

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PRÁTICAS DE CIRCUITOS ELÉTRICOS 1

Prof. Augusto de Oliveira

Prof. Daniel Chaves

Prof. Fabrício Bradaschia

Prof. Geraldo Maia

Prof. Gustavo Azevedo

Prof. Herbert Leitão

Prof. Leonardo Limongi

Recife, 2017

Sumário

1. Lei de Ohm, Resistores e Medições em Circuitos Elétricos	2
1.1. Resumo Teórico - Lei de Ohm	2
1.2. Medições Usando o Multímetro	4
1.3. Tensões Senoidais	9
1.3.1. Valor Médio	10
1.3.2. Valor Eficaz	12
1.4. Práticas de Laboratório	13
1.4.1. Prática 1	14
1.4.2. Prática 2	14
1.4.3. Prática 3	16
1.4.4. Prática 4	16
2. Fontes de Tensão e de Corrente	18
2.1. Resumo Teórico - Fontes de Tensão e Corrente	18
2.2. Práticas de Laboratório	23
2.2.1. Prática 1	23
2.2.2. Prática 2	24
3. Equivalentes de Thévenin e Norton	26
3.1. Resumo Teórico - Equivalentes de Thévenin e Norton	26
3.2. Práticas de Laboratório	27
3.2.1. Prática 1	27
3.2.2. Prática 2	29
4. Fontes Dependentes ou Controladas	31
4.1. Resumo Teórico - Amplificador Operacional	31
4.1.1. Terminais de um Amp-Op	31
4.2. Práticas de Laboratório	34
4.2.1. Prática 1	35
4.2.2. Prática 2	36

5. Circuitos de 1ª Ordem	38
5.1. Resumo Teórico - Circuitos RC	38
5.2. Prática de Laboratório	40
5.2.1. Prática 1	41
5.2.2. Prática 2	42
6. Circuitos de 2ª Ordem	44
6.1. Resumo Teórico - Circuitos RLC	44
6.1.1. Circuito RLC Série	44
6.1.2. Circuito RLC Paralelo	46
6.2. Práticas de Laboratório	47
6.2.1. Prática 1	49
6.2.2. Prática 2	50
7. Circuitos CA em Regime Permanente	52
7.1. Resumo Teórico - Leis de Kirchhoff para Circuitos Fasoriais	52
7.2. Resumo Teórico - Equivalente de Thévenin para Circuitos Fasoriais	53
7.3. Práticas de Laboratório	53
7.3.1. Prática 1	54
7.3.2. Prática 2	56
8. Fator de Potência para Circuitos Fasoriais	57
8.1. Resumo Teórico	57
8.2. Relação Fasorial Tensão-Corrente para Elementos Reativos	58
8.2.1. Indutância	58
8.2.2. Capacitância	59
8.3. Potência Ativa e Fator de Potência	60
8.3.1. Correção do Fator de Potência	61
8.4. Prática de Laboratório	63
8.4.1. Prática 1	63
Referências Bibliográficas	66

REGRAS GERAIS DE USO DO LABORATÓRIO

1. O acesso do aluno ao laboratório e sua permanência só serão permitidos com a presença de um instrutor (professor, técnico ou monitor);
2. Cada grupo de alunos escolherá uma das bancadas, na qual fará todas as práticas e provas do período letivo;
3. Antes de cada prática, a bancada deve ser preparada pelo instrutor. Nela conterão:
 - (a) todos os componentes necessários à cada prática;
 - (b) as ponteiros e os cabos dos equipamentos.
4. Os computadores possuem dois sistemas operacionais (SO) instalados: o Ubuntu e o Windows XP. Os equipamentos da *Agilent* (chassis e módulos) e o software *MATLAB* devem ser usados no SO Windows. Por questão de segurança, todas as portas USB e o acesso à internet estão desabilitados no SO Windows;
5. Os arquivos obtidos das simulações e práticas devem ser salvos em uma pasta específica do grupo de alunos que deve estar localizada em **C:\ PraticaLab**. Os arquivos salvos no SO Windows só estarão disponíveis para cópia no SO Ubuntu. No SO Ubuntu, os alunos terão duas opções: copiar os arquivos em um pen-drive ou enviar os arquivos por e-mail;
6. Ao concluir as práticas, os alunos devem desmontá-la, guardar os componentes, cabos e ponteiros nos seus respectivos locais e desligar o computador e os equipamentos;
7. Ao fim do dia, o instrutor deverá organizar as bancadas do laboratório e guardar os equipamentos e os componentes no armário/estante;
8. Antes de fechar a sala, o instrutor deve desligar os condicionadores de ar, as luzes e o disjuntor geral dos QDs 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(a) e 1.1(b) mostram alguns tipos de resistores, cujo símbolo é mostrado na Figura 1.2.

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, como visto na Figura 1.3, a relação entre tensão e corrente será dada por

$$v = Ri, \quad (1.1)$$

que é conhecida como **Lei de Ohm**.

Alguns resistores, geralmente os de baixa potência, são identificados através de um código de cores. Esse código especifica a resistência nominal em *Ohms* do componente e a tolerância da resistência nominal. O código de cores dos resistores é mostrado na Figura 1.4. Os resistores podem ser codificados através de quatro, cinco, ou seis faixas de cores,

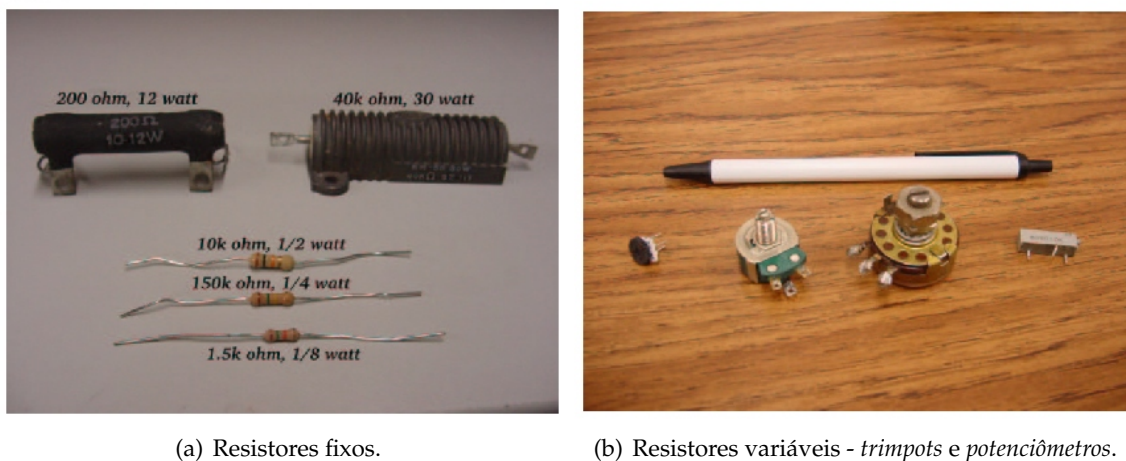


Figura 1.1: Diferentes tipos de resistores.

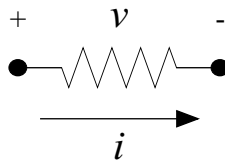
Figura 1.2: Símbolo de um resistor cuja resistência é R .

Figura 1.3: Convenção para a corrente e a tensão nos terminais de um resistor.

como visto na Figura 1.4. Os resistores de quatro faixas são os mais comuns. Resistores de cinco faixas geralmente são de alta precisão (possuem tolerância menor que 2%). Para os resistores de seis faixas, a última faixa indica o *coeficiente de temperatura* em $\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ (partes por milhão por grau Celsius). Os resistores de seis faixas são usados em aplicações nas quais a especificação de temperatura é crítica.

Por exemplo, um resistor de quatro faixas (tipo mais comum) com as cores **verde**, **azul**, **vermelho** e **ouro** terá sua resistência nominal igual a

verde	azul	vermelho	ouro	
5	6	x100	$\pm 5\%$	$= 5600\Omega \pm 5\%$ ou $5,6k\Omega \pm 5\%$

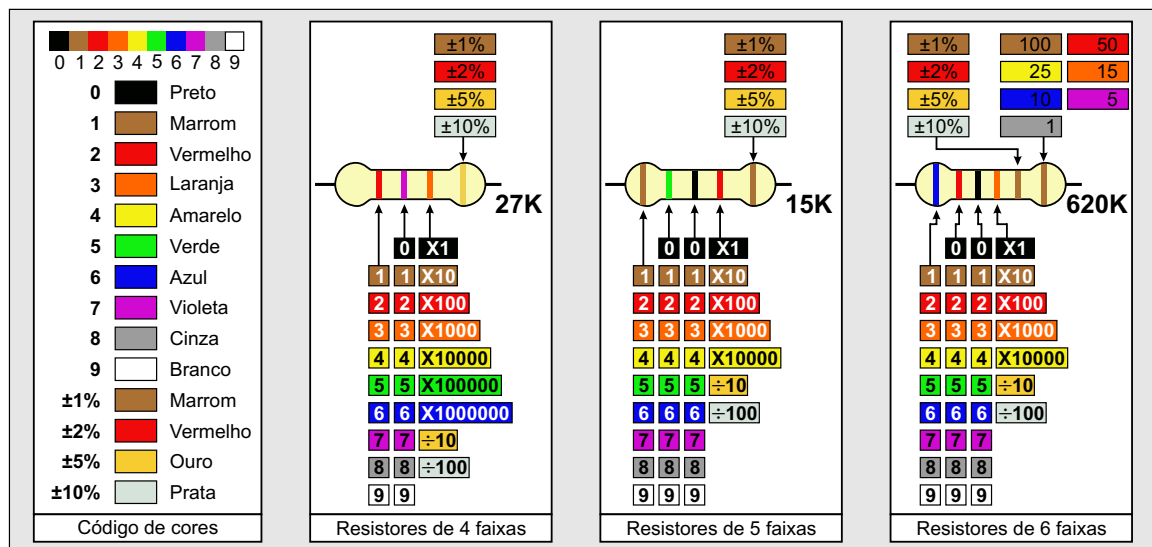


Figura 1.4: Código de cores dos resistores.

1.2 Medições Usando o Multímetro

Um dos equipamentos mais comuns de medição é o *multímetro*, mostrado na Figura 1.5. Existem diferentes tipos de multímetros, sendo que o mostrado na Figura 1.5 refere-se a uma ilustração genérica de um multímetro digital. Ele tem a capacidade de medir diferentes grandezas: tensão, corrente, resistência, entre outras. Deve-se ter um grande cuidado ao manusear o multímetro, pois o uso incorreto do multímetro pode ser uma fonte de perigo.

As marcações do multímetro, vistas na Figura 1.5, são as seguintes (partindo da posição "OFF" no sentido horário): tem-se o modo de leitura da tensão em corrente contínua (CC), leitura da tensão em corrente alternada (CA), leitura da resistência, leitura da corrente em CA ou leitura da corrente em CC.

No multímetro há três diferentes *soquetes* nos quais são conectadas as *ponteiras*. As ponteiras são usadas para permitir a medição das grandezas com o multímetro e são disponibilizadas nas cores preta e vermelha, como visto na Figura 1.6.

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 (CC).

Primeiramente, deve-se conectar a ponteira vermelha na marcação da tensão e a

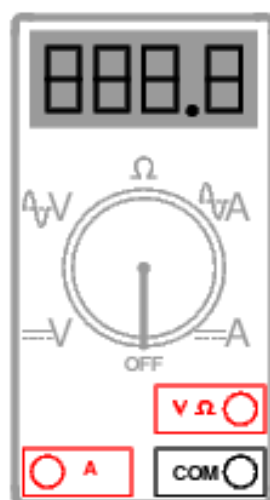


Figura 1.5: Multímetro.

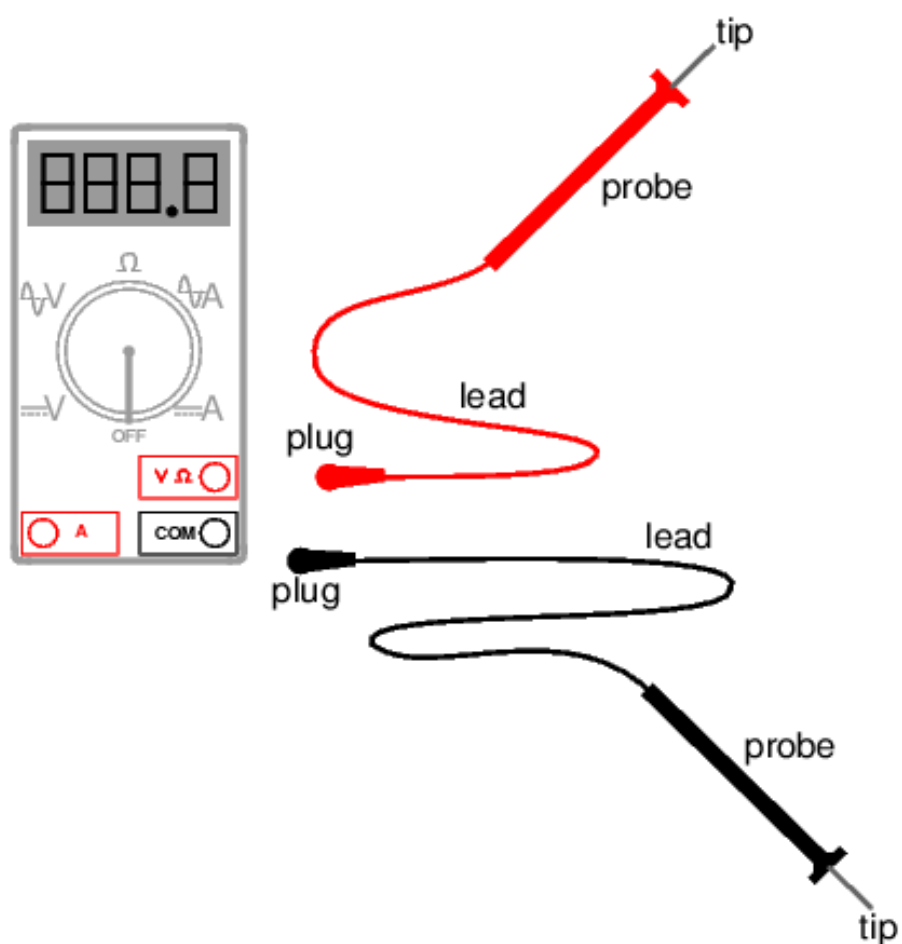


Figura 1.6: Ponteiros do multímetro.

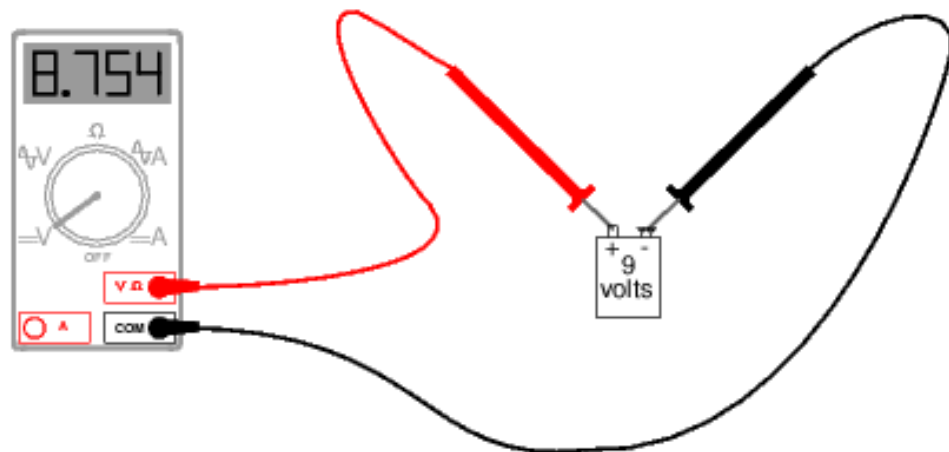


Figura 1.7: Medição da tensão de uma bateria (CC).

ponteira preta na marcação COM do multímetro e, depois, deve-se escolher o modo de leitura da tensão em CC, conforme visto na Figura 1.7.

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

Neste caso, deve-se apenas mudar o modo de leitura para tensão em CA no multímetro, conforme visto na Figura 1.8. É imperativo que os terminais das ponteiros não se toquem. Se isso ocorrer, ocasionará um curto-circuito, como mostrado na Figura 1.9.

Exemplo 1.3 *Medir a resistência de um resistor.*

Conecta-se a ponteira vermelha no terminal da tensão/resistência (V Ω), a ponteira preta sempre no terminal COM e escolhe-se o modo de leitura da resistência, conforme visto Figura 1.10.

Um detalhe importante é que o componente o qual se deseja medir a resistência deve estar desenergizado, caso contrário pode-se danificar o multímetro. No caso de multímetros analógicos, 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.

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 e, se o cabo/fio estiver bem conectado, o valor será próximo do zero.

No modo da resistência, quando as ponteiros são curto-circuitadas, o instrumento deve indicar um valor zero e, quando as ponteiros não se tocarem, o multímetro deve indicar um valor de resistência infinita (normalmente no display aparece uma abreviação “O.L”), conforme visto na Figura 1.11.

Exemplo 1.4 *Medir a corrente de uma bateria alimentando uma lâmpada.*

Conecta-se o instrumento em série com a bateria e a lâmpada, ligando-se a ponteira preta (COM) ao terminal negativo da bateria e a ponteira vermelha (terminal A do multímetro) em um dos terminais da lâmpada, como mostrado na Figura 1.12.

Quando se deseja medir tensão, deve-se verificar se o multímetro não está ajustado incorretamente para medir corrente. Se isso ocorrer, ocorrerá um curto-circuito no local que se desejava medir tensão, podendo danificar o multímetro e o circuito, como ilustrado na Figura 1.13.

Todos os multímetros de qualidade possuem fusíveis com a finalidade de proteção interna do multímetro. Os fusíveis se rompem caso uma sobrecorrente circule por ele. Além do mais, o multímetro pode ser usado para verificar se seu próprio fusível está rompido (danificado) ou não. Para isso, deve-se conectar a ponteira preta no terminal de medição de corrente (A) e a ponteira vermelha no terminal de medição de tensão (V).

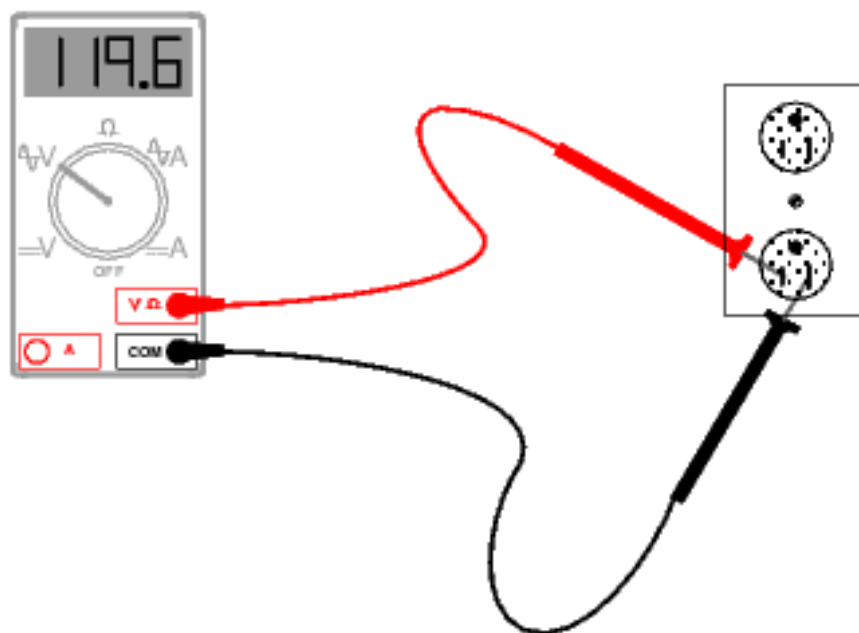


Figura 1.8: Medição da tensão de uma tomada (CA).

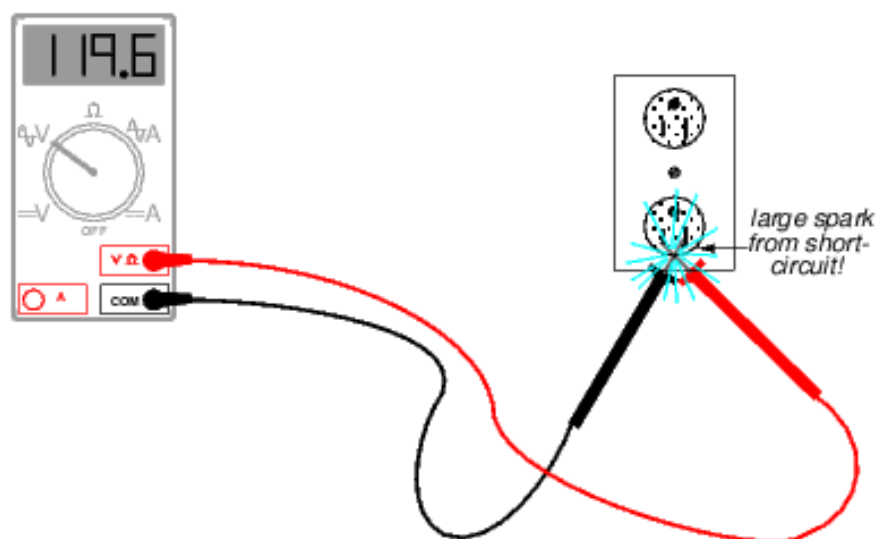
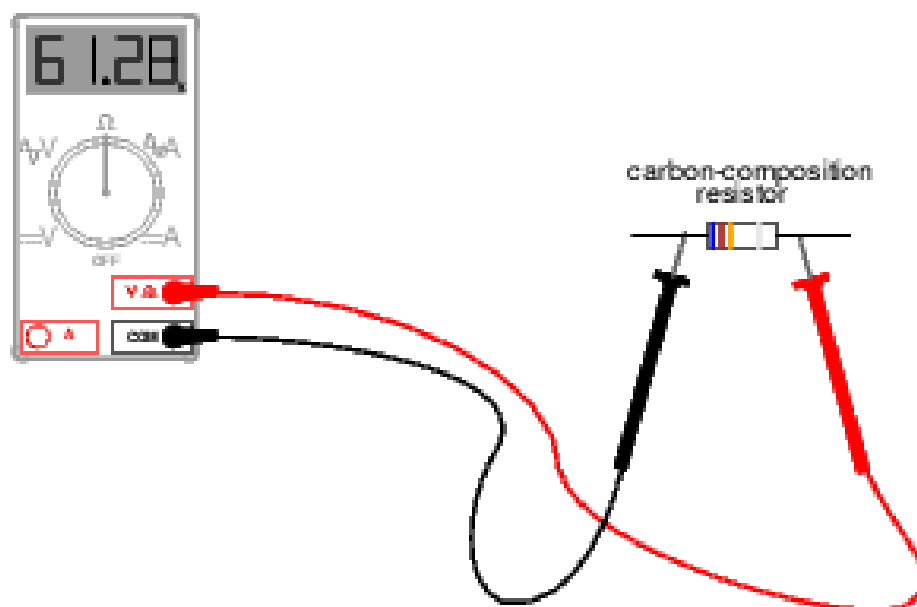


Figura 1.9: Uso incorreto do multímetro.

Em seguida escolhe-se o modo de resistência e junta-se as pontas das pontadeiras. 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 mostrado na Figura 1.14.

Figura 1.10: Medição da resistência de um resistor de $62k\Omega$.

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 o valor eficaz da grandeza medida. Por exemplo, se usamos o multímetro para medir a tensão da rede elétrica, o mesmo exibirá um valor próximo de 220 Volts. Essa medição (220 Volts) é o valor eficaz da tensão da rede elétrica. Por outro lado, se medimos a tensão de uma bateria, o multímetro exibirá o valor médio de sua tensão. Essa seção tem o objetivo de definir e conceituar valor médio e 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 cosseno. Para nossa discussão, escolhemos a função cosseno. A tensão senoidal é escrita da forma

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

Uma função senoidal se repete a intervalos regulares (função periódica), conforme mostrado na Figura 1.15. O tempo necessário para que uma função senoidal complete

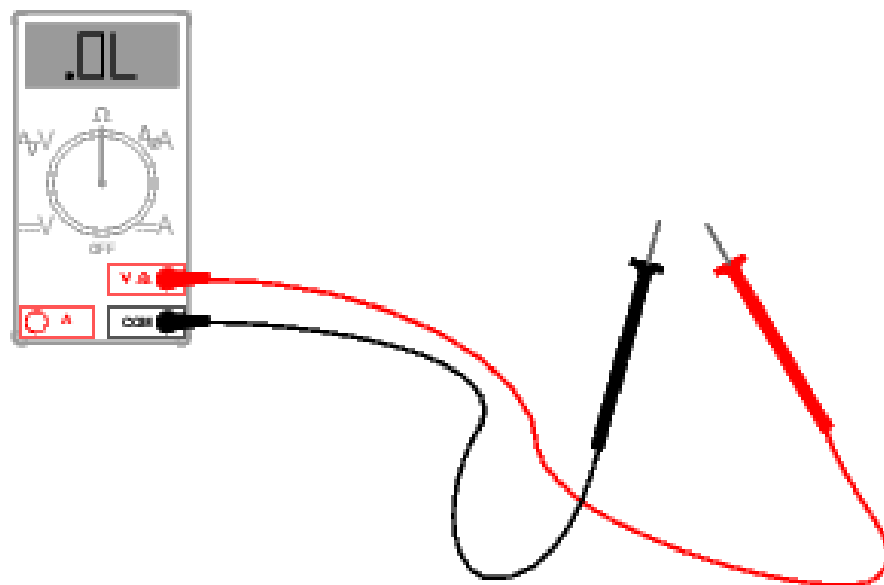


Figura 1.11: Aferição do multímetro.

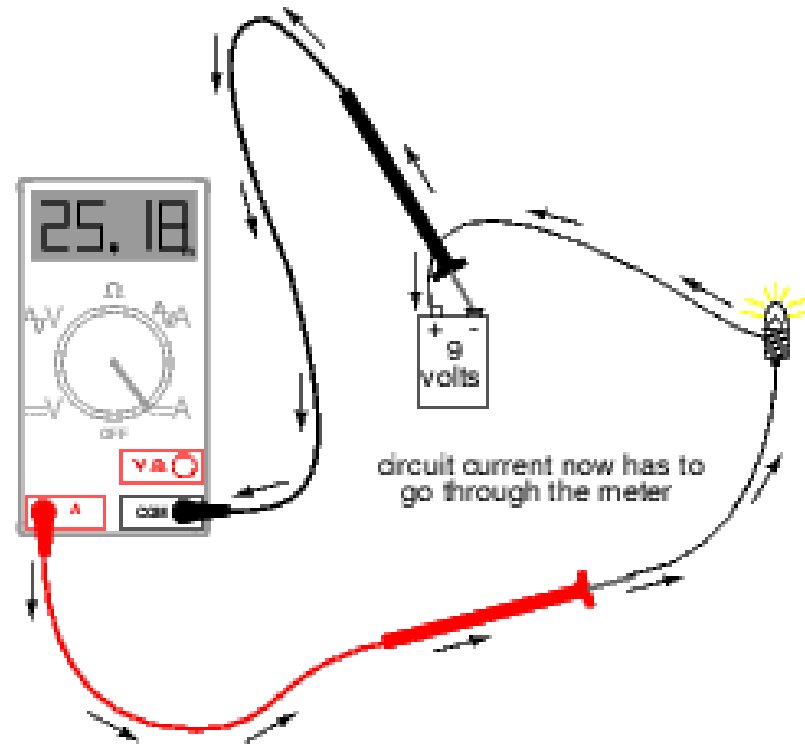


Figura 1.12: Medição de corrente que circula em um circuito.

um ciclo é chamado de **período** (T). O inverso do período é a **frequência** (f), que é dada em *Hertz* (Hz). O coeficiente de t na função é a **frequência angular**,

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T},$$

dada em radianos por segundo (rad/s). O coeficiente V_m é a **amplitude** da função senoidal e ϕ é o **ângulo de fase** da função senoidal que determina o valor da função em $t = 0$ s.

1.3.1 Valor Médio

Para um sinal de tensão ou corrente periódico, cujo valor varia com o tempo, é possível definir uma média desse sinal. Suponha uma tensão periódica $v(t)$, seu valor médio, V_{medio} , é definido como a integral de $v(t)$ em um período dividido pelo período, ou seja,

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

em que 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 a tensão dada por (1.2). Calculando o seu valor médio obtém-se

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

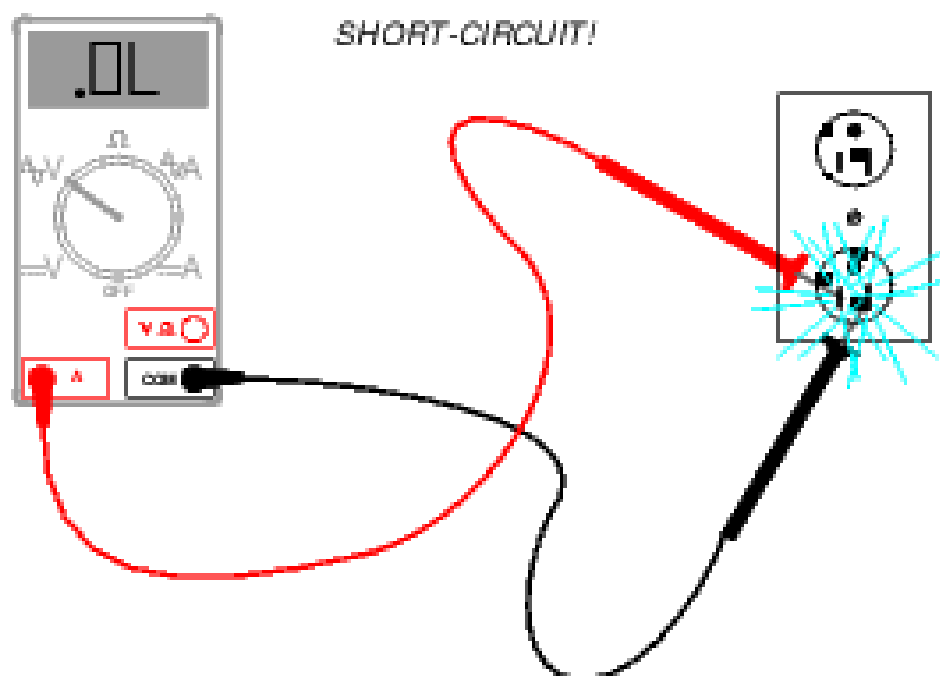


Figura 1.13: Uso incorreto do multímetro ao se medir a tensão.

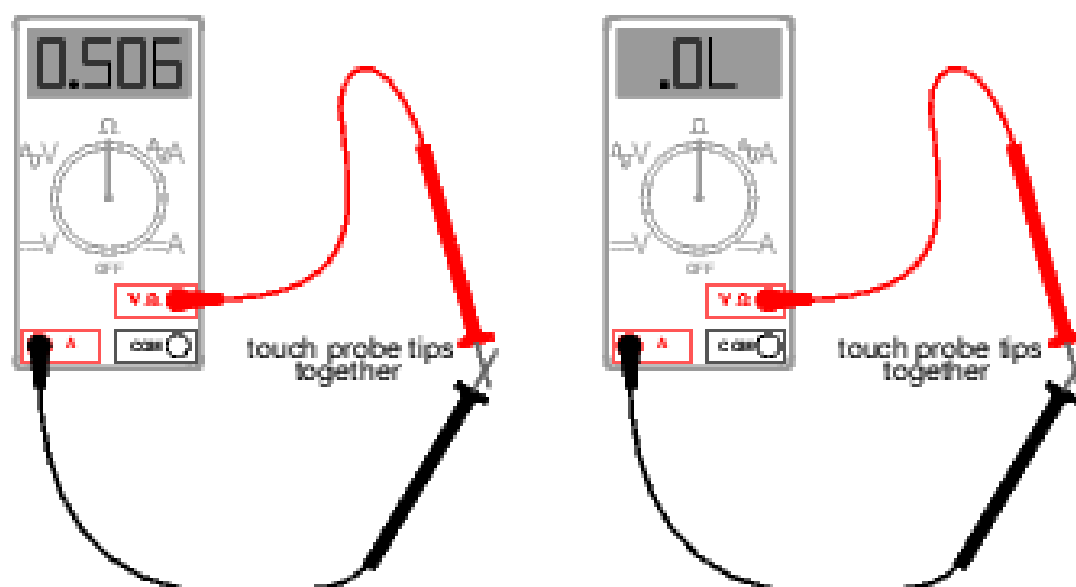


Figura 1.14: Verificação do estado do fusível do multímetro.

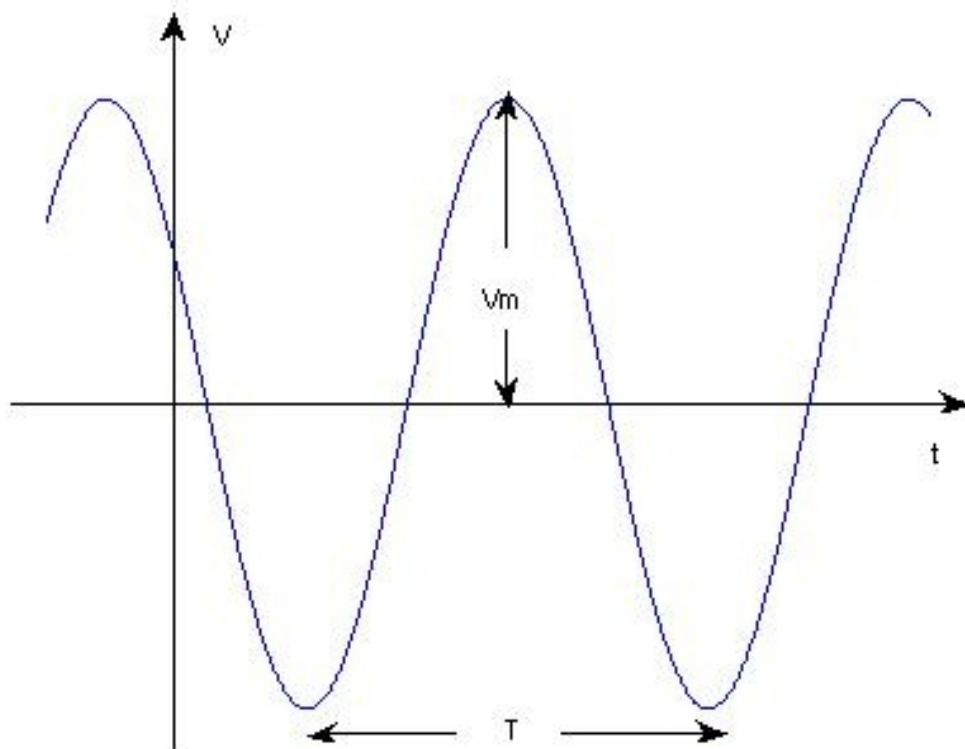


Figura 1.15: Exemplo de uma tensão senoidal.

Note que, para grandezas puramente senoidais, o valor médio é sempre nulo e independe de sua amplitude. 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 médio ou CC é utilizado para caracterizar tensões e correntes 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 rms**¹. Em circuitos elétricos, esta média é geralmente referida como **valor eficaz de tensão** ou **valor eficaz de corrente**. Um sinal periódico tem seu valor eficaz definido como sendo a raiz quadrada do valor médio do quadrado da função. Suponha uma tensão periódica $v(t)$, seu valor eficaz é

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

¹rms é a sigla de *root mean square*

Calculando-se o valor eficaz para a tensão senoidal dada por (1.2), tem-se

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{2\pi} V_m^2 \cos^2(\omega t + \phi) dt} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}. \quad (1.6)$$

Note que, para grandezas puramente senoidais, o valor eficaz corresponde à amplitude do sinal dividido por $\sqrt{2}$, ou seja,

$$V_{rms} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}. \quad (1.7)$$

1.4 Práticas de Laboratório

Os objetivos das práticas são:

- Efetuar medidas com o multímetro, aprendendo a manuseá-lo de forma cuidadosa e correta;
- Montar os circuitos em plataformas dedicadas (*protoboard*), obedecendo às recomendações na montagem dos componentes;
- Interpretar o código de cores padronizados nos diversos resistores e familiarizar-se com o conceito de tolerância;
- Aplicar a lei de Ohm aos diferentes circuitos;
- Familiarizar-se com os termos **valor médio** e **valor eficaz** para sinais periódicos de tensão e corrente.

Os materiais necessários às práticas são:

1. Fonte CC;
2. Gerador de sinais;
3. Multímetro;
4. Osciloscópio;
5. *Protoboard*;
6. Resistores (um de cada):
 - Prática 1 (220 Ω / 330 Ω / 1,0 k Ω / 10 k Ω);
 - Prática 2 (1,2 k Ω / 2,2 k Ω / 3,3 k Ω);
 - Prática 3 (100 k Ω / 560 k Ω);

1.4.1 Prática 1

Faça as seguintes anotações na Tabela 1.1:

1. Leitura do código de cores dos resistores, incluindo a sua tolerância;
2. Medição, com o multímetro, da resistência dos componentes;
3. Comparação dos valores de leitura (nominais) e medição, calculando o erro percentual:

$$\text{Erro (\%)} = 100\% \cdot \frac{|\text{Leitura} - \text{Medição}|}{\text{Leitura}}$$

Tabela 1.1: Valores das resistências - Prática 1

Resistor	Leitura	Tolerância (%)	Medição	Erro (%)
1	220Ω			
2	330Ω			
3	1kΩ			
4	10kΩ			

1.4.2 Prática 2

Dado o circuito visto na Figura 1.16, siga os passos:

1. Calcule as tensões em cada elemento do circuito;
2. Calcule as correntes em cada elemento do circuito;

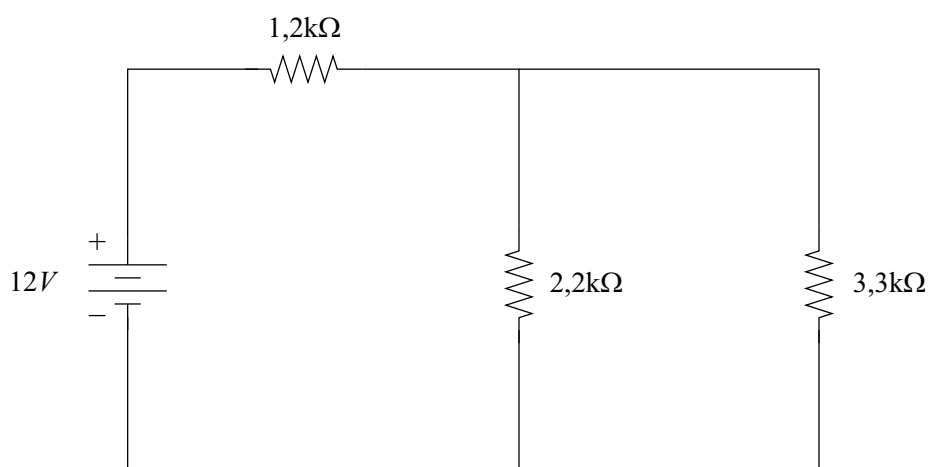
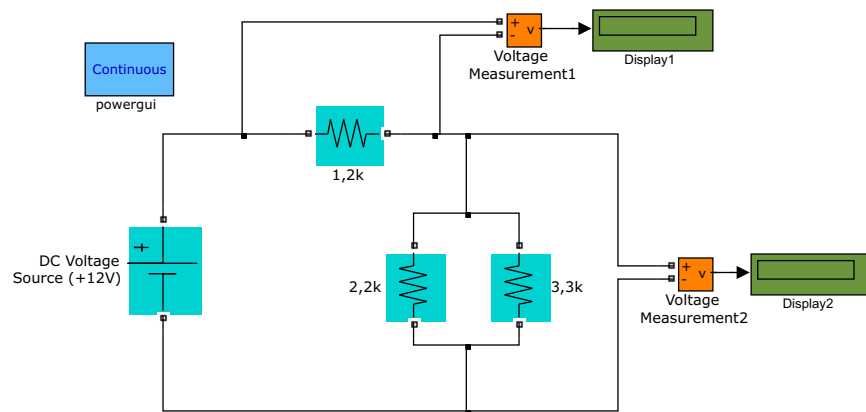
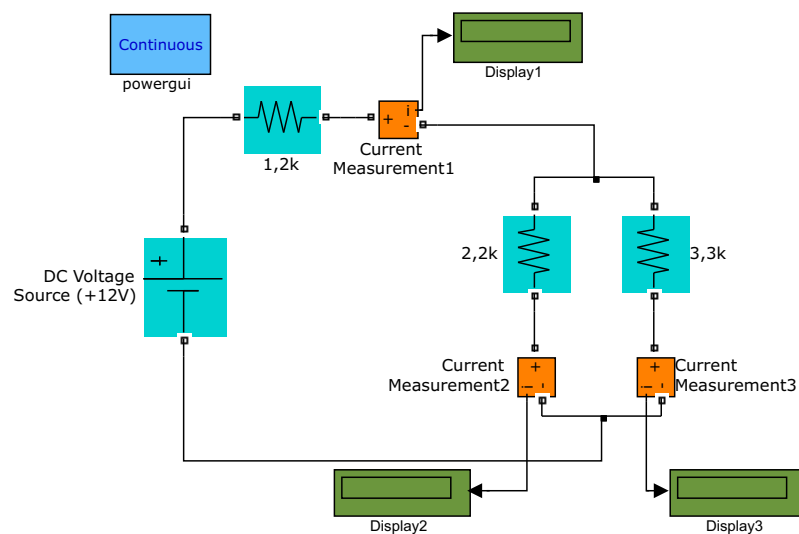


Figura 1.16: Circuito da Prática 2.

3. Calcule as potências dissipadas em cada resistor do circuito;
4. Simule o circuito da Figura 1.16 utilizando a biblioteca *SimPowerSystems* do MATLAB/Simulink. Obtenha as tensões e correntes em cada elemento do circuito de acordo com as Figuras 1.17(a) e 1.17(b), respectivamente;
5. Monte o circuito na *protoboard*;
6. Meça as tensões e correntes sobre cada elemento do circuito;
7. Compare os valores calculados, simulados e medidos, calculando os erros percentuais.



(a) Simulação com medição de tensão.



(b) Simulação com medição de corrente.

Figura 1.17: Simulação do circuito resistivo da Figura 1.16.

1.4.3 Prática 3

Desenvolver e montar um circuito cuja entrada V_i seja uma tensão CC fixa e a saída V_o seja uma tensão CC ajustável, como visto na Figura 1.18. Meça, com o multímetro, a mínima e a máxima tensão V_o obtida no circuito desenvolvido e mostre que estes valores medidos são compatíveis com que se espera do circuito teórico.

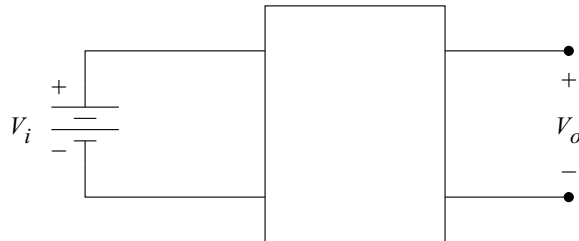


Figura 1.18: Circuito da Prática 3.

1.4.4 Prática 4

1. Monte o circuito da Figura 1.19 e ajuste o gerador de sinais como indicado;
2. Visualize, no osciloscópio, as formas de onda das tensões indicadas. Com ajuda do osciloscópio e do multímetro, preencha a Tabela 1.2;
3. Compare o valor de V_T com o valor de $V_{R1} + V_{R2}$ para os casos eficaz, pico e pico a pico;
4. Compare o valor eficaz com o de pico e o valor eficaz com o pico a pico para cada uma das tensões da Tabela 1.2 (V_T , V_{R1} e V_{R2}).

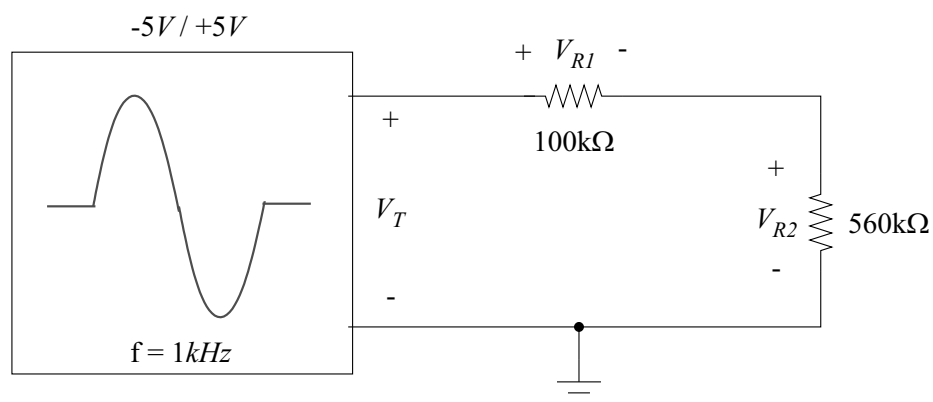


Figura 1.19: Circuito da Prática 4.

Tabela 1.2: Medições do circuito da Figura 1.19 - Prática 4.

	Valor eficaz	Valor de pico	Valor pico a pico
V_T			
V_{R1}			
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 uma determinada energia primária (por exemplo: potencial, cinética, solar, térmica, química) em energia elétrica. A Figura 2.1 representa fontes de tensão e corrente reais, que possuem uma resistência interna de valor R_s .

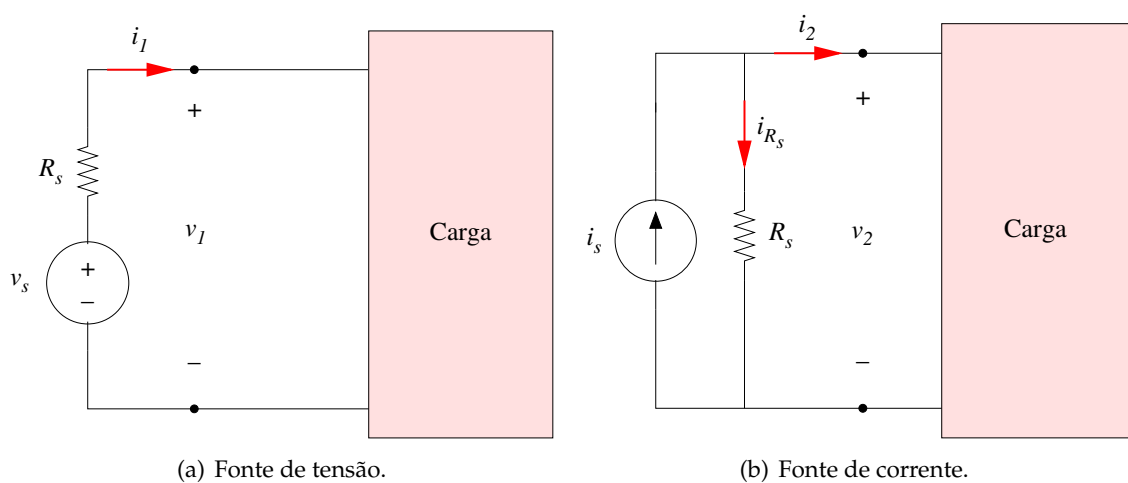


Figura 2.1: Fontes de tensão e corrente.

Para uma **fonte de tensão real** (Figura 2.1(a)), tem-se que

$$v_s = v_1 + R_s i_1 \implies v_1 = v_s - R_s i_1, \quad (2.1)$$

em que v_s é a tensão produzida pela fonte em vazio (sem carga, $i_1 = 0$) e v_1 é a tensão disponível nos terminais da fonte.

Uma fonte de tensão ideal é aquela que possui resistência interna nula, ou seja, $R_s = 0$. Neste caso, independente do valor da carga conectada aos terminais da fonte, a tensão de saída da fonte é sempre v_s , ou seja, $v_1 = v_s, \forall i_1$.

Em uma fonte de tensão real, conforme a carga aumenta (i_1 aumenta), a queda de tensão na resistência interna também aumenta, diminuindo, assim, a tensão de saída da fonte. Além disso, uma fonte de tensão real possui uma corrente máxima de operação, chamada de corrente nominal da fonte, representada por i_N . Assim, a característica $v \times i$ de uma fonte de tensão real, representada pela equação 2.1, pode ser vista na Figura 2.2.

A diferença entre a tensão de saída em vazio e a tensão de saída com corrente nominal, representada por Δv na Figura 2.2, é uma medida da qualidade da fonte de tensão. Quanto melhor é a fonte, menor é o Δv para a mesma tensão v_s e corrente i_N . A qualidade de uma fonte geralmente é definida pela figura de mérito conhecida como **regulação de carga**, que é definida como

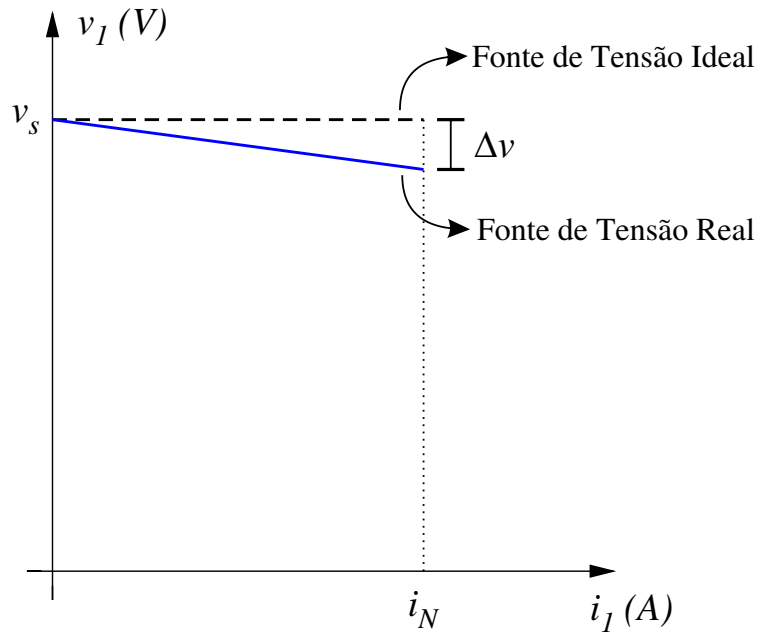


Figura 2.2: Característica $v \times i$ das fontes de tensão reais.

$$RC = \frac{\Delta v}{v_s} \cdot 100\%, \quad (2.2)$$

ou seja, quanto melhor é uma fonte, menor é o valor de RC .

Analisando a equação 2.1, observa-se que

$$\Delta v = v_s - v_1 = R_s i_N, \quad (2.3)$$

e, substituindo a equação 2.3 em 2.2, tem-se que

$$RC = \frac{R_s i_N}{v_s} \cdot 100\%. \quad (2.4)$$

É possível notar que uma fonte ideal (que possui resistência interna nula) tem $RC = 0$. Na prática, fontes de tensão de melhor qualidade (mais complexas e de maior custo) possuem valores RC que variam de 0,02% a 0,1%. Já fontes de tensão mais simples e de menor custo possuem valores de RC entre 5% e 10%. Deve-se escolher qual fonte se adequa melhor ao projeto e à aplicação.

De forma equivalente, para uma **fonte de corrente real** (Figura 2.1(b)), tem-se que

$$i_s = i_2 + \frac{v_2}{R_s} \implies i_2 = i_s - \frac{v_2}{R_s}, \quad (2.5)$$

em que i_s é a corrente produzida pela fonte em curto (sem carga, $v_2 = 0$) e i_2 é a corrente disponível nos terminais da fonte.

Uma fonte de corrente ideal é aquela que possui resistência interna infinita, ou seja, $R_s = \infty$. Neste caso, independente do valor da carga conectada aos terminais da fonte, a corrente de saída da fonte é sempre i_s , ou seja, $i_2 = i_s, \forall v_2$.

Em uma fonte de corrente real, conforme a carga aumenta (v_2 aumenta), a corrente que circula pela resistência interna também aumenta, diminuindo, assim, a corrente de saída da fonte. Além disso, uma fonte de corrente real possui uma tensão máxima de operação, chamada de tensão nominal da fonte, representada por v_N . Assim, a característica $v \times i$ de uma fonte de corrente real, representada pela equação 2.5, pode ser vista na Figura 2.3.

De forma análoga às fontes de tensão, a diferença entre a corrente de saída em curto e a corrente de saída com tensão nominal, representada por Δi na Figura 2.3, é uma medida da qualidade da fonte de corrente. A **regulação de carga** para fontes de correntes é definida como

$$RC = \frac{\Delta i}{i_s} \cdot 100\%, \quad (2.6)$$

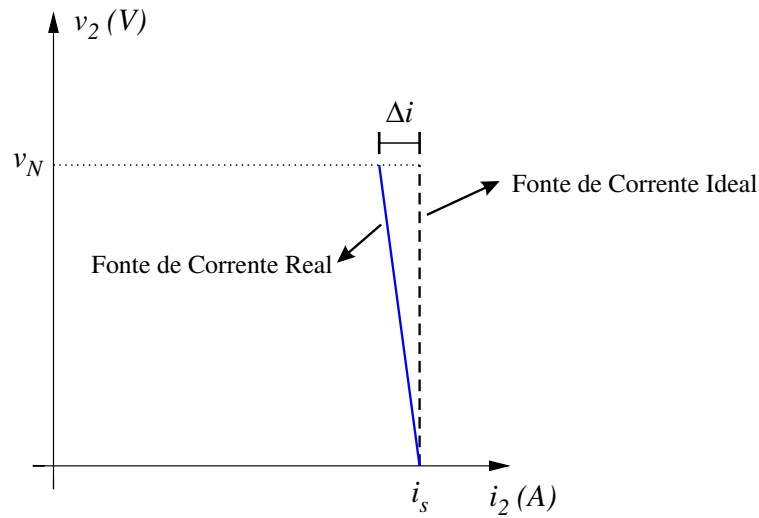


Figura 2.3: Característica $v \times i$ das fontes de corrente reais.

ou seja, quanto melhor é uma fonte, menor é o valor de RC .

Analisando a equação 2.5, observa-se que

$$\Delta i = i_s - i_2 = \frac{v_N}{R_s}, \quad (2.7)$$

e, substituindo a equação 2.7 em 2.6, tem-se que

$$RC = \frac{v_N}{R_s i_s} \cdot 100\%. \quad (2.8)$$

É possível notar que uma fonte ideal (que possui resistência interna infinita) tem $RC = 0$.

Um **gerador de sinais** apresenta uma característica $v \times i$ diferente das fontes de tensão e corrente reais, sendo considerado um caso à parte. Isto ocorre, pois o gerador de sinais possui uma resistência interna bem maior que a de uma fonte de tensão real e bem menor que de uma fonte de corrente real.

O gerador de sinais pode ser representado por uma fonte de tensão real, como na Figura 2.1(a), com uma resistência R_s alta. Desta forma, a característica $v \times i$ do gerador de sinais é equivalente a da Figura 2.2 com uma inclinação **mais acentuada**. De maneira equivalente, o gerador de sinais pode ser representado por uma fonte de corrente real, como na Figura 2.1(b), com uma resistência R_s baixa. Assim, a característica $v \times i$ do gerador de sinais é similar a da Figura 2.3 com uma inclinação **menos acentuada**.

Baseado nesta análise, considerando que as fontes de tensão e corrente da Figura 2.1 são equivalentes, ou seja, entregam as mesmas tensões e correntes para as mesmas condições

de carga, têm-se que $v_1 = v_2$ e $i_1 = i_2$. Substituindo a equação (2.5) na equação (2.1) e considerando as fontes equivalentes, tem-se que

$$\begin{aligned} v_s &= v_1 + R_s \left(i_s - \frac{v_1}{R_s} \right) \\ &= v_1 + R_s i_s - v_1, \end{aligned}$$

ou ainda

$$v_s = R_s i_s, \quad (2.9)$$

que é a relação entre a tensão em vazio e a corrente de curto-circuito em um gerador de sinais.

Em uma fonte de tensão real, o curto-circuito deve ser evitado, pois a corrente de curto-circuito, igual a $\frac{v_s}{R_s}$, é muito maior que a corrente nominal, i_N , podendo danificar a fonte. De forma equivalente, em uma fonte de corrente real, deve-se evitar de deixar a fonte em vazio, pois a tensão em vazio, igual a $R_s i_s$, é muito maior que a tensão nominal, v_N , podendo danificar a fonte. Em um gerador de sinais, é permitido tanto deixar a fonte em vazio como deixá-la em curto-circuito, pois a sua resistência interna foi projetada para suportar ambas as situações. Assim, a característica $v \times i$ de um gerador de sinais, representada pela equação 2.9, pode ser vista na Figura 2.4.

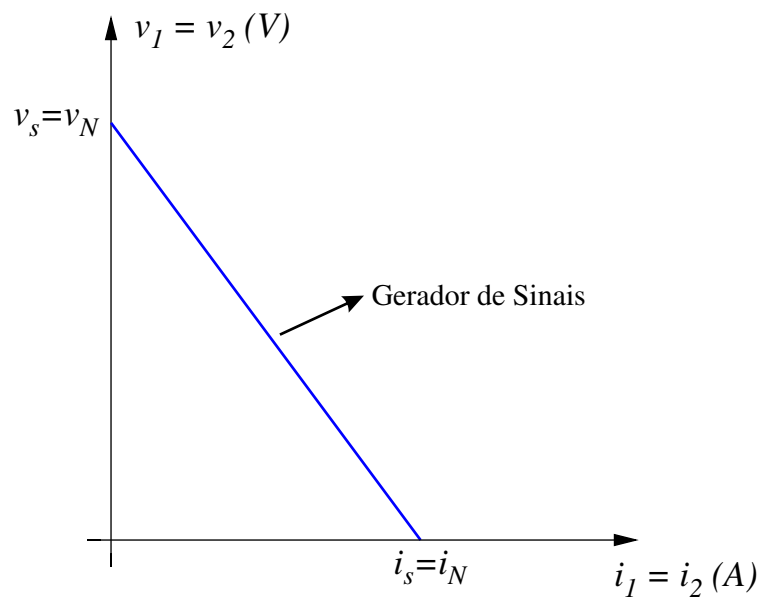


Figura 2.4: Característica $v \times i$ de um gerador de sinais.

2.2 Práticas de Laboratório

Os objetivos das práticas são:

- Analisar o comportamento do gerador de sinais quanto à tensão e à corrente de saída para diversos valores de resistência de carga, obtendo sua curva característica;
- Aprender uma metodologia para estimação da resistência interna de geradores de sinais.

Os materiais necessários às práticas são:

1. Gerador de sinais;
2. *Protoboard*;
3. Multímetro;
4. Resistores:
 - Prática 1 (1Ω ($\times 2$), $4,7\Omega$, 100Ω , $10k\Omega$, $100k\Omega$, $1M\Omega$)
 - Prática 2 (potenciômetro de 100Ω).

2.2.1 Prática 1

1. Monte o circuito mostrado na Figura 2.5 na *protoboard*;
2. Ajuste a tensão do gerador de sinais para $8V_{pp}$, senoidal com frequência de $1kHz$;
3. Para cada resistência de carga R_c da Tabela 2.1, meça, usando o multímetro, a tensão e a corrente na carga e preencha as colunas v e i da Tabela 2.1;
4. Plote a característica $v \times i$ do gerador de sinais usando os resultados da Tabela 2.1, compare o gráfico obtido com o resultado esperado (Figura 2.4) e faça seus comentários;
5. Faça uma regressão linear nos resultados da Tabela 2.1 e obtenha uma fórmula para a relação $v \times i$ do gerador de sinais. Compare a equação (2.1) com a regressão linear e determine os valores da tensão v_s e da resistência R_s do gerador de sinais.

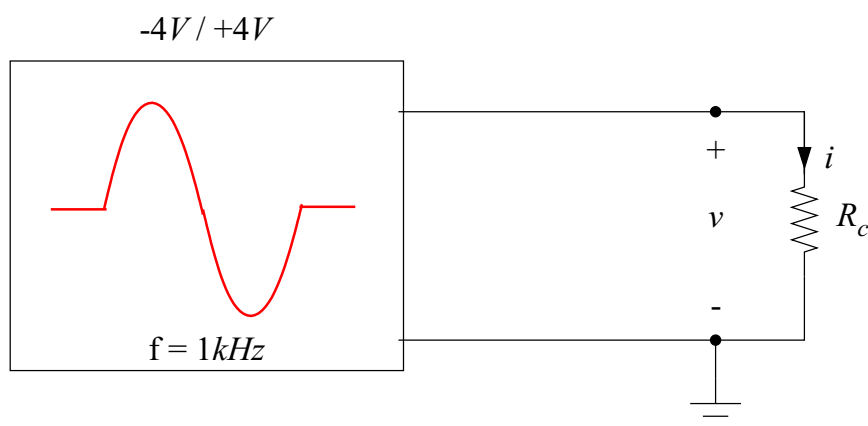


Figura 2.5: Circuito da Prática 1.

Tabela 2.1: Medições do circuito da Prática 1.

R_c	v	i
0Ω		
1Ω		
2Ω		
$4,7\Omega$		
100Ω		
$10k\Omega$		
$100k\Omega$		
$1M\Omega$		
∞		

2.2.2 Prática 2

1. Monte o circuito mostrado na Figura 2.6 na *protoboard*;
2. Obtenha o valor da resistência interna, R_s , do gerador de sinais utilizando o método da comparação de impedâncias assim descrito:
 - (a) Meça a tensão em vazio, v_s , do gerador de sinais usando o multímetro;
 - (b) Utilizando um potenciômetro de 100Ω como a carga R_c , varie o valor da sua resistência até que a tensão medida nos terminais do gerador, v , seja igual à metade da tensão em vazio, v_s , do gerador de sinais;
 - (c) Em seguida, retire o potenciômetro do circuito e meça o valor de sua resistência

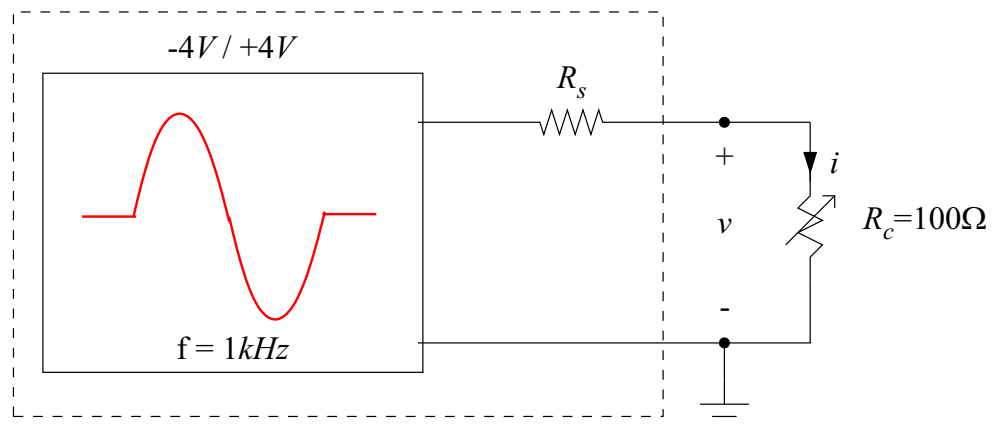


Figura 2.6: Circuito da Prática 2.

usando o multímetro. Esse valor é numericamente igual ao valor da resistência interna, R_s , do gerador de sinais.

3. De posse dos valores de v_s e R_s obtidos nesta prática, calcule os valores eficazes esperados de tensão e corrente para cada uma das resistências de carga da Tabela 2.1. Plote a característica $v \times i$ do gerador de sinais usando os resultados calculados, obtenha a fórmula da relação $v \times i$ do gerador de sinais e compare esta fórmula com a obtido na Prática 1.

Capítulo 3

Equivalentes de Thévenin e Norton

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

UM circuito equivalente de Thévenin (ou Norton) é constituído por uma fonte independente de tensão (ou corrente) e um resistor em série (ou paralelo), que substituem todas as fontes e resistores do circuito, como pode ser visto na Figura 3.1.

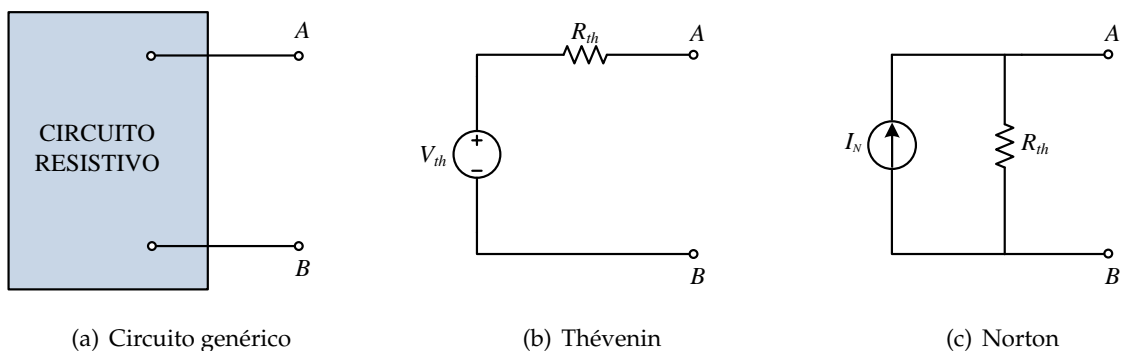


Figura 3.1: Circuitos equivalentes de Thévenin e Norton.

Para representar o circuito original pelo seu equivalente de Thévenin, é necessário determinar a tensão de Thévenin, V_{th} , através da medição da tensão entre os pontos A e B (V_{AB}). Em seguida, determina-se a resistência de Thévenin, R_{th} , retirando todas as fontes

de tensão e corrente do circuito, as substituindo por curto-circuitos e circuitos abertos, respectivamente, e medindo a resistência equivalente vista pelos pontos A e B (R_{AB}). Por fim, determina-se a corrente de Norton, I_N , aplicando um curto-circuito nos terminais A e B e medindo a corrente que circula pelo curto (I_{AB}).

Uma forma de verificar se as grandezas foram obtidas corretamente é checar a fórmula geral dos equivalentes de Thévenin e Norton:

$$V_{th} = R_{th} I_N \quad (3.1)$$

3.2 Práticas de Laboratório

Os objetivos das práticas são:

- Mostrar que um determinado circuito resistivo pode ser substituído por um equivalente de Thévenin ou Norton nos terminais de interesse;
- A equivalência entre os circuitos será determinado por medições da tensão de Thévenin e da corrente de Norton nos terminais de interesse dos dois circuitos.

Os materiais necessários às práticas são:

1. Fonte CC;
2. Multímetro;
3. *Protoboard*;
4. Resistores:
 - Prática 1 (1,2 k Ω ($\times 3$), 1,8 k Ω ($\times 2$), 2,2 k Ω e 3,3 k Ω);
 - Prática 2 (Potenciômetro de 1 k Ω).

3.2.1 Prática 1

Dado o circuito resistivo da Figura 3.2 e a Tabela 3.1, calcule e anote:

1. A tensão de Thévenin nos pontos A e B , V_{th} ;
2. A corrente de Norton nos pontos A e B , I_N ;
3. A resistência de Thévenin nos pontos A e B , R_{th} .

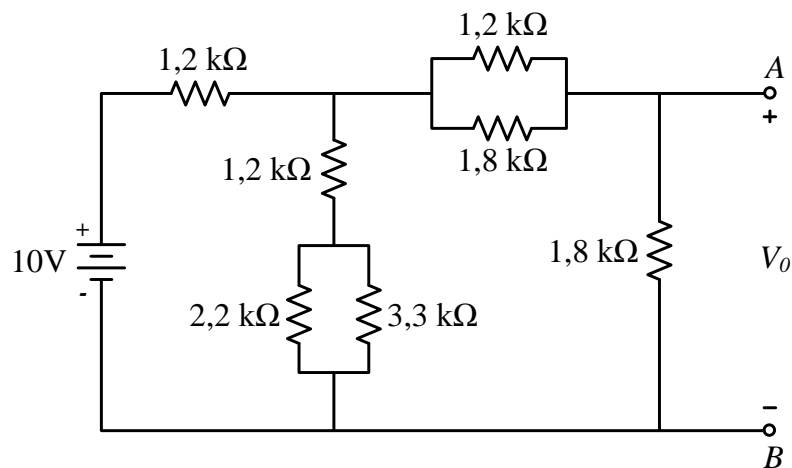


Figura 3.2: Circuito da Prática 1.

Tabela 3.1: Tabela relativa à Prática 1.

Variáveis	Valores calculados	Valores simulados	Valores medidos
V_{th}			
I_N			
R_{th}			

Considerando ainda o circuito da Figura 3.2 e a Tabela 3.1, simule-o, utilizando a biblioteca *SimPowerSystems* do MATLAB/Simulink, e obtenha as seguintes medições:

1. A tensão de Thévenin nos pontos A e B , V_{th} , como mostra a Figura 3.3;
2. A corrente de Norton nos pontos A e B , I_N , como mostra a Figura 3.4;
3. A resistência de Thévenin nos pontos A e B , R_{th} , como mostra a Figura 3.5.

Considerando ainda o circuito da Figura 3.2 e a Tabela 3.1, monte-o na *protoboard* e obtenha as seguintes medições com o multímetro:

1. A tensão entre os pontos A e B , que representa a tensão de Thévenin, V_{th} ;
2. A corrente de curto-circuito entre os pontos A e B , que representa a corrente de Norton, I_N ;
3. A resistência nos terminais A e B com a fonte CC substituída por um curto-circuito, que corresponde a resistência de Thévenin, R_{th} ;
4. Compare os valores calculados, simulados e medidos da Tabela 3.1.

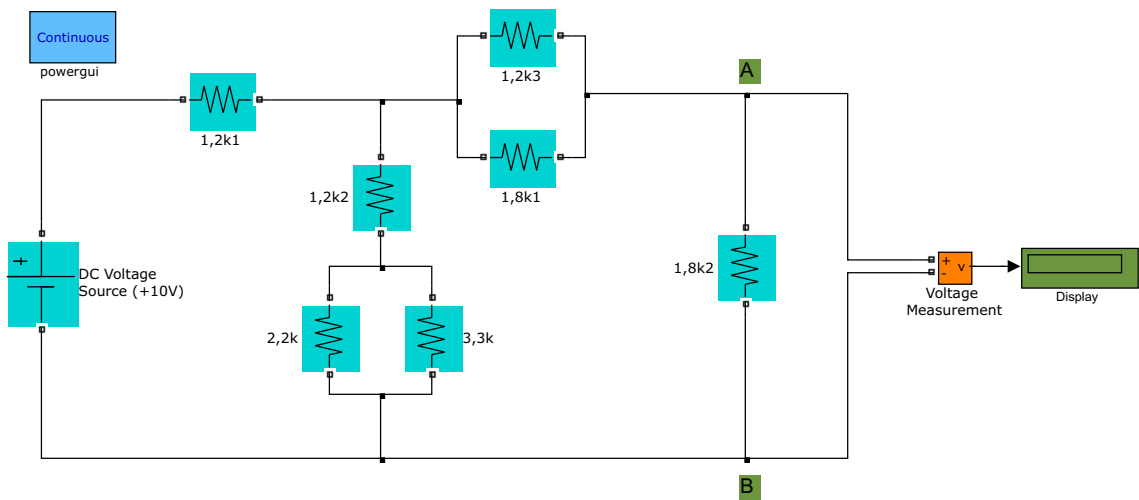


Figura 3.3: Medição da tensão de Thévenin, V_{th} .

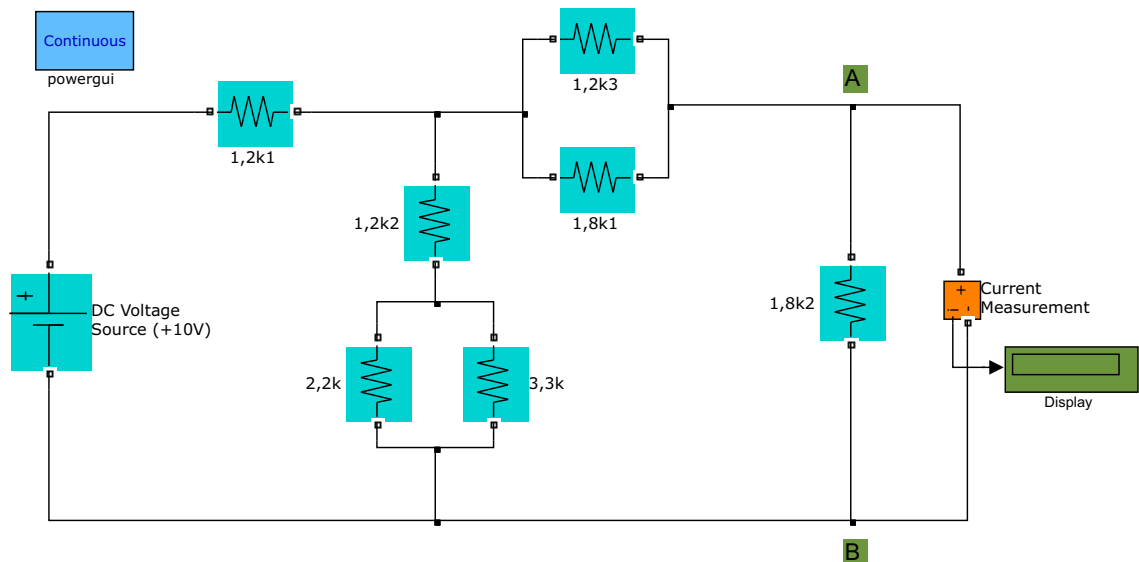


Figura 3.4: Medição da corrente de Norton, I_N .

3.2.2 Prática 2

Considerando o equivalente de Thévenin visto na Figura 3.1(b) e a Tabela 3.2, monte o circuito na protoboard e siga os passos:

1. Utilize o potenciômetro para obter o valor experimental de R_{th} . Configure a fonte de tensão CC para o valor experimental de V_{th} ;
2. Meça a tensão de Thévenin e corrente de Norton nos pontos A e B do circuito equivalente e preencha a Tabela 3.2;

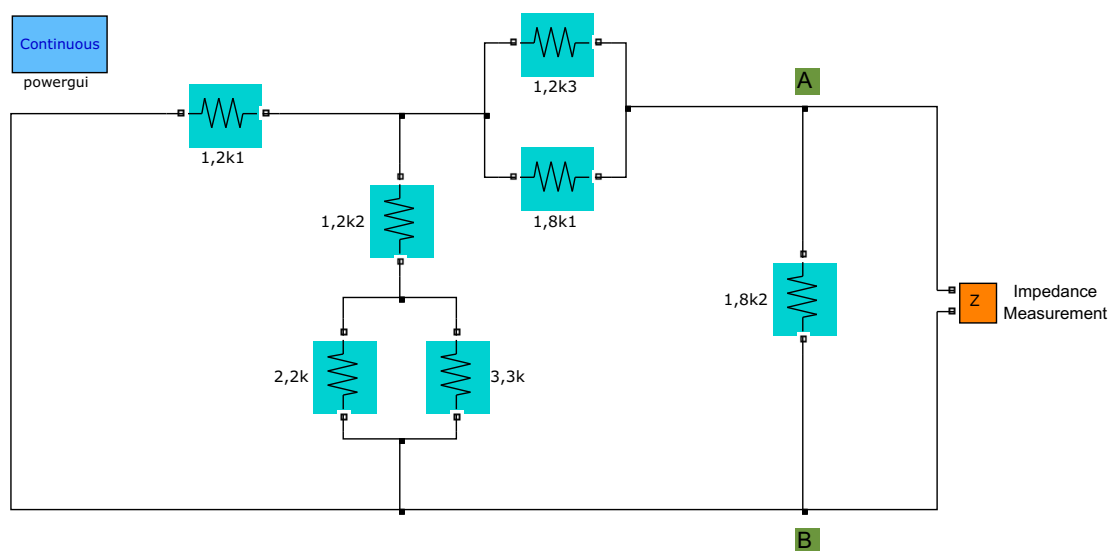


Figura 3.5: Medição da resistência de Thévenin, R_{th} .

3. Compare os valores das Tabelas 3.1 e 3.2.

Tabela 3.2: Tabela relativa à Prática 2.

Variáveis	Valores do equivalente de Thévenin
V_{th}	
I_N	

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 realizar operações matemáticas diversas com sinais analógicos como integração, diferenciação, adição, subtração, multiplicação, etc (daí o nome operacional). No entanto, a aplicação dos Amp-Ops vai além da implementação das operações matemáticas. Uma das razões para a popularidade do Amp-Op é a sua versatilidade e a sua capacidade de apresentar resultados experimentais muito próximos daqueles previstos no projeto teórico.

Na modelagem de circuitos com Amp-Ops, usa-se o conceito de *fonte dependente*, seja de tensão ou de corrente, na qual a fonte ativa de saída possui seu valor controlado ou dependente de uma variável de entrada, que pode ser uma tensão ou corrente.

4.1.1 Terminais de um Amp-Op

O Amp-Op é fabricado em um circuito integrado (CI), como pode ser visto no exemplo do Amp-Op LM741 ou TL071 mostrado na Figura 4.1. Do ponto de vista de sinais, o Amp-Op possui três terminais: dois terminais de entrada e um terminal de saída. A Figura 4.2 mostra o símbolo representativo de um Amp-Op. Os terminais 2 e 3 são as entradas e o

terminal 6 é a saída. Por serem elementos ativos de circuito, além dos sinais de entrada e saída, os Amp-Ops devem ser alimentados por uma fonte CC bipolar simétrica (ou, na minoria dos casos, por uma fonte CC unipolar). Os terminais 7 e 4 são usados para essa finalidade.

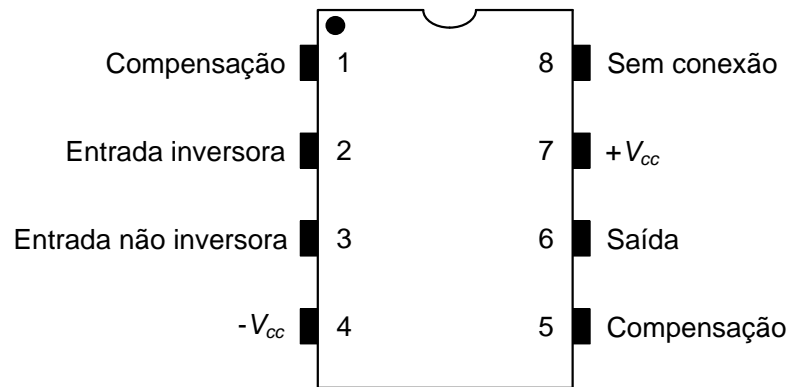


Figura 4.1: Terminais do CI Amp-Op LM741 ou TL071.

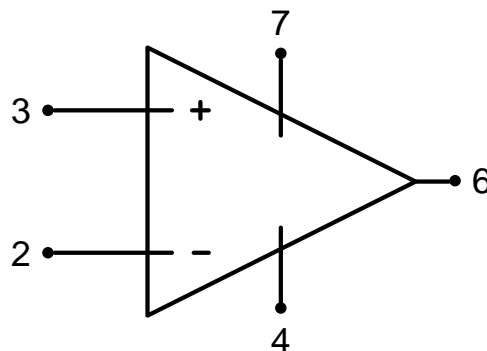


Figura 4.2: Representação do Amp-Op LM741 ou TL071.

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

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

Assumindo que $R_o = 0$ e $R_s = \infty$, deve-se levar em conta as seguintes restrições impostas pelo Amp-Op ao conectar elementos de circuitos aos seus terminais de entrada e saída:

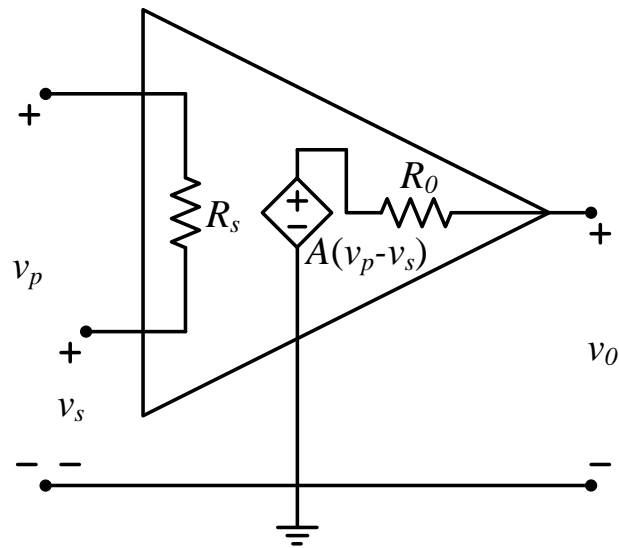


Figura 4.3: Modelo simplificado de um Amp-Op.

$$v_o = A(v_p - v_s), \quad (4.1)$$

e

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

em que $\pm V_{cc}$ são as tensões CC simétricas aplicadas aos terminais 7 e 4 do Amp-Op.

O gráfico da Figura 4.4 sintetiza as equações (4.1) e (4.2). Particularmente, a tensão de saída, v_o , deve estar entre os valores limites $\pm V_{cc}$ para que não ocorra o fenômeno da **saturação** no Amp-Op.

Assim sendo, de forma resumida, se as restrições

1. Há um caminho de realimentação da saída (terminal 6) do Amp-Op para sua entrada inversora (terminal 2);
2. A tensão de saída do Amp-Op, v_o , deve estar entre os valores limites $\pm V_{cc}$ (não pode estar saturado);

forem obedecidas, as considerações

1. As correntes consumidas pelas entradas inversora e não inversora (terminais 2 e 3) são nulas;
2. As tensões nas entradas inversora e não inversora (terminais 2 e 3) são iguais;

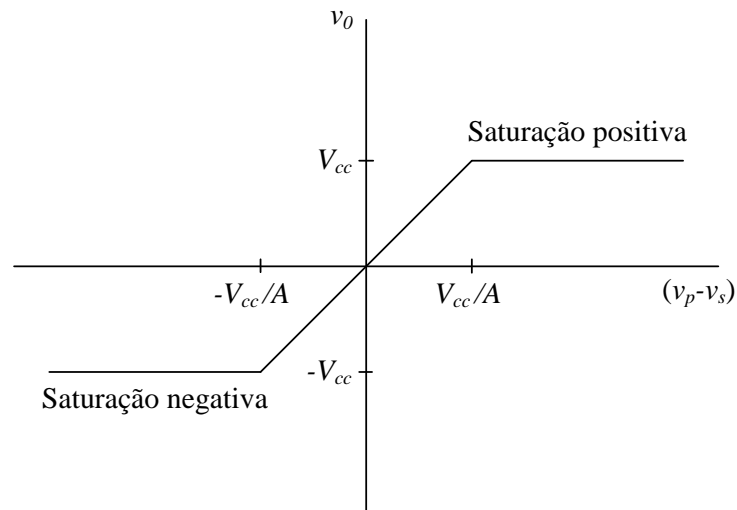


Figura 4.4: Curva característica de ganho de malha aberta de um Amp-Op.

podem ser usadas para se resolver circuitos lineares contendo Amp-Ops ideais.

4.2 Práticas de Laboratório

Os objetivos das práticas são:

- Aprender a utilizar o CI do Amp-Op;
- Verificar o comportamento de fontes dependentes ou controladas.

Os materiais necessários às práticas são:

- Fonte CC;
- Gerador de sinais;
- Multímetro;
- Osciloscópio;
- *Protoboard*;
- CI LM741;
- Resistores:

– Prática 1 ($20k\Omega$, $100k\Omega$ e $2,2k\Omega$);

– Prática 2 ($20k\Omega$ e $100k\Omega$ ($\times 2$)).

- Amplificador operacional TL071.

4.2.1 Prática 1

O circuito da Figura 4.5 é referente a um Amp-Op na configuração amplificador inversor.

Baseado neste circuito, siga os passos:

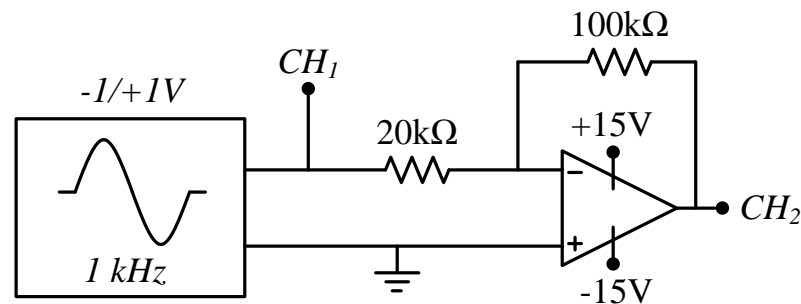


Figura 4.5: Circuito com Amp-Op na configuração amplificador inversor.

1. Calcule o ganho teórico do circuito, v_o/v_i , sabendo que v_i e v_o são as tensões do gerador de sinais e na saída do Amp-Op, respectivamente;
2. Simule o circuito, utilizando a biblioteca *SimPowerSystems* do MATLAB/Simulink, de acordo com a Figura 4.6 e estime o ganho simulado do circuito;
3. Monte o circuito da Figura 4.5 e meça, com o osciloscópio, as tensões dos canais 1 e 2. Baseado nas formas de onda obtidas, estime o ganho experimental do circuito;
4. Verifique se as formas de onda experimentais são equivalente às da simulação e compare os ganhos encontrados;
5. Monte o circuito da Figura 4.7. Qual a sua relação com o circuito da Figura 4.5?
6. Calcule os valores eficazes teóricos de V_x e I_x no circuito da Figura 4.7;
7. Meça os valores de V_x e I_x no circuito experimental com o multímetro e compare-os com os valores teóricos.

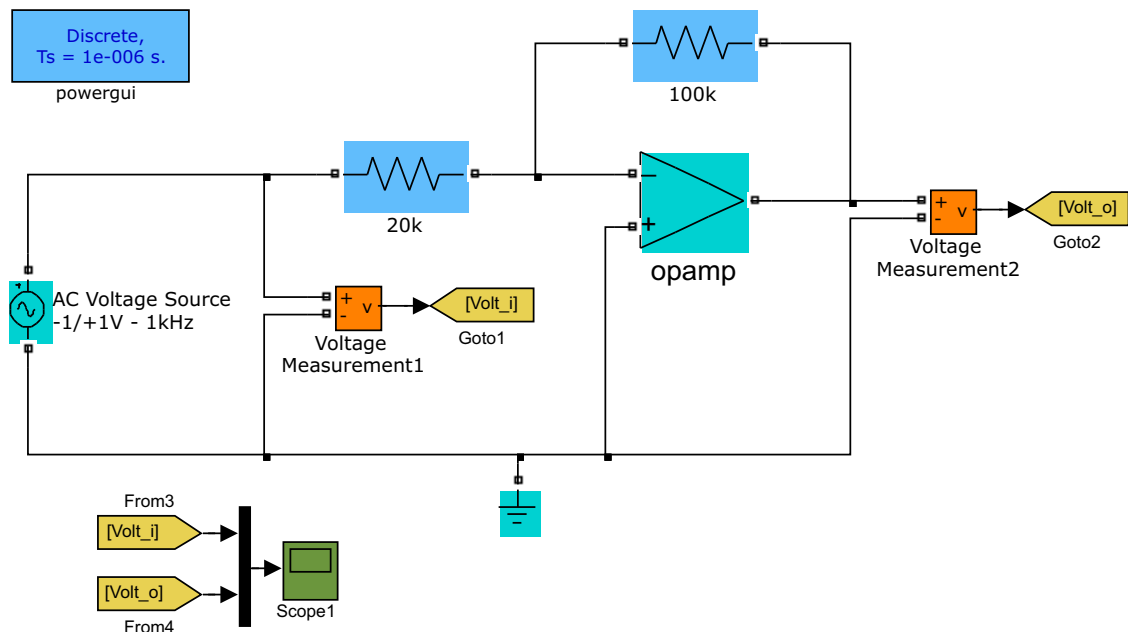


Figura 4.6: Simulação do circuito da Prática 1.

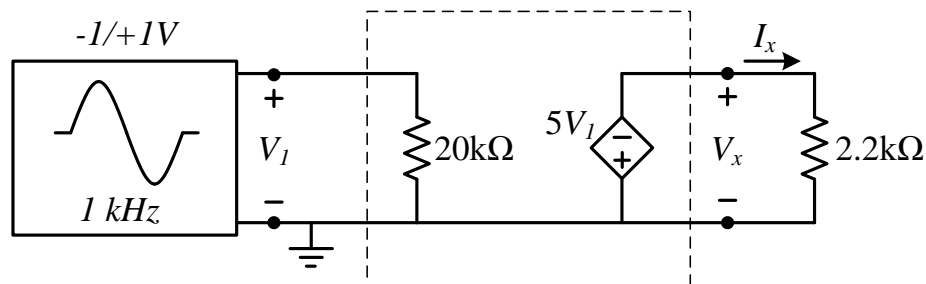


Figura 4.7: Circuito baseado em uma fonte dependente de tensão, referente à Prática 1.

4.2.2 Prática 2

O circuito da Figura 4.8 é referente a um Amp-Op na configuração amplificador somador inversor. Baseado neste circuito, siga os passos:

1. Calcule a tensão de saída y_1 em função das tensões de entrada x_1 e x_2 do Amp-Op;
2. Simule o circuito, utilizando a biblioteca *SimPowerSystems* do MATLAB/Simulink, de acordo com a Figura 4.9 e verifique se a tensão de saída corresponde à calculada teoricamente;
3. Monte o circuito da Figura 4.8 e meça, com o osciloscópio, as tensões x_1 , x_2 e y_1 . Baseado nas formas de onda obtidas, verifique se a tensão de saída corresponde à

simulada.

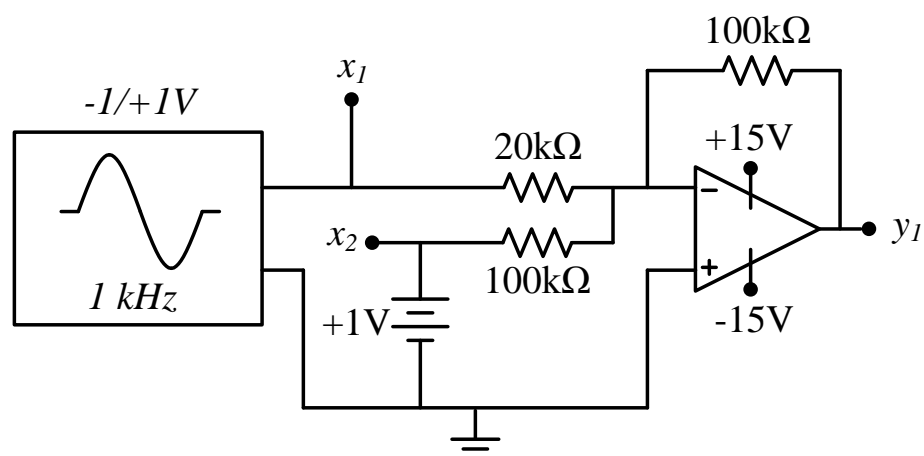


Figura 4.8: Circuito com Amp-Op na configuração amplificador somador inversor.

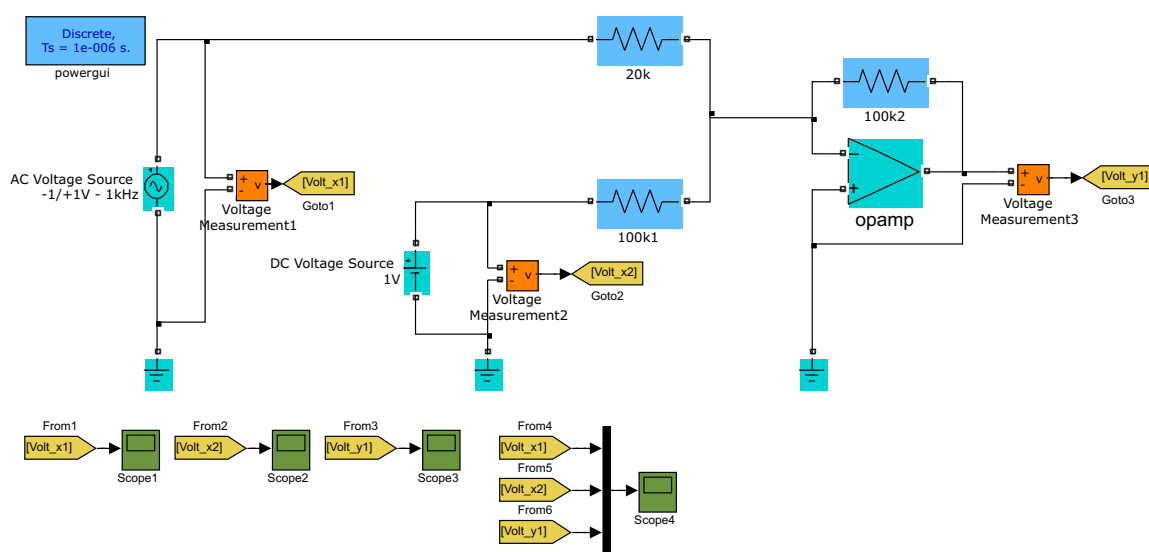


Figura 4.9: Simulação do circuito da Prática 2.

Capítulo 5

Circuitos de 1ª Ordem

5.1 Resumo Teórico - Circuitos RC [1–5]

SEJA o circuito mostrado na Figura 5.1, no qual o capacitor com capacitância C é carregado ao potencial V_o por uma fonte de tensão CC, E . No instante inicial $t = 0$, a chave k_1 é aberta e a chave k_2 é fechada simultaneamente. Assim, o capacitor carregado é desconectado da fonte CC e passa a fornecer energia ao resistor. Em virtude da carga armazenada no capacitor, haverá uma corrente $i(t)$, mostrada na Figura 5.1, circulando pelo circuito de saída. A tensão no capacitor decrescerá gradualmente até se tornar nula, ocorrendo o mesmo com a corrente. Durante esta etapa de descarga, a energia elétrica armazenada no capacitor é dissipada sob a forma de calor no resistor.

Após a operação das chaves k_1 e k_2 , tem-se que

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

A equação (5.1) é uma equação diferencial linear de primeira ordem homogênea, cuja solução é da forma exponencial

$$v_c(t) = Ke^{-t/\tau}, \quad (5.2)$$

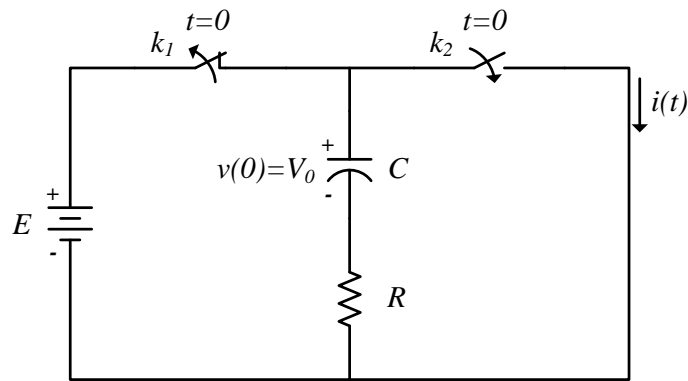


Figura 5.1: Circuito de carga e descarga RC.

em que $\tau = RC$ é a constante de tempo do circuito e K é uma constante a ser definida pela condição inicial do circuito.

Fazendo $t = 0$ na equação (5.2), obtém-se que $K = v(0) = V_0 = E$. Portanto, a tensão no capacitor durante a **descarga** é dada por

$$v_c(t) = V_0 e^{-t/RC}, \quad t \geq 0, \quad (5.3)$$

enquanto que a corrente do capacitor é dada por

$$\begin{aligned} i_c(t) &= C \frac{dv_c}{dt} \\ &= -\frac{V_0}{R} e^{-t/RC}, \quad t \geq 0 \end{aligned} \quad (5.4)$$

A tensão $v_c(t)$ e a corrente $i_c(t)$ estão traçados nas Figuras 5.2 e 5.3.

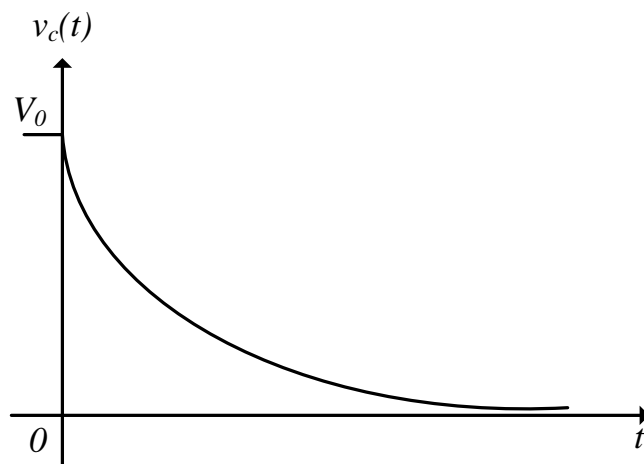


Figura 5.2: Tensão no capacitor da Figura 5.1.

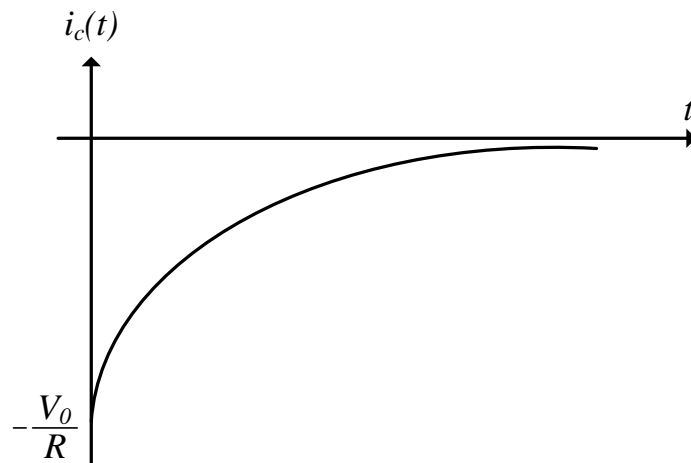


Figura 5.3: Corrente no capacitor da Figura 5.1.

De forma equivalente, durante o processo de **carga** do circuito RC, a tensão no capacitor é dada por

$$v_c(t) = V_o(1 - e^{-t/RC}), \quad t \geq 0, \quad (5.5)$$

enquanto que a corrente do capacitor é dada por

$$\begin{aligned} i_c(t) &= C \frac{dv_c}{dt} \\ &= \frac{V_o}{R} e^{-t/RC}, \quad t \geq 0 \end{aligned} \quad (5.6)$$

5.2 Prática de Laboratório

O objetivo das práticas é trabalhar com um circuito em que seja possível observar o comportamento de carregamento e descarregamento de um capacitor, bem como a sua constante de tempo.

Os materiais necessários às práticas são:

- Gerador de sinais;
- Osciloscópio;
- *Protoboard*;
- Resistores: $39k\Omega$ e 390Ω ;
- Capacitores: $5,6nF$ e $22nF$.

5.2.1 Prática 1

Dado o circuito da Figura 5.4, considere as seguintes adaptações:

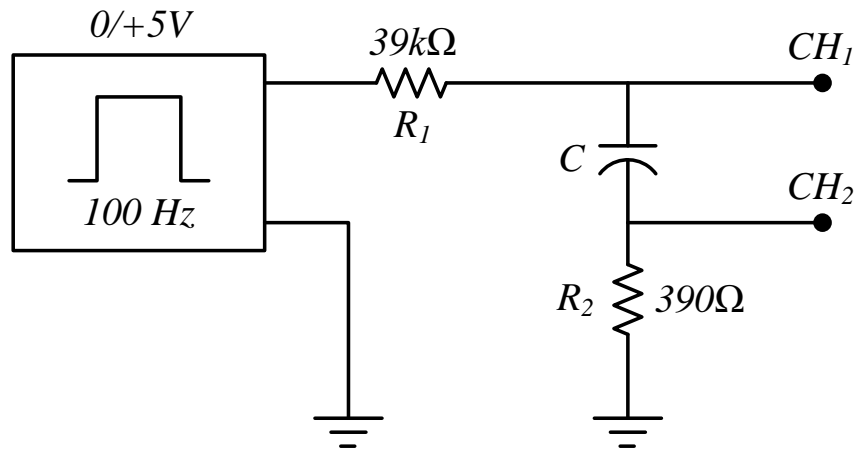


Figura 5.4: Circuito de carga e descarga RC.

- O gerador de sinais configurado para gerar uma onda quadrada emula o comportamento de abertura e fechamento das chaves k_1 e k_2 da Figura 5.1. A frequência deve ser escolhida de forma a permitir observar um ciclo de carga e de descarga completos no capacitor;
- O resistor R_1 e o capacitor C são os componentes principais do circuito RC, definindo a constante de tempo, τ , de carga e descarga. O resistor R_2 é usado apenas para possibilitar a medição indireta da corrente do capacitor com o osciloscópio e deve ser escolhido de modo a introduzir um erro desprezível quando comparado com a tensão no capacitor, ou seja, R_2 deve ser muito menor do que R_1 (use $R_2 \simeq R_1/100$).

Baseado nestas considerações, siga os passos:

1. Simule o circuito da Figura 5.4, utilizando a biblioteca *SimPowerSystems* do MATLAB/Simulink, de acordo com a Figura 5.5;
2. Selecione a fonte de tensão para gerar uma onda quadrada com frequência de 100Hz e amplitude de 5V;
3. Obtenha os gráficos de tensão e de corrente no capacitor para os dois valores de capacitância: 5,6nF e 22nF;

4. Compare os dois resultados com relação às suas constantes de tempo.

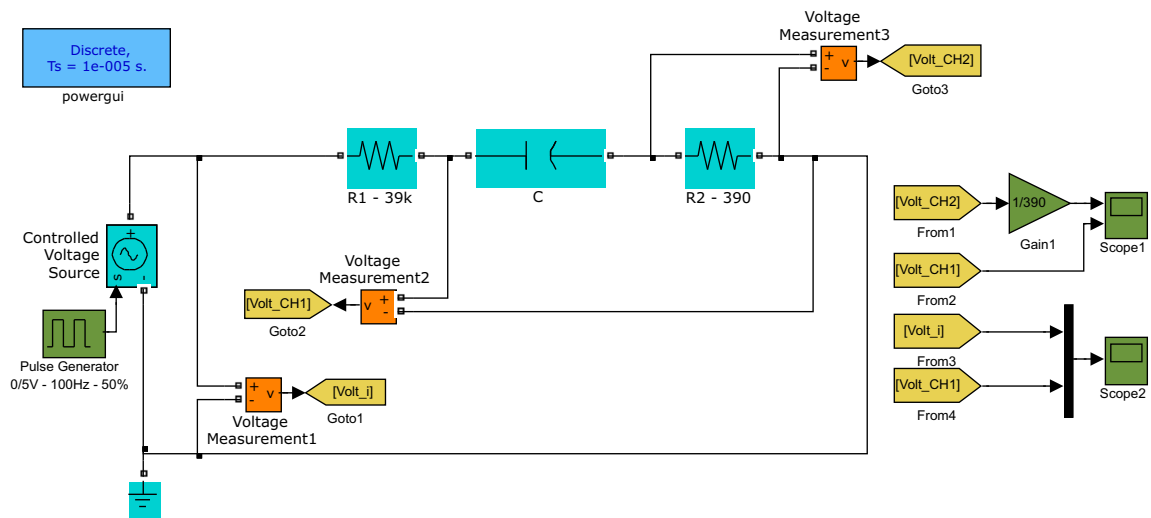


Figura 5.5: Simulação do circuito da Prática1.

5.2.2 Prática 2

Monte o circuito mostrado na Figura 5.4 e siga os passos:

1. Configure o gerador de funções para gerar uma onda quadrada com frequência de 100Hz e amplitude de 5V;
2. Conecte os canais 1 e 2 do osciloscópio aos pontos CH_1 e CH_2 , respectivamente. O canal 1 fornece a leitura da tensão no capacitor e o canal 2 a leitura da corrente;
3. Ajuste as escalas de tempo e amplitude do osciloscópio de modo a obter uma melhor precisão nas medidas e escolha o sincronismo com a subida do canal 2;
4. Estime os valores de tensão e corrente no capacitor em função da constante de tempo $\tau = R_1 C$ e complete a Tabela 5.1 (use os cursores do osciloscópio). Considere $t = 0$ como o tempo correspondente ao pico positivo da corrente no capacitor.

Tabela 5.1: Medidas relativas à Prática 2.

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

5. Utilizando as equações (5.5) e (5.6), calcule os valores teóricos de tensão e de 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%, opinando sobre as prováveis fontes de erro;
7. Salve os gráficos experimentais da tensão e da corrente no capacitor para os dois casos da Tabela 5.1 e compare-os com os obtidos na simulação.

Capítulo 6

Circuitos de 2ª Ordem

6.1 Resumo Teórico - Circuitos RLC [1–5]

As análises de circuitos RLC normalmente são realizadas utilizando-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, será abordado apenas o comportamento dos circuitos RLC submetidos a um degrau unitário para a ligação série e paralelo dos seus componentes.

6.1.1 Circuito RLC Série

A aplicação da Lei das Tensões Kirchhoff no 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

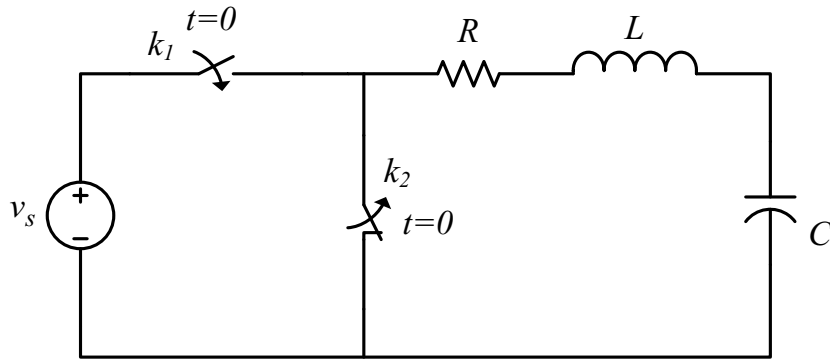


Figura 6.1: Circuito RLC série submetido a um degrau de tensão.

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

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 **coeficiente de amortecimento** (em radianos por segundo) e o parâmetro ω_0 é chamado de **frequência angular de ressonância**.

Os zeros do polinômio característico, chamados de *raízes características*, são iguais a

$$s_{1,2} = -\alpha \pm \sqrt{\alpha^2 - \omega_0^2}. \quad (6.4)$$

A resposta ao degrau do sistema depende da relação entre os valores de α e ω_0 , podendo ser:

1. $\alpha < \omega_0$: raízes complexas e conjugadas \Rightarrow **circuito subamortecido**;
2. $\alpha = \omega_0$: raízes reais e iguais \Rightarrow **circuito criticamente amortecido**;
3. $\alpha > \omega_0$: raízes reais e distintas \Rightarrow **circuito superamortecido**.

As respostas ao degrau da corrente no circuito RLC série podem ser vistos na Figura 6.2.

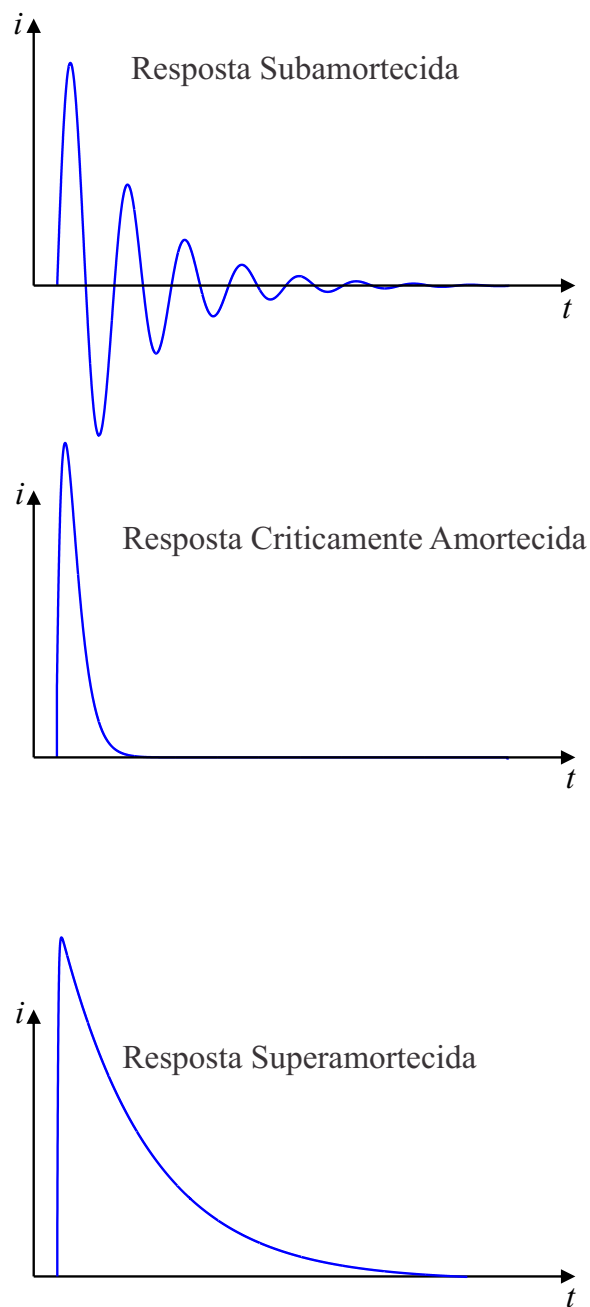


Figura 6.2: Respostas ao degrau da corrente em um circuito RLC série.

6.1.2 Circuito RLC Paralelo

Para o circuito RLC paralelo da Figura 6.3, tem-se que

$$\begin{aligned}
 i_R + i_L + i_C &= i_s, \\
 \frac{v}{R} + \frac{1}{L} \int v dt + I_0 + C \frac{dv}{dt} &= i_s.
 \end{aligned} \tag{6.5}$$

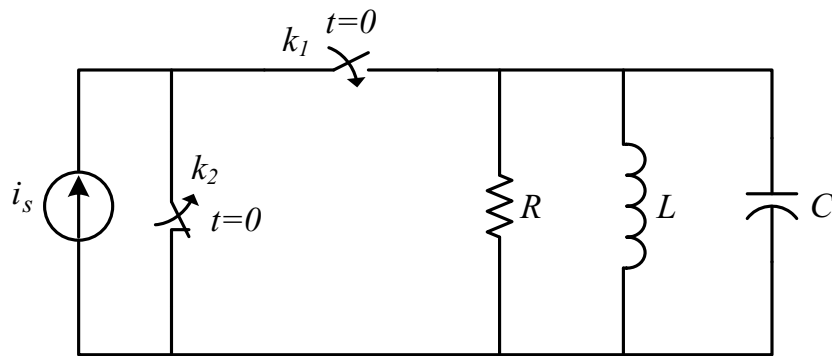


Figura 6.3: Circuito RLC paralelo submetido a um degrau de corrente.

Diferenciando, obtém-se

$$\begin{aligned} C \frac{d^2 v}{dt^2} + \frac{1}{R} \frac{dv}{dt} + \frac{v}{L} &= 0, \\ \frac{d^2 v}{dt^2} + \frac{1}{RC} \frac{dv}{dt} + \frac{v}{LC} &= 0. \end{aligned} \quad (6.6)$$

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

A resposta ao degrau do sistema depende da relação entre os valores de α e ω_0 , podendo ser:

1. $\alpha < \omega_0$: raízes complexas e conjugadas \Rightarrow **circuito subamortecido**;
2. $\alpha = \omega_0$: raízes reais e iguais \Rightarrow **circuito criticamente amortecido**;
3. $\alpha > \omega_0$: raízes reais e distintas \Rightarrow **circuito superamortecido**.

As respostas ao degrau da tensão no circuito RLC série podem ser vistos na Figura 6.4.

6.2 Práticas de Laboratório

O objetivo das práticas é analisar o comportamento de um circuito RLC submetido a um degrau de tensão ou de corrente, registrando seus estados sub, sobre e criticamente amortecidos.

Os materiais necessários às práticas são:

- Fonte CC;
- Gerador de funções;
- Osciloscópio;

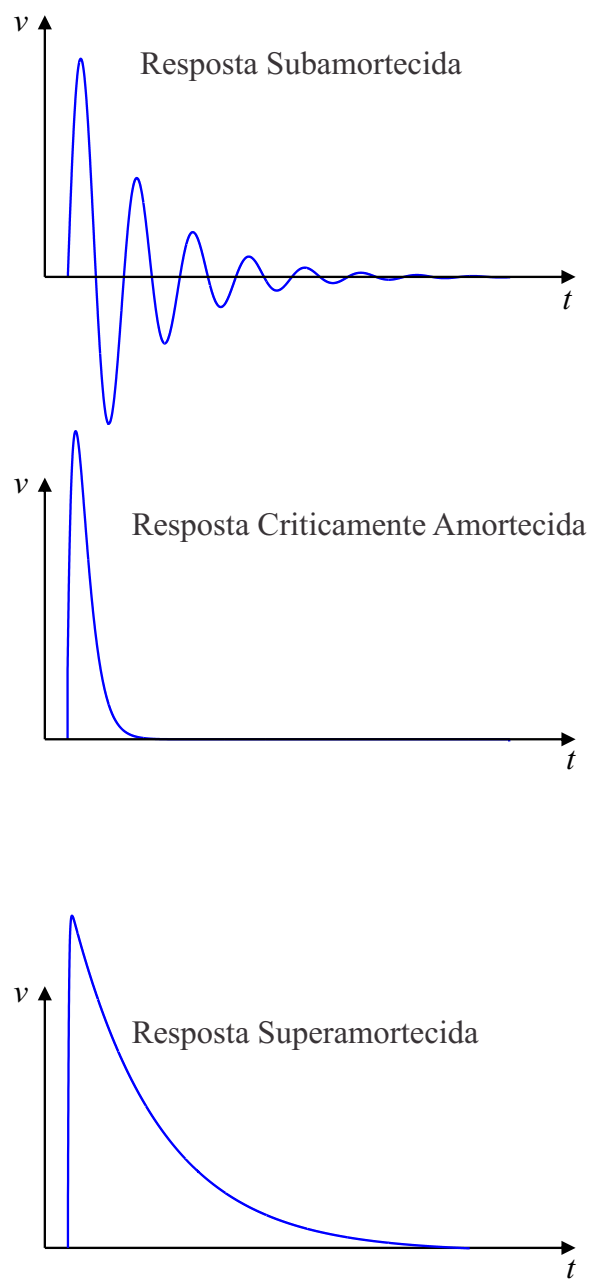


Figura 6.4: Respostas ao degrau da tensão em um circuito RLC paralelo.

- *Protoboard*;
- Resistor a ser calculado;
- Potenciômetro: $5k\Omega$;
- Indutor: $1mH$;
- Capacitor: $100nF$;

- Amplificador operacional TL071.

6.2.1 Prática 1

Dado o circuito RLC série da Figura 6.5, siga os passos:

1. Calcule os valores de R para os três tipos de amortecimento, anotando-os na Tabela 6.1;

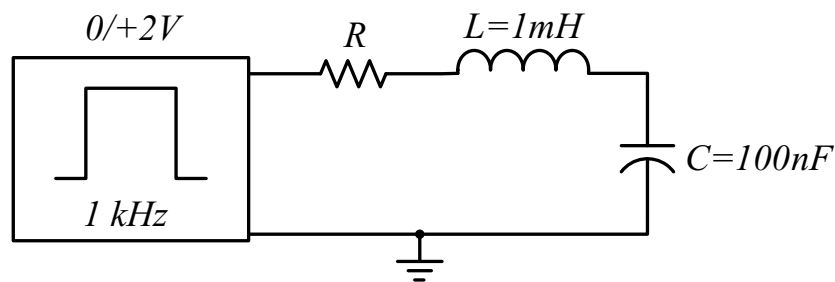


Figura 6.5: Circuito da Prática 1.

Tabela 6.1: Valores da resistência R da Prática 1.

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

2. Simule o circuito RLC série, utilizando a biblioteca *SimPowerSystems* do MATLAB/Simulink como mostra a Figura 6.6, para os três casos da Tabela 6.1 e obtenha as curvas da corrente no circuito;
3. Compare as correntes simuladas com as respostas teóricas esperadas;
4. Monte o circuito RLC série da Figura 6.5 na *proto board*. Utilize um amplificador operacional TL071 configurado como *buffer*, como mostrado na Figura 6.7, de forma a eliminar o efeito da resistência da fonte (R_s) no circuito;
5. Obtenha, no osciloscópio, a forma de onda da corrente no circuito (de forma indireta através da tensão no resistor) para os três tipos de amortecimento e compare os resultados experimentais com os simulados e os teóricos.

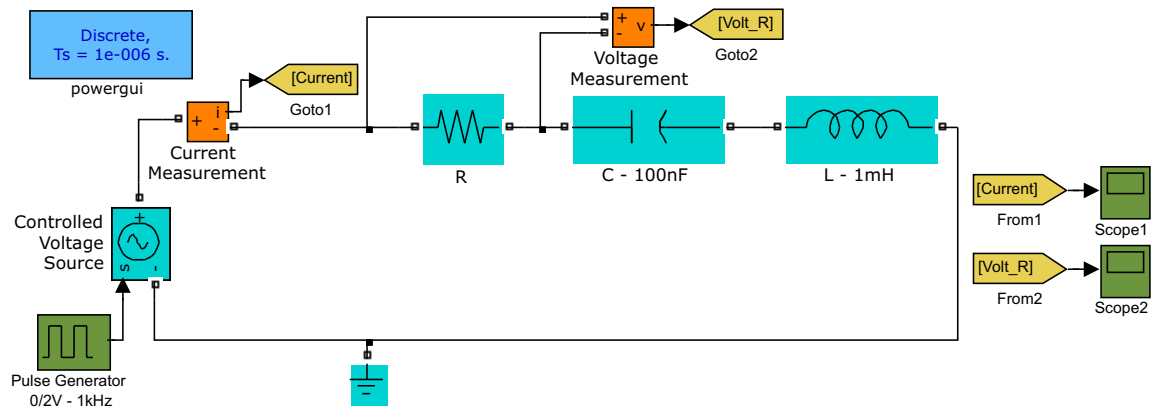
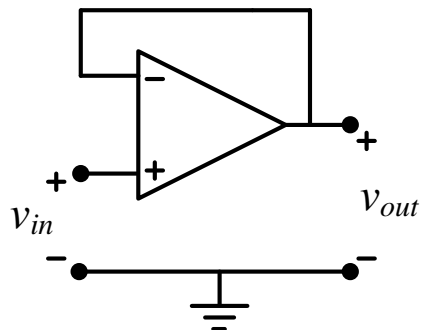


Figura 6.6: Simulação do circuito da Prática 1.

Figura 6.7: Amp-Op TL071 configurado como *buffer*.

6.2.2 Prática 2

Dado o circuito RLC paralelo da Figura 6.8, siga os passos:

1. Calcule os valores de R para os três tipos de amortecimento, anotando-os na Tabela 6.2;

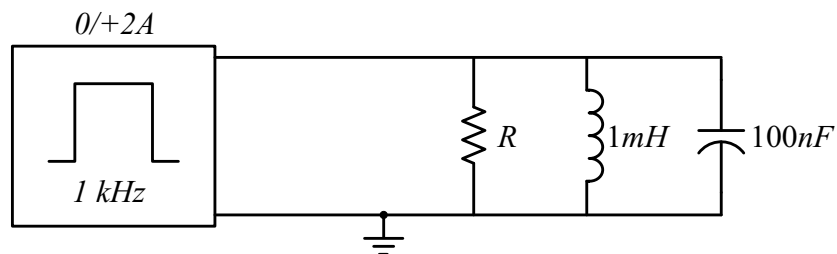


Figura 6.8: Circuito da Prática 2.

2. Simule o circuito RLC paralelo, utilizando a biblioteca *SimPowerSystems* do MATLAB/Simulink como mostra a Figura 6.9, para os três casos mostrados na Tabela

Tabela 6.2: Valores da resistência R da Prática 2.

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

6.2 e obtenha as curvas da tensão no circuito;

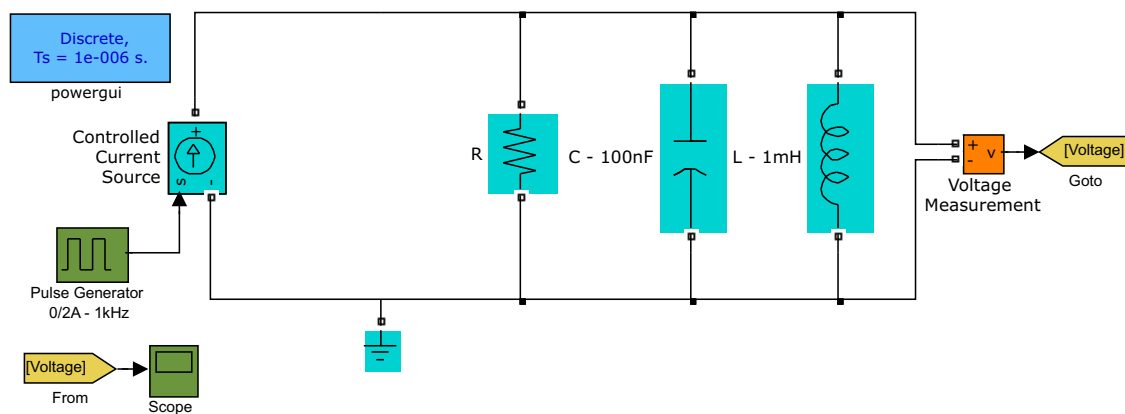


Figura 6.9: Simulação do circuito da Prática 2.

3. Compare as tensões simuladas com as respostas teóricas esperadas;

Capítulo 7

Circuitos CA em Regime Permanente

7.1 Resumo Teórico - Leis de Kirchhoff para Circuitos Fasoriais [1]

As Leis de Kirchhoff constituem importante ferramenta para análise de circuitos elétricos. No Capítulo 1 foi verificado experimentalmente que estas leis podem ser aplicadas para obtenção dos valores de tensão e corrente em circuitos de corrente contínua. No presente capítulo será verificada a aplicação da LKT em circuitos de corrente alternada em regime permanente descritos por fasores.

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

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

e 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 pode corresponder ao valor de pico ou ao valor eficaz do sinal de tensão e $\angle \phi_n$ corresponde a fase desse sinal.

Substituindo-se os fasores na equação (7.2) obtém-se

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

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

7.2 Resumo Teórico - Equivalente de Thévenin para Circuitos Fasoriais [1]

No Capítulo 3, os teoremas de rede de Thévenin 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 no Capítulo 3.

As mudanças consistem na substituição da tensão de Thévenin (V_{th}), da corrente de Norton (I_N) e da resistência de Thévenin (R_{th}) por suas representações fasoriais \mathbf{V}_{th} , \mathbf{I}_N e \mathbf{Z}_{th} . Feitas essas substituições, o processo de obtenção dos circuitos equivalentes de Thévenin e Norton seguem os mesmos procedimentos discutidos no Capítulo 3. Note também que a aplicação direta dos equivalentes de Thévenin e Norton em circuitos reativos somente é possível em circuito lineares excitados por apenas uma frequência.

Do ponto de vista experimental, obter circuitos equivalentes de Thévenin 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 Práticas de Laboratório

Os objetivos das práticas são:

- Verificar a aplicação das Leis de Kirchhoff em circuitos regime permanente CA utilizando a análise fasorial;
- Verificar a aplicação do Teorema de Thévenin em circuitos em regime permanente CA contendo elementos reativos.

Os materiais necessários às práticas são:

- Fonte CC;
- Gerador de funções;
- Osciloscópio;
- Multímetro;
- *Protoboard*;
- Resistores: 100Ω , $1k\Omega$ e $2,2k\Omega$;
- Indutor: $1mH$;
- Capacitores: $10nF$ e $1\mu F$;
- Amplificador operacional TL071.

7.3.1 Prática 1

Dado o circuito da Figura 7.1, siga os passos:

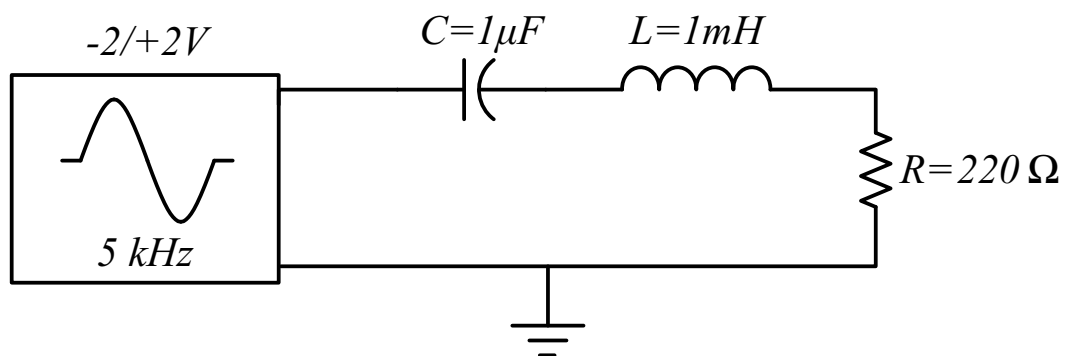


Figura 7.1: Circuito da Prática 1.

1. Simule o circuito, utilizando a biblioteca *SimPowerSystems* do MATLAB/Simulink, de acordo com a Figura 7.2. Obtenha as tensões eficazes nos elementos e preencha os valores na Tabela 7.1;

2. Verifique as formas de onda das tensões nos *Scopes 1 e 2* da Figura 7.2. Explique os seus comportamentos;
3. Monte, na *protoboard*, o circuito da Figura 7.1. Utilize um amplificador operacional TL071, configurado como *buffer* (ver Capítulo 6), de forma a eliminar o efeito da resistência da fonte (R_s) no circuito;
4. Meça as tensões eficazes em todos os elementos do circuito usando o osciloscópio e preencha a Tabela 7.1;

Tabela 7.1: Valores eficazes medidos nos elementos do circuito da Prática 1.

	V_{fonte}	$V_{capacitor}$	$V_{indutor}$	$V_{resistor}$
Valores eficazes (simulados)				
Valores eficazes (medidos)				

5. Meça, com o osciloscópio e de forma simultânea, as tensões na fonte e no resistor do

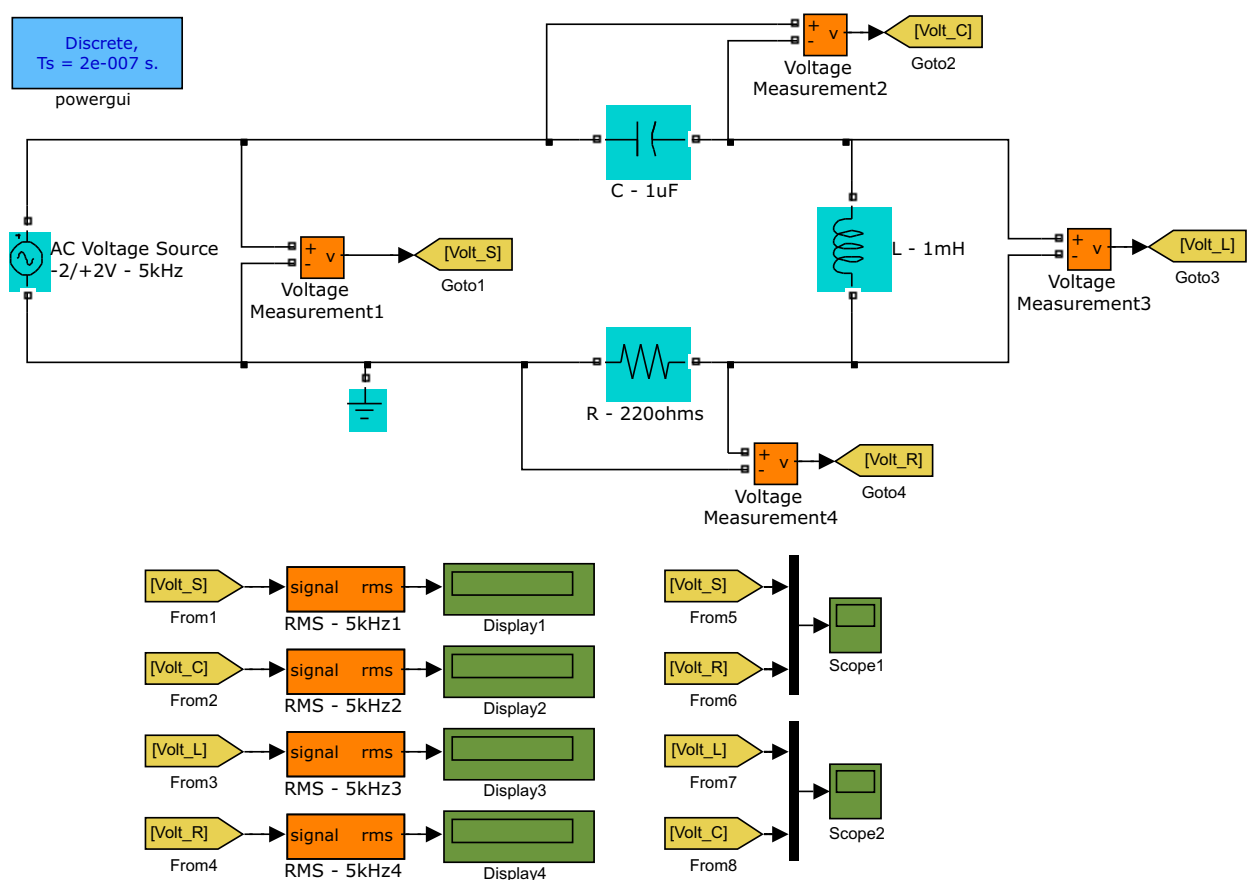


Figura 7.2: Simulação do circuito Prática 1.

circuito. Discuta sobre as formas de onda obtidas;

6. Aplique a LKT na malha do circuito da Figura 7.1 utilizando os valores anotados na Tabela 7.1. A LKT é verificada para os valores simulados e medidos? Justifique sua resposta.

7.3.2 Prática 2

Dado o circuito da Figura 7.3, siga os passos:

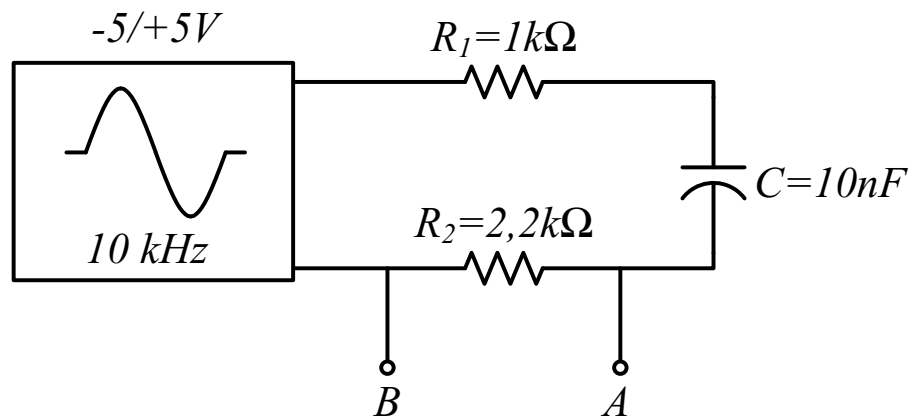


Figura 7.3: Circuito da Prática 2.

1. Monte, na *protoboard*, o circuito da Figura 7.3;
2. Proponha um procedimento experimental, utilizando apenas o osciloscópio (função *Measurements*), para estimar o módulo da impedância equivalente de Thévenin ($|Z_{TH}|$) vista dos terminais A-B;
3. Utilize o procedimento proposto e encontre $|Z_{TH}|$;
4. Mude a frequência do gerador de 10kHz para 20kHz e estime novamente $|Z_{TH}|$. Compare os resultados obtidos para as duas frequências e comente as diferenças;
5. Faça o cálculo teórico de $|Z_{TH}|$ para as frequências de 10kHz e 20kHz e compare os resultados obtidos com os resultados experimentais.

Capítulo 8

Fator de Potência para Circuitos Fasoriais

8.1 Resumo Teórico [1–5]

SUPONHA uma função senoidal dada por

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

em que V_m é a *amplitude* da senoide e ω é a sua *frequência angular*. Uma expressão mais geral para sua representação é dada por

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

em que ϕ é o ângulo de fase ou simplesmente *fase*. Um esboço dessas senoides em função do tempo é apresentado na Figura 8.1. A senoide da Equação 8.2 é simplesmente a senoide da Equação 8.1 deslocada de ϕ/ω segundos ou ϕ radianos para a esquerda. Portanto, pode-se dizer que a senoide da Equação 8.2 está adiantada por ϕ radianos.

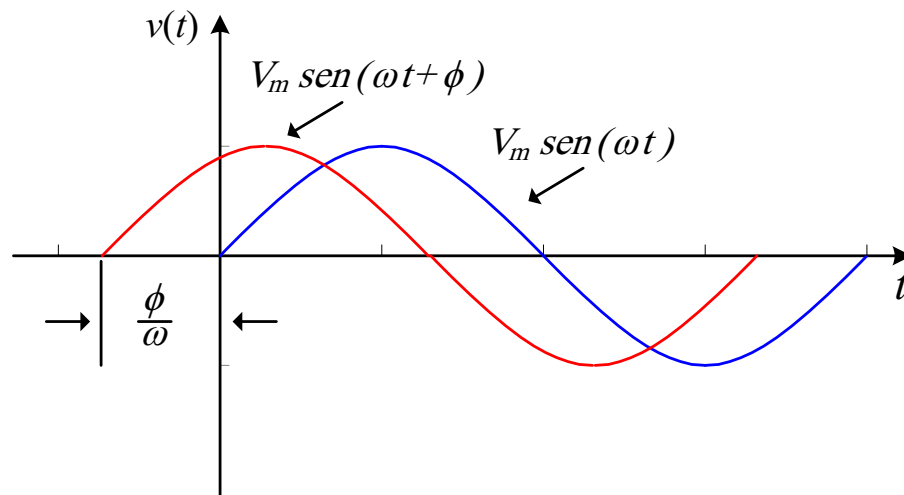


Figura 8.1: Duas senóides com fases distintas.

8.2 Relação Fasorial Tensão-Corrente para Elementos Reativos [1–5]

8.2.1 Indutância

No indutor, a relação tensão-corrente é dada por

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

em que v e i são definidos como

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

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

Convertendo a tensão e a corrente senoidais por componentes complexas ($V_m e^{j(\omega t + \phi)}$ e $I_m e^{j(\omega t + \theta)}$) e as substituindo na Equação 8.3, tem-se

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

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

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

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

Assim, 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 $i = I_m \cos(\omega t + \phi)$ e $\mathbf{V} = (j\omega L)\mathbf{I}$, então a tensão fasorial é dada por

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

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

pois $j = 1 \angle 90^\circ$. No domínio do tempo, tem-se

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

Comparando a Equação 8.18 com $i = I_m \cos(\omega t + \phi)$, percebe-se que, para o indutor, a corrente está atrasada 90° em relação à tensão, como pode ser visto na Figura 8.2.

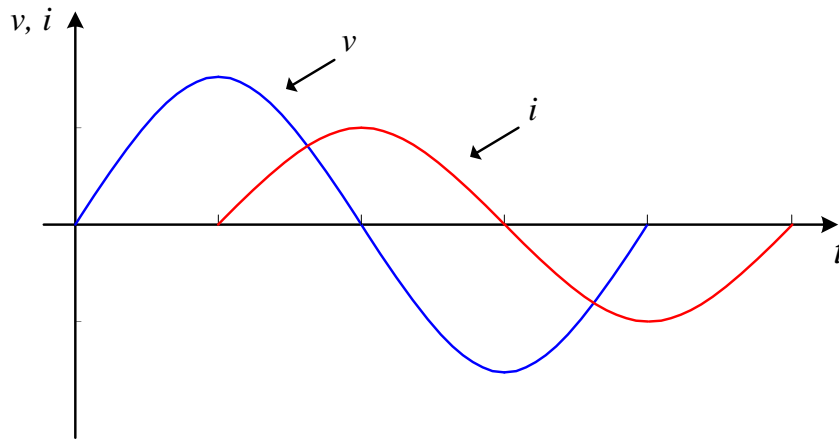


Figura 8.2: Formas de onda da tensão e da corrente em um indutor.

8.2.2 Capacitância

No capacitor, a relação tensão-corrente é dada por

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

Substituindo as expressões de corrente e tensão complexas na relação no domínio do tempo, obtém-se

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

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

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

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

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

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

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

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

e, no domínio do tempo, chega-se a

$$i = \omega C V_m \cos(\omega t + \theta + 90^\circ). \quad (8.18)$$

Portanto, no caso do capacitor, a corrente está adiantada 90° em relação à tensão, como pode ser visto na Figura 8.3.

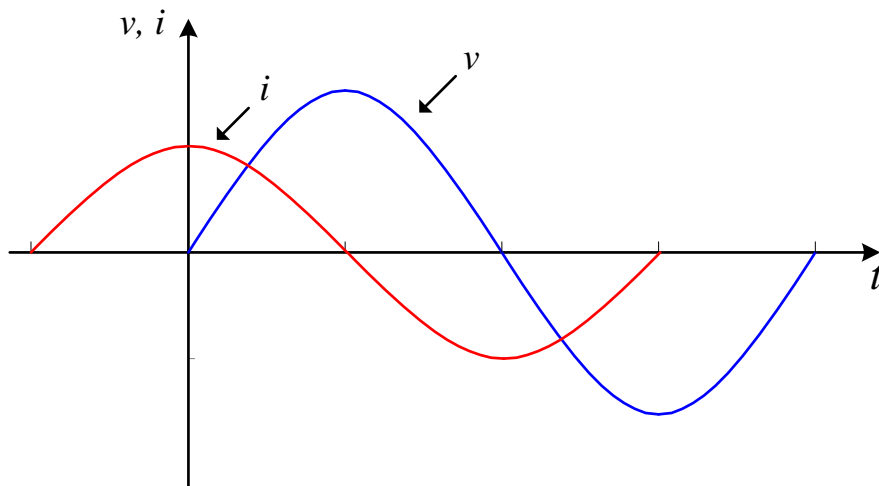


Figura 8.3: Formas de onda da tensão e da corrente em um capacitor.

8.3 Potência Ativa e Fator de Potência [1–5]

A *potência média ou ativa* (P) entregue a uma carga em regime permanente CA é

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

A potência ativa, dada em *watts* (W), é igual ao produto da tensão eficaz pela corrente eficaz e pelo cosseno do ângulo entre os fasores tensão e corrente. Na prática, tensões e correntes eficazes são de fácil medição e seu produto, $V_{eficaz} I_{eficaz}$, é chamado de *potência aparente* (S). A potência aparente é normalmente referida em termos de sua unidade, *voltamperes* (VA), de forma a se evitarem enganos e confusão com a unidade de potência ativa. É óbvio que a potência ativa não pode nunca ser superior a potência aparente.

A relação entre potência ativa e potência aparente é definida como *fator de potência*. Logo, se fp é o fator de potência, tem-se que

$$fp = \frac{P}{S} = \frac{P}{V_{eficaz} I_{eficaz}} = \cos \theta, \quad (8.20)$$

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 e, portanto, $\theta = 0$ e $fp = 1$ (potência aparente é igual a potência ativa). Em uma carga puramente reativa, $\theta = \pm 90^\circ$, $fp = 0$ e a potência ativa 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° . No caso de circuitos contendo mais de um elemento reativo, o fator de potência unitário também é possível de ser alcançado, caso as reatâncias desses elementos se cancelem. Ajustar as reatâncias das cargas para que se aproximem desta condição é muito importante em sistemas elétricos de potência. Para circuitos mais genéricos, tem-se:

- Circuito com característica resistiva-capacitiva (RC): fator de potência adiantado;
- Circuito com característica resistiva-indutiva (RL): fator de potência atrasado.

8.3.1 Correção do Fator de Potência

Considerar um método de *correção do fator de potência* de uma carga tendo uma impedância genérica Z , definida como

$$Z = R + jX \quad (8.21)$$

É possível alterar o fator de potência desta carga ao conectar uma impedância Z_1 em paralelo com Z , como mostrado na Figura 8.4. Devido à conexão paralela, fica claro que a tensão na carga não muda. Visto que Z é fixa, a sua corrente I não muda e a potência entregue a carga não é afetada. A corrente I_t fornecida pelo gerador, entretanto, muda, fazendo com que o fator de potência enxergado pelo gerador seja diferente.

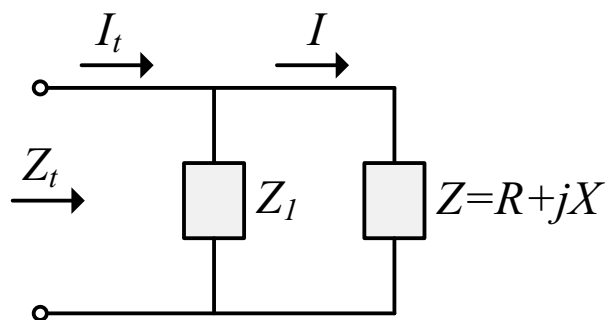


Figura 8.4: Circuito para correção do fator de potência.

Realizando a associação paralela das impedâncias, chega-se a

$$Z_t = \frac{ZZ_1}{Z + Z_1} \quad (8.22)$$

Em geral, a impedância adicionada Z_1 é selecionada de forma que ela absorva boa parte da potência reativa gerada pela carga Z e assim Z_t tenha um fator de potência maior do que a carga original. Esta condição requer que Z_1 seja puramente reativa, ou seja,

$$Z_1 = jX_1 \quad (8.23)$$

Rearranjando Z_t em termos de R e X da carga original e X_1 da carga de correção do fator de potência, encontra-se

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

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

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

Calculando o fator de potência da carga resultante Z_t , encontra-se

$$fp = \cos \left[\tan^{-1} \left(\frac{\text{Im } Z_t}{\text{Re } Z_t} \right) \right] \quad (8.26)$$

Usando (8.25) em (8.26), obtém-se

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

$$\cos^{-1}(fp) = \tan^{-1} \left(\frac{R^2 + X(X + X_1)}{RX_1} \right) \quad (8.28)$$

$$\tan[\cos^{-1}(fp)] = \frac{R^2 + X(X + X_1)}{RX_1} \quad (8.29)$$

Resolvendo (8.29) em termos de X_1 , chega-se a

$$X_1 = \frac{R^2 + X^2}{R \tan[\cos^{-1}(fp)] - X} \quad (8.30)$$

em que o termo $\tan[\cos^{-1}(fp)]$ é escolhido como *positivo* se o fp desejado é *atrasado* (*indutivo*) e é escolhido como *negativo* se o fp desejado é *adiantado* (*capacitivo*). Além disso, se o valor encontrado para X_1 for *positivo*, então a carga a ser adicionada é um *indutor puro* e, se o valor encontrado para X_1 for *negativo*, então a carga a ser adicionada é um *capacitor puro*.

8.4 Prática de Laboratório

Os objetivos da prática são:

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

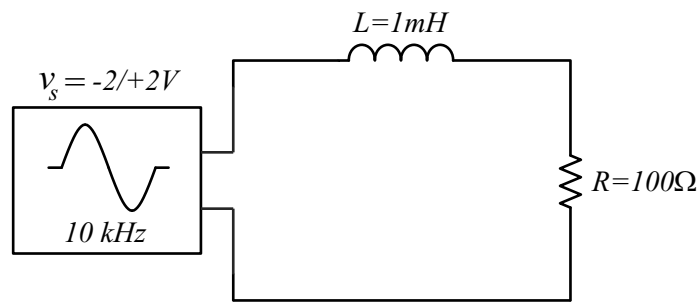
Os materiais necessários à prática são:

- Fonte CC;
- Gerador de funções;
- Osciloscópio;
- Multímetro;
- *Protoboard*;
- Resistores: 100Ω e 1Ω (para medição da corrente);
- Indutor: $1mH$;
- Capacitor: a ser calculado;
- Amplificador operacional TL071.

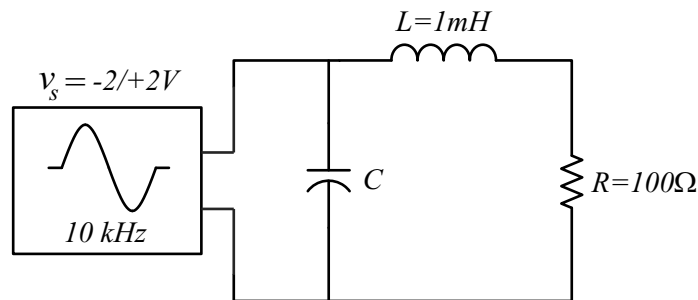
8.4.1 Prática 1

Dado o circuito RL da Figura 8.5(a), siga os passos:

1. Calcule o seu fator de potência usando a Equação 8.26;
2. Simule o circuito RL, utilizando a biblioteca *SimPowerSystems* do MATLAB/Simulink como visto na Figura 8.6, e compare o fator de potência encontrado com o calculado. Obtenha um gráfico com a diferença de fase entre a corrente e a tensão vistas pelo gerador;
3. Calcule o valor do capacitor C que deve ser incluído ao circuito RL, como mostrado na Figura 8.5(b), de forma que se obtenha um fator de potência igual a 0,95 indutivo;



(a) Carga resistiva-indutiva.



(b) Carga resistiva-indutiva com capacitor.

Figura 8.5: Circuito da Prática 1.

4. Simule o circuito RLC da Figura 8.5(b), utilizando a biblioteca *SimPowerSystems* do MATLAB/Simulink como visto na Figura 8.7, e compare o fator de potência encontrado com o desejado. Obtenha um gráfico com a diferença de fase entre a corrente e a tensão vistas pelo gerador;
5. Monte os dois circuitos da Figura 8.5 na *protoboard*. Utilize um amplificador operacional TL071, configurado como *buffer* (ver Capítulo 6), para eliminar o efeito da resistência da fonte (R_s) no circuito;
6. Obtenha gráficos da diferença de fase entre a corrente e a tensão vistas pelo gerador. Compare as diferenças de fase experimentais com as simuladas, antes e depois da correção do fator de potência;
7. Utilize a ferramenta de cursores do osciloscópio para determinar a diferença de fase entre a tensão e a corrente e estime o fator de potência visto pelo gerador antes e depois da correção do fator de potência. Compare os fatores de potência experimentais com os simulados;
8. Calcule e meça o valor eficaz da corrente entregue pelo gerador nos dois casos da Figura 8.5. Compare os valores teóricos e experimentais;

9. Utilize os valores de corrente encontrados para fundamentar uma justificativa da importância da correção do fator de potência em âmbito industrial.

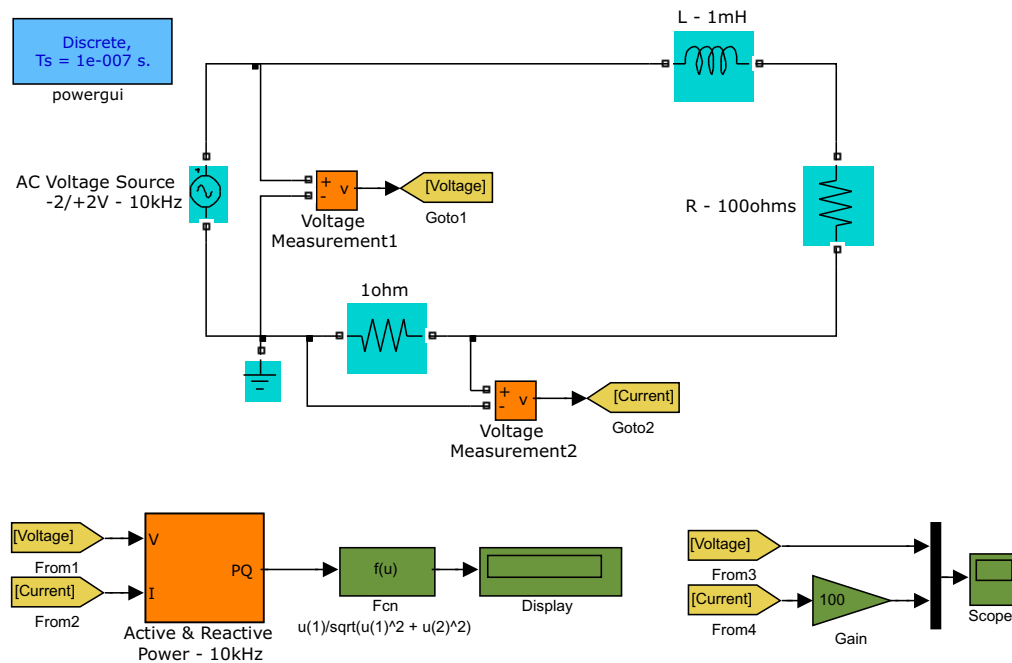


Figura 8.6: Simulação do circuito da Figura 8.5(a).

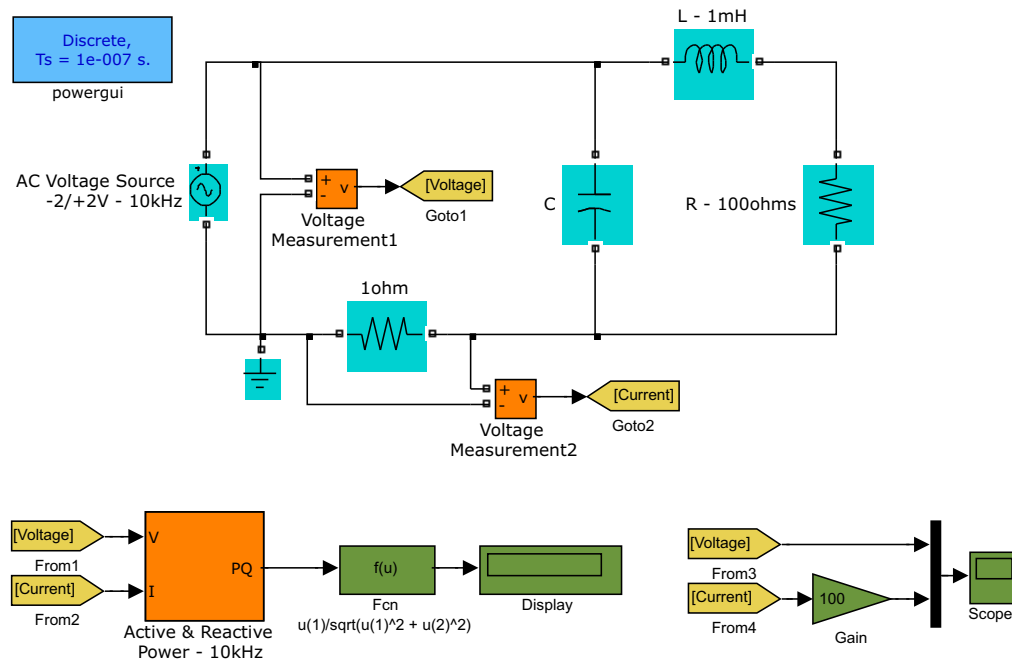


Figura 8.7: Simulação do circuito da Figura 8.5(b).

Referências Bibliográficas

- [1] D. E. Johnson e J. L. Hilburn e J. R. Johnson. *Fundamentos de Análise de Circuitos*. LTC, 4th edition, 2001.
- [2] J. W. Nilsson e S. A. Riedel. *Circuitos Elétricos*. Pearson, 10th edition, 2016.
- [3] M. Nahvi e J. A. Edminister. *Circuitos Elétricos*. Bookman, 5th edition, 2014.
- [4] J. R. Cogdell. *Foundations of Electrical Engineering*. Prentice Hall, 2nd edition, 1996.
- [5] Charles A. Desoer e Ernest S. Kuh. *Teoria Básica de Circuitos*. Guanabara Dois, 1st edition, 1988.