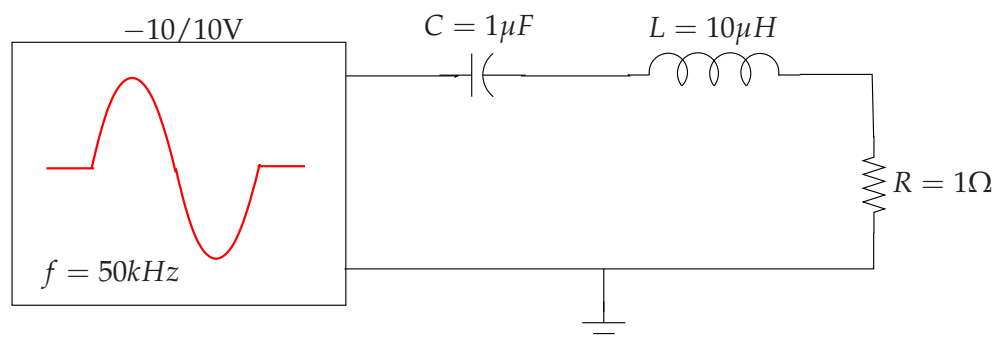


Figura 7.1: Circuito da prática 1.

3. Repita o mesmo procedimento, desta vez experimentalmente, medindo as tensões rms em todos os elementos do circuito e preencha a tabela 7.1 com os valores medidos.

Tabela 7.1: Valores rms medidos nos elementos do circuito da Fig. 7.1

	V_{fonte}	$V_{\text{capacitor}}$	V_{indutor}	V_{resistor}
Valores rms (simulados)				
Valores rms (medidos)				

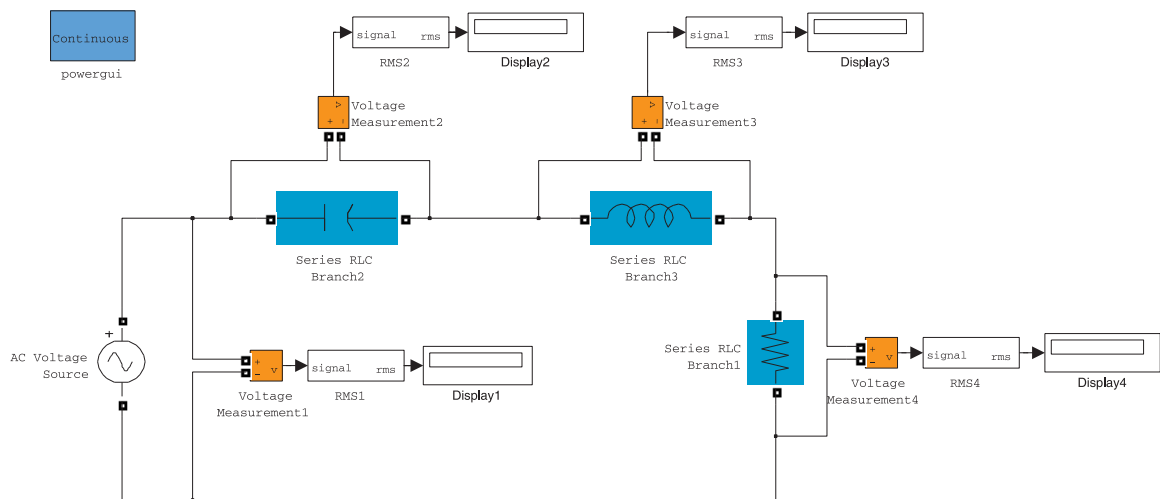


Figura 7.2: Simulação do circuito da Figura 7.1.

4. Compare o valor de tensão medido na fonte (V_{fonte}) com o valor de tensão medido no indutor ($V_{indutor}$). Comente e discuta sobre os valores encontrados.
5. Aplique a LKT na malha do circuito da Fig. 7.1 utilizando os valores anotados na tabela 7.1. A LKT é verificada com estes valores? Justifique.

7.4.2 Prática 2

1. Monte o circuito da Figura 7.3

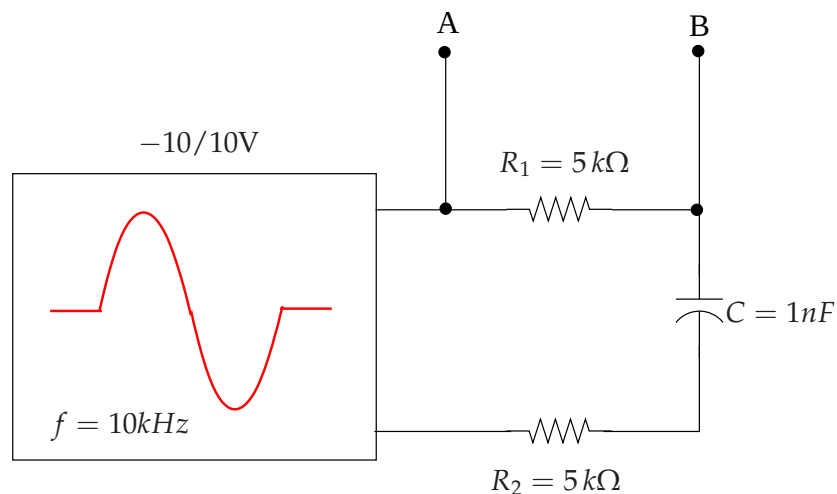


Figura 7.3: Circuito da prática 2.

2. Proponha um procedimento experimental, utilizando apenas o multímetro, para medição do módulo da impedância equivalente de Thevenin ($|Z_{TH}|$) vista dos terminais A-B.

3. Utilize o procedimento proposto e encontre $|Z_{TH}|$.
4. Proponha um procedimento experimental para medição do ângulo ($\angle Z_{TH}$) da impedância equivalente de Thevenin vista dos terminais A-B.
5. Utilize o procedimento proposto no item anterior e encontre $\angle Z_{TH}$.

Capítulo 8

Fator de potência em circuitos com elementos reativos

8.1 Resumo Teórico [1–5]

SUPONHA QUE UMA FUNÇÃO SENOIDAL é dada por:

$$v(t) = V_m \text{sen}(\omega t) \quad (8.1)$$

onde a amplitude da senóide é V_m , a frequência é ω . Uma expressão em seno mais geral é dada por:

$$v(t) = V_m \text{sen}(\omega t + \phi) \quad (8.2)$$

onde ϕ é o ângulo de fase ou simplesmente fase. Um desenho de 8.2 é mostrado na Figura 8.1 por linhas cheias, enquanto o desenho de 8.2 é mostrado em tracejado. A curva cheia é simplesmente a curva tracejada deslocada de ϕ/ω ou ϕ radianos para a esquerda. Portanto, pode-se dizer que 8.2 está adiantada por ϕ rad.

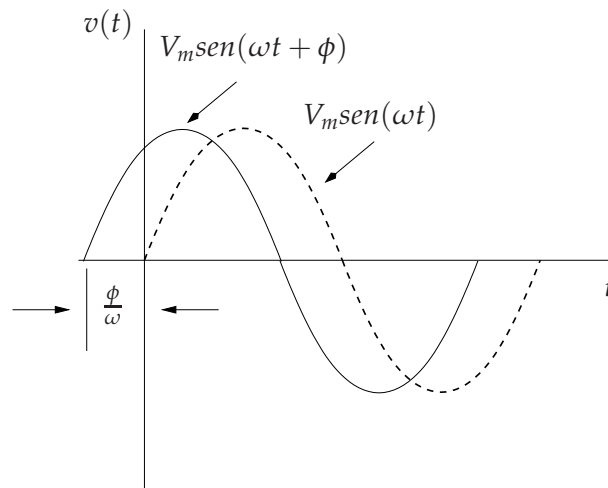


Figura 8.1: Duas senóides com fases diferentes.

8.2 Relação tensão-corrente para fasores nos elementos reativos

8.2.1 Indutância

No indutor a relação tensão-corrente é dada por:

$$v = L \frac{di}{dt} \quad (8.3)$$

onde v e i são definidos como:

$$v = V_m \cos(\omega t + \phi) \quad (8.4)$$

$$i = I_m \cos(\omega t + \theta) \quad (8.5)$$

Substituindo a tensão ($V_m e^{j(\omega t + \phi)}$) e a corrente ($I_m e^{j(\omega t + \theta)}$) complexas em 8.3 temos:

$$V_m e^{j(\omega t + \phi)} = L \frac{d}{dt} [I_m e^{j(\omega t + \theta)}]$$

$$V_m e^{j\omega t} e^{j\phi} = j\omega L I_m e^{j\omega t} e^{j\theta}$$

$$V_m e^{j\phi} = j\omega L I_m e^{j\theta}$$

$$\mathbf{V} = j\omega L \mathbf{I} \quad (8.6)$$

então a tensão fasorial $\mathbf{V}$ é proporcional a corrente fasorial $\mathbf{I}$ com o fator de proporcionalidade $j\omega L$. Se a corrente no indutor é dada por $i = \omega L I_m \cos(\omega t + \phi + 90^\circ)$ e $\mathbf{V} = (j\omega L)\mathbf{I}$, a tensão fasorial é

$$\mathbf{V} = (j\omega L)(I_m \angle \phi) \quad (8.7)$$

$$\mathbf{V} = \omega L I_m \angle \phi + 90^\circ \quad (8.8)$$

note que $j = 1 \angle 90^\circ$. No domínio do tempo temos:

$$v = \omega L I_m \cos(\omega t + \phi + 90^\circ) \quad (8.9)$$

comparando este resultado com $i = I_m \cos(\omega t + \phi)$ vemos que para o indutor a corrente está atrasada da tensão de 90° (Figura 8.2).

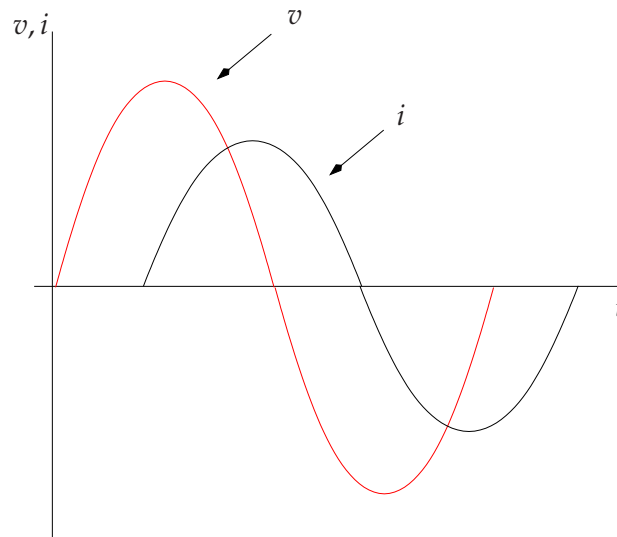


Figura 8.2: Formas de onda de tensão e corrente para um indutor.

8.2.2 Capacitância

No capacitor a relação tensão-corrente é dada por

$$i = C \frac{dv}{dt} \quad (8.10)$$

Substituindo a corrente e a tensão complexas na relação no domínio do tempo, obtemos

$$I_m e^{j(\omega t + \phi)} = C \frac{d}{dt} [V_m e^{j(\omega t + \theta)}] \quad (8.11)$$

$$I_m e^{j(\omega t)} e^{j\phi} = C j \omega V_m e^{j(\omega t)} e^{j\theta} \quad (8.12)$$

$$I_m e^{j\phi} = j\omega C V_m e^{j\theta} \quad (8.13)$$

$$\mathbf{I} = j\omega C \mathbf{V} \quad (8.14)$$

$$\mathbf{V} = \frac{1}{j\omega C} \mathbf{I} \quad (8.15)$$

Se a tensão no capacitor é dada por $v = V_m \cos(\omega t + \theta)$, temos

$$\mathbf{I} = (j\omega C)(V_m \angle \theta) \quad (8.16)$$

$$\mathbf{I} = \omega C V_m \angle \theta + 90^\circ \quad (8.17)$$

Portanto a corrente está adiantada da tensão de 90° (Figura 8.3).

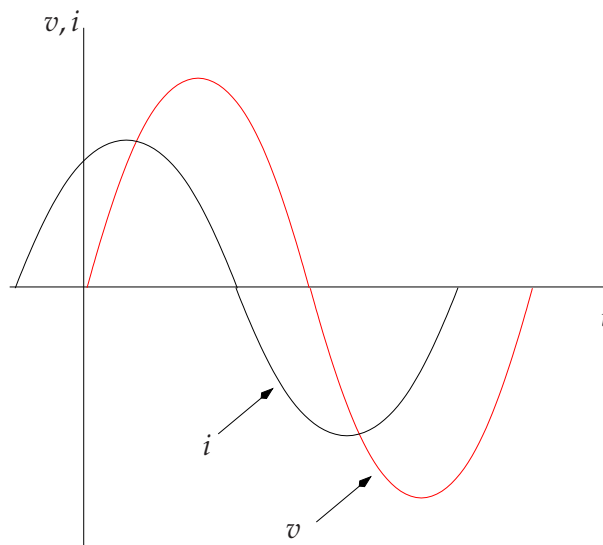


Figura 8.3: Formas de onda de tensão e corrente para um capacitor.

8.3 Potência média e fator de potência

A Potência média entregue a uma carga em regime permanente c.a. é:

$$P = V_{eficaz} I_{eficaz} \cos \theta \quad (8.18)$$

Logo, a potência é igual ao produto da tensão eficaz, pela corrente eficaz e pelo cosseno do ângulo entre os fasores da tensão e da corrente. Na prática, tensões e correntes eficazes

são de fácil medição e seu produto, $V_{eficaz}I_{eficaz}$, é chamado de potência aparente. A potência aparente é normalmente referida em termos de suas unidades, voltamperes (VA) ou kilovoltamperes (kVA), de forma a se evitarem enganos e confusão com a unidade de potência média, o watt. É óbvio que a potência média não pode nunca ser superior a potência aparente. A relação da potência média para a potência aparente é definida como fator de potência. Logo, se chamarmos o fator de potencia fp , então no caso senoidal

$$fp = \frac{P}{V_{eficaz}I_{eficaz}} = \cos\theta \quad (8.19)$$

que é adimensional. O ângulo θ , nesse caso, é frequentemente referido como ângulo do fator de potência. No caso de cargas resistivas, a tensão e a corrente estão em fase, portanto $\theta=0$ e $fp=1$. Nesse caso, a potência aparente é igual a potência média. No caso de circuitos contendo elementos reativos como indutores e capacitores, o fator de potência unitário também pode existir se as reatâncias desses elementos são tais que se cancelam. Ajustar as reatâncias das cargas para que se aproximem desta condição é muito importante em sistemas elétricos. Em uma carga puramente reativa, $\theta=\pm 90^\circ$, $fp=0$, e a potência média é igual a zero. Nesse caso, a carga equivalente é uma indutância ($\theta=+90^\circ$) ou uma capacitância ($\theta=-90^\circ$) e a corrente e a tensão diferem em fase de 90° . Para esses casos temos:

- Circuito RC: fator de potência adiantado
- Circuito RL: fator de potência atrasado

8.3.1 Método para correção do fator de potência

Vamos agora considerar um método de correção do fator de potência de uma carga tendo uma impedância genérica Z como segue:

$$Z = R + jX \quad (8.20)$$

Podemos alterar o fator de potência conectando uma impedância Z_1 em paralelo com Z , como mostrado na Figura 8.4. Por esta conexão, fica claro que a tensão na carga não muda. Visto que Z é fixa, I não muda e a potência entregue a carga não é afetada. A corrente I_1 fornecida pelo gerador, entretanto, muda.

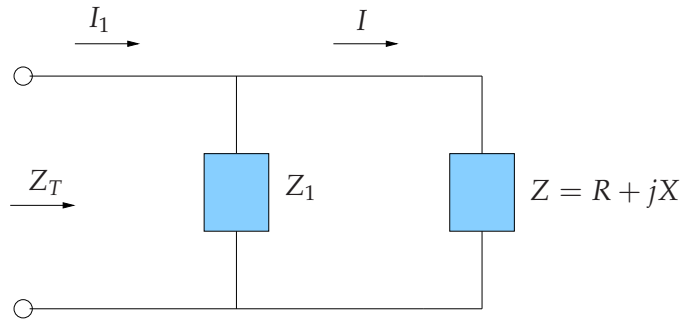


Figura 8.4: Circuito para correção de fator de potência.

Vamos chamar a impedância da associação em paralelo por

$$Z_T = \frac{ZZ_1}{Z + Z_1} \quad (8.21)$$

Em geral, selecionamos a impedância Z_1 de tal forma que a mesma absorva toda a potência reativa e assim Z_T tenha o fator de potência desejado. A primeira condição requer que Z_1 seja puramente reativa. Isto é,

$$Z_1 = jX_1 \quad (8.22)$$

A segunda condição requer que

$$\cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{\text{Im } Z_T}{\text{Re } Z_T} \right) \right] = FP \quad (8.23)$$

Substituindo Z_T em termos de R , X e X_1 , encontramos que

$$\frac{ZZ_1}{Z + Z_1} = \frac{(R + jX)(jX_1)}{R + jX + jX_1} = \frac{jRX_1 - XX_1}{R + j(X + X_1)} \quad (8.24)$$

multiplicando o numerador e denominador da expressão (8.24) pelo complexo conjugado de $[R + j(X + X_1)]$ obtemos

$$\frac{jRX_1 - XX_1}{R + j(X + X_1)} \left[\frac{R - j(X + X_1)}{R - j(X + X_1)} \right] = \frac{R^2X_1 + j(RX_1 + XX_1(X + X_1))}{R^2 + (X + X_1)^2} \quad (8.25)$$

Usando (8.25) em (8.23), obtemos

$$\cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{R^2X_1 + XX_1(X + X_1)}{RX_1} \right) \right] = FP \quad (8.26)$$

$$\tan^{-1} \left(\frac{R^2X_1 + XX_1(X + X_1)}{RX_1} \right) = \cos^{-1} FP \quad (8.27)$$

$$\frac{R^2X_1 + XX_1(X + X_1)}{RX_1} = \tan[\cos^{-1} FP] \quad (8.28)$$

Resolvendo (8.28) para X_1 obtemos

$$X_1 = \frac{R^2 + X^2}{R \tan(\cos^{-1} FP) - X} \quad (8.29)$$

onde notamos que $\tan(\cos^{-1})$ é positivo se FP é atrasado e negativo se FP é adiantado.

8.4 Objetivo das Práticas

- Entender a importância do fator de potência em termos técnicos e econômicos em sistemas elétricos;
- Aprender como corrigir o baixo fator de potência de uma carga predominantemente reativa.

8.5 Práticas de Laboratório

Nas práticas serão necessários os seguintes equipamentos e componentes:

- Protoboard
- Osciloscópio

8.5.1 Prática 1

Uma carga consome 100 kW de uma linha 220 V (eficazes) com fator de potência 0,85 atrasado. Calcule:

1. A corrente eficaz e a potência aparente drenada pela carga;
2. Suponha que o fator de potência muda para 0,95 atrasado. Calcule novamente a corrente eficaz e a potência aparente;
3. Comente os resultados obtidos das correntes drenadas pelas cargas em relação aos seus respectivos fatores de potência enfatizando os aspectos econômicos relevantes.

8.5.2 Prática 2

Dado o circuito RL da Figura 8.5(a) (parâmetros do sistema na Tabela 8.1).

1. Calcular o fator de potência.

Tabela 8.1: Parâmetros do sistema.

Frequency	10kHz
Inductance	15 μH
Resistance	1 Ω

2. Simular o circuito (Figura 8.6) utilizando a biblioteca SimPowerSystems do MATLAB/Simulink e comparar o fator de potência encontrado com o calculado. Verificar a fase entre a corrente e tensão.
3. Inserir um capacitor em paralelo ao circuito RL como mostra a Figura 8.5(b) e calcular o valor da capacitância para se obter um fator de potência igual a 0.95.
4. Simular o circuito da Figura 8.5(b) utilizando a biblioteca SimPowerSystems do MATLAB/Simulink e comparar o fator de potência encontrado com o calculado. Verificar a fase entre a corrente e tensão.
5. Implementar os dois circuitos no protoboard e comparar a fase entre a corrente e tensão.
6. Calcular a corrente eficaz absorvida pela carga nos dois casos. Os resultados obtidos devem fundamentar uma análise teórica que justifique a correção do fator de potência em âmbito industrial.

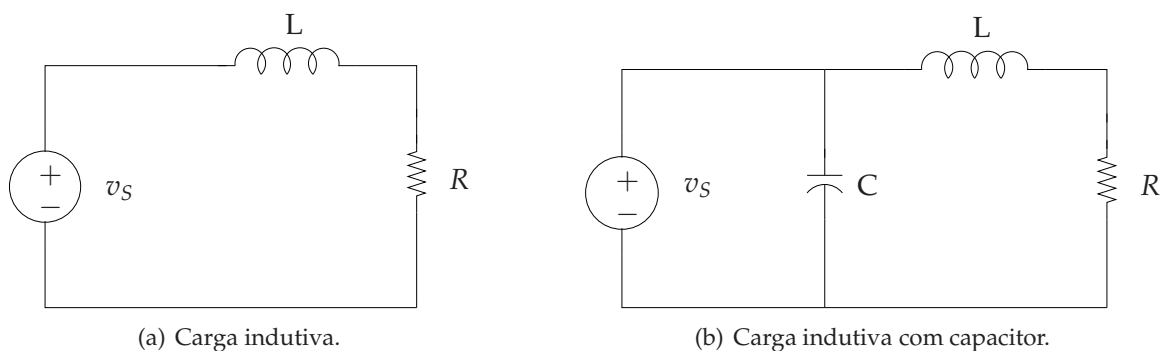


Figura 8.5: Prática de correção de fator de potência

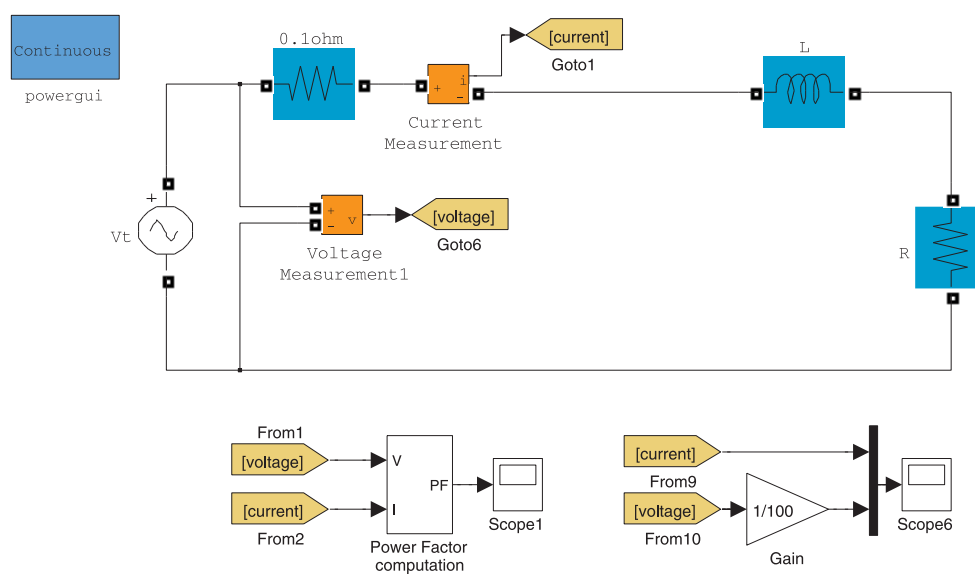


Figura 8.6: Simulação do circuito da Figura 8.5(a).

Apêndice **A**

Manuais dos Equipamentos Agilent

Os manuais, na primeira versão em português, do osciloscópio, gerador de funções e do multímetro podem ser baixados no endereço: <http://www.ufpe.br/ldsp/Augusto/Circuitos.html>

Referências Bibliográficas

- [1] D. E. Johnson e J. L. Hulburn e J. R. Johnson. *Fundamentos de Análise de Circuitos*. PHB.
- [2] J. W. Nilsson e S. A. Riedel. *Circuitos Elétricos*. LTC.
- [3] J. A. Edminister. *Circuitos Elétricos*. McGraw-Hill.
- [4] J. R. Cogdell. *Foundations of Electrical Engineering*. Prentice Hall.
- [5] Charles A. Desoer e Ernest S. Kuh. *Teoria Básica de Circuitos*. Guanabara Dois.