

Manual de Experimentos de Laboratório de Circuitos Elétricos

9 de março de 2018

Universidade Federal do Amazonas

Sumário

Parte I Introdução ao Laboratório de Circuitos Elétricos

1	A Lei de Ohm, Ohmímetro, e Circuitos Resistivos	3
1.1	Introdução	3
1.1.1	Objetivos	3
1.2	Descrição dos experimentos	4
1.2.1	Resistores e o Ohmímetro	4
1.2.2	A Lei de Ohm e Circuitos Resistivos	5
1.3	Questões para o relatório	7
2	Voltímetro, amperímetro e as leis de Kirchhoff	9
2.1	Introdução	9
2.1.1	Objetivos	9
2.2	Descrição dos experimentos	10
2.2.1	Leis de Kirchhoff	10
2.2.2	Linearidade e Reciprocidade	10
2.3	Questões para o relatório	12
3	Resistores Variáveis	15
3.1	Introdução	15
3.1.1	Objetivos	15
3.2	Descrição dos experimentos	16
3.2.1	Potenciômetro	16
3.2.2	Trimpots e Multivoltas	16
3.2.3	NTC e PTC	17
3.3	Questões para o relatório	17

Parte II Teoremas de Análise de Circuitos

4	Análise nodal e de malhas e circuitos com amplificadores operacionais	21
4.1	Introdução	21
4.1.1	Objetivos	21
4.2	Descrição dos experimentos	22
4.2.1	Ponte de Wheatstone	22

4.2.2	O amplificador operacional	23
4.2.3	Comparador de tensão	23
4.2.4	Seguidor de Tensão (Buffer)	24
4.2.5	Amplificador Inversor	25
4.2.6	Divisor de Tensão	26
4.3	Questões para o relatório	27
5	Teoremas de Análise de Circuitos	29
5.1	Introdução	29
5.1.1	Objetivos	30
5.2	Materiais Utilizados	30
5.3	Descrição dos experimentos	30
5.3.1	Associação e Transformação de fontes	30
5.3.2	Teoremas de Norton, Thevenín e Superposição	31
5.4	Questões para o relatório	33
Parte III Resposta completa de circuitos RLC		
6	Circuitos RC, RL e RLC	37
6.1	Introdução	37
6.1.1	Objetivos	37
6.2	Materiais Utilizados	38
6.3	Descrição dos experimentos	38
6.3.1	Carga e descarga de um capacitor	38
6.3.2	Transitório em circuitos RC	39
6.3.3	Transitório em circuitos RL	40
6.3.4	Transitório em circuitos RLC	40
6.4	Questões para o relatório	41
Parte IV Análise no Regime Permanente Senoidal		
7	Circuitos elétricos no regime estacionário senoidal - Parte I	45
7.1	Introdução	45
7.1.1	Objetivos	46
7.2	Materiais Utilizados	46
7.3	Descrição dos experimentos	46
7.3.1	Regime permanente senoidal em circuitos RC	46
7.3.2	Regime permanente senoidal em circuitos RL	47
7.3.3	Regime permanente senoidal em circuitos RLC	48
7.4	Questões para o relatório	49
8	Circuitos elétricos no regime estacionário senoidal - Parte II	51
8.1	Introdução	51
8.1.1	Objetivos	51
8.2	Materiais Utilizados	52
8.3	Descrição dos experimentos	52
8.3.1	Teorema de Thevenín e Potência no Regime permanente Senoidal	52

Sumário	vii
8.3.2 Correção de fator de potência	53
8.4 Questões para o relatório	53

Parte V Potência e Energia

Parte I
Introdução ao Laboratório de Circuitos
Elétricos

Experimento 1

A Lei de Ohm, Ohmímetro, e Circuitos Resistivos

Resumo Neste experimento inicial de Laboratório de Circuitos Elétricos, será introduzido um dos elementos mais básicos: o **resistor** fixo. Serão apresentados os tipos básicos de resistores, e algumas técnicas de identificação e leitura dos mesmos, como o **código de cores**. Neste experimento, o discente terá contato com o primeiro medidor elétrico, o **ohmímetro**, e o empregará para verificar experimentalmente o efeito da **associação de resistores**.

1.1 Introdução

Resistores são componentes eletrônicos cuja principal característica é a sua oposição à passagem de corrente elétrica, a resistência elétrica.

Diferentes tipos de resistores são identificados e têm seus valores lidos de formas diferentes. Uma das formas mais conhecidas é o código de cores, sistema de leitura empregado em resistores de película. A leitura do código de cores permite obter parâmetros como o valor nominal da resistência elétrica, a tolerância (incerteza associada a esse valor nominal), e o coeficiente de temperatura. O instrumento utilizado para a medida de resistência elétrica é o ohmímetro, que apesar de também apresentar medidas com incertezas como qualquer instrumento, é a forma mais confiável de se obter o valor de uma resistência elétrica.

O resistor é naturalmente um dispositivo transforma (dissipa) energia elétrica em calor, fenômeno conhecido como efeito Joule. Portanto, além da resistência elétrica, a capacidade de dissipar calor sem sofrer danos é outra importante especificação de resistores.

1.1.1 Objetivos

Os objetivos desse experimento são:

- Reconhecer os diferentes tipos de resistores e identificar seus parâmetros, tais como, resistência nominal, tolerância, coeficiente de temperatura e potência máxima;
- Empregar o ohmímetro para medir resistências elétricas;
- Verificar experimentalmente a Lei de Ohm;
- Verificar o efeito das diferentes associações de resistências elétricas;
- Compreender o funcionamento de circuitos básicos resistivos, como o divisor de tensão.

1.2 Descrição dos experimentos

1.2.1 Resistores e o Ohmímetro

1.2.1.1 Materiais Utilizados

- 15 resistores com valores aleatórios;
- Multímetro digital.

1.2.1.2 Procedimentos Experimentais

1. Identifique o tipo de cada resistor.
2. Realize a leitura do valor nominal, tolerância, máxima potência, e coeficiente de temperatura para cada resistor;
3. Utilize o ohmímetro para medir a resistência de cada resistor;
4. Escolha 8 dos resistores e nomeie-os como R_1 , R_2 , R_3 , ..., e R_8 (procure utilizar valores da mesma ordem de grandeza e indique suas escolhas com uma tabela);
5. Monte o circuito da figura 1.1 e meça a resistência entre os pontos a e b ;

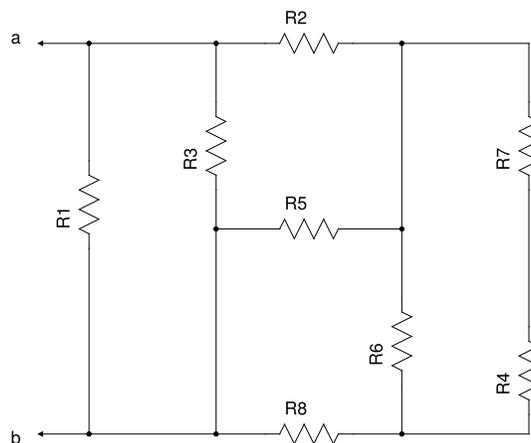


Figura 1.1

6. Monte o circuito da figura 1.2 e meça a resistência entre os pontos *a* e *b*;

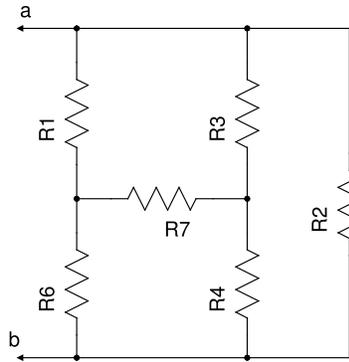


Figura 1.2

7. Monte o circuito da figura 1.3 e meça a resistência entre os pontos *a* e *b*;

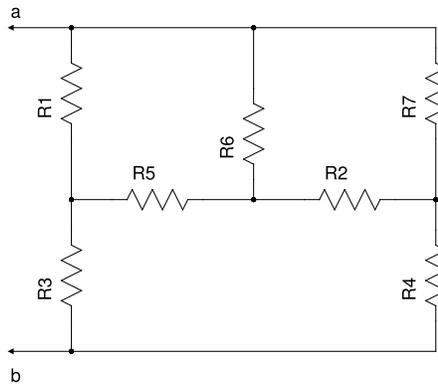


Figura 1.3

8. Monte o circuito da figura 1.4 e meça a resistência entre cada dois pontos do circuito.

1.2.2 A Lei de Ohm e Circuitos Resistivos

1.2.2.1 Materiais Utilizados

- 6 resistores;
- Multímetro digital.

ATENÇÃO: escolha resistores levando em conta a potência máxima que será dissipada no circuitos.

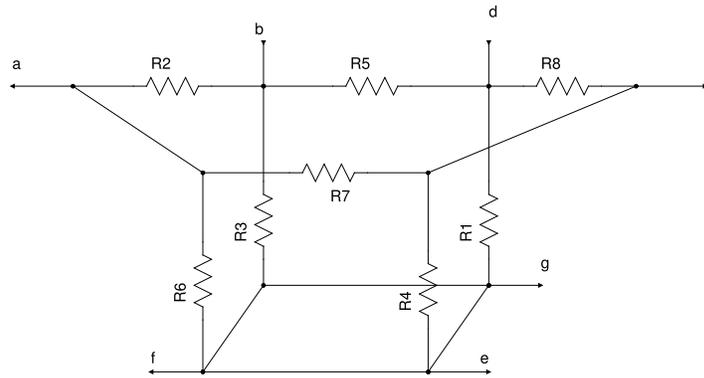


Figura 1.4

1.2.2.2 Procedimentos Experimentais

1. Monte o circuito da figura 1.5, para $1k\Omega \leq R_1 < R_2 \leq 20k\Omega$;

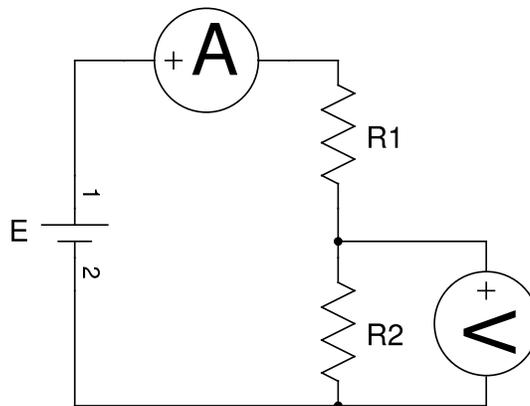


Figura 1.5

2. Meça as resistências elétricas de R_1 e R_2 com o auxílio de um ohmímetro;
3. Meça com um voltmímetro e um amperímetro a corrente e a tensão indicadas na figura 1.5 para $E = 0.5V$;
4. Repita o procedimento 3 para $E = 1V, E = 1,5V, E = 2V, E = 2,5V, E = 3V, E = 3,5V, E = 4V, E = 4,5V, e E = 5V$;
5. Repita os passos 2-4 para $2M\Omega \leq R_1 < R_2 \leq 20M\Omega$;
6. Repita os passos 2-4 para $1\Omega \leq R_1 < R_2 \leq 10\Omega$ (escolha resistores de potência adequada ao experimento);

1.3 Questões para o relatório

- 1.1. Como podemos identificar o coeficiente de temperatura através de código de cores?
- 1.2. Quais os tipos de resistores mais adequados para aplicações em que a dissipação de potência é elevada?
- 1.3. Como podemos identificar a potência máxima que um resistor é capaz de dissipar (em cada tipo de resistor)?
- 1.4. Determine a incerteza associada a cada instrumento utilizado nos experimentos acima.
- 1.5. Calcule a discrepância relativa percentual para cada resistência elétrica medida nos experimentos acima. Para tal, compare as resistências medidas com as esperadas nominalmente ou obtidas por meio de previsões teóricas e simulações. Levante hipóteses para essas discrepâncias, não deixando de levar em conta as peculiaridades de cada caso.
- 1.6. Qual o provável impacto de um alto coeficiente de temperatura no erro de medição direta de resistência elétrica, isto é, por meio de um ohmímetro?
- 1.7. Represente graficamente os resultados dos procedimentos 3-6 do experimento 1.2.2, plotando um gráfico $V_{R_2} \times I$ em cada situação. Verifique através da lei de ohm a resistência elétrica de R_2 . Calcule a discrepância relativa percentual associada ao processo de medição indireta e compare com o desempenho da medição direta.
- 1.8. Para cada medida de tensão do experimento 1.2.2, calcule o a relação entre a tensão no resistor R_2 e a tensão da fonte. Ela é constante? Explique sua resposta fundamentando-se nos resultados experimentais e na revisão teórica.
- 1.9. Em cada situação do experimento 1.2.2 (com resistências com ordem de grandeza de Ω , $k\Omega$ e $M\Omega$), verifique o erro de inserção do voltímetro. Explique os resultados.
- 1.10. Em cada situação do experimento 1.2.2 (com resistências com ordem de grandeza de Ω , $k\Omega$ e $M\Omega$), verifique o erro de inserção do amperímetro. Explique os resultados.
- 1.11. Discuta a fragilidade do divisor de tensão em aplicações de regulação de tensões. Explique em que situações é mais apropriado o seu uso para essa aplicação.

Experimento 2

Voltímetro, amperímetro e as leis de Kirchhoff

Resumo Neste experimento serão verificadas experimentalmente as **Leis de Kirchhoff**, consolidando, por meio das práticas, conceitos relevantes como os de malhas, nós e ramos. Adicionalmente, serão observadas algumas propriedades das redes elétricas tratadas na disciplina de Circuitos Elétricos: a **reciprocidade** e a **linearidade**. A atividade também será importante para aprimorar o uso do **voltímetro** e do **amperímetro**.

2.1 Introdução

Um circuito elétrico é composto por nós, ramos e laços. O nó é um ponto do circuito onde um ou mais elementos têm uma conexão em comum. Um caminho pode ser traçado passando por diversos nós (apenas uma vez) e pelos elementos entre eles. Se um caminho for fechado, isto é, se o nó de início coincidir com o nó final, este caminho será denominado laço (malha). Os ramos são caminhos únicos na rede, compostos por um elemento simples e os nós aos quais seus terminais são conectados.

Esses conceitos foram introduzidos por Gustav Kirchhoff para auxiliar o enunciamento das Leis de Kirchhoff para circuitos elétricos, poderosas ferramentas para análise de redes elétricas complexas. São duas as leis de Kirchhoff: Lei de Kirchhoff das Malhas (LKM) e Lei de Kirchhoff dos Nós (LKN).

2.1.1 Objetivos

Os objetivos desse experimento são:

- Verificar experimentalmente as Leis de Kirchhoff;
- Verificar as propriedades de linearidade e reciprocidade em circuitos elétricos;
- Empregar o voltímetro e o amperímetro para medir tensões e correntes.

2.2 Descrição dos experimentos

2.2.1 Leis de Kirchhoff

2.2.1.1 Materiais Utilizados

- Resistores;
- Multímetro digital.

2.2.1.2 Procedimentos Experimentais

1. Monte o circuito da figura 2.1;

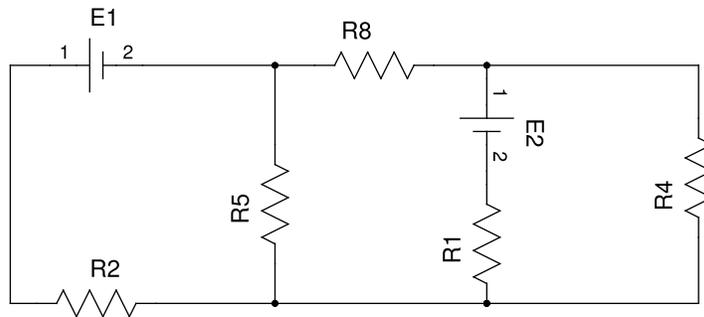


Figura 2.1

2. Nomeie todos nós do circuito;
3. Meça a corrente em cada ramo do circuito;
4. Meça a tensão entre cada dois nós do circuito;
5. Repita os procedimentos 1-4 para o circuito da figura 2.2.

2.2.2 Linearidade e Reciprocidade

2.2.2.1 Materiais Utilizados

- Resistores;
- Multímetro digital.

2.2.2.2 Procedimentos Experimentais

1. Monte o circuito da figura 2.3 para $E = E_1$;
2. Meça a tensão e a corrente;

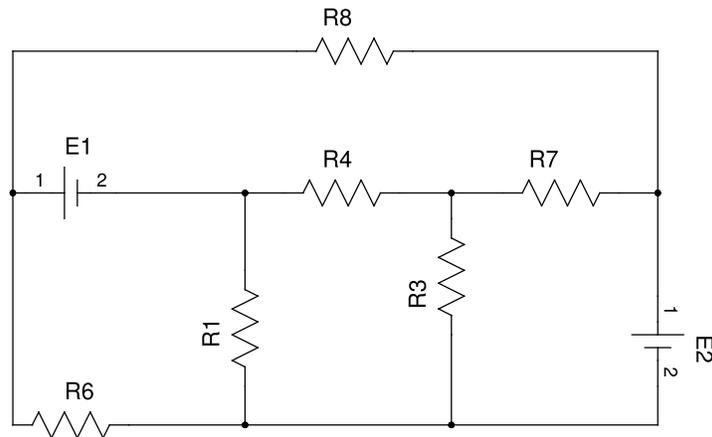


Figura 2.2

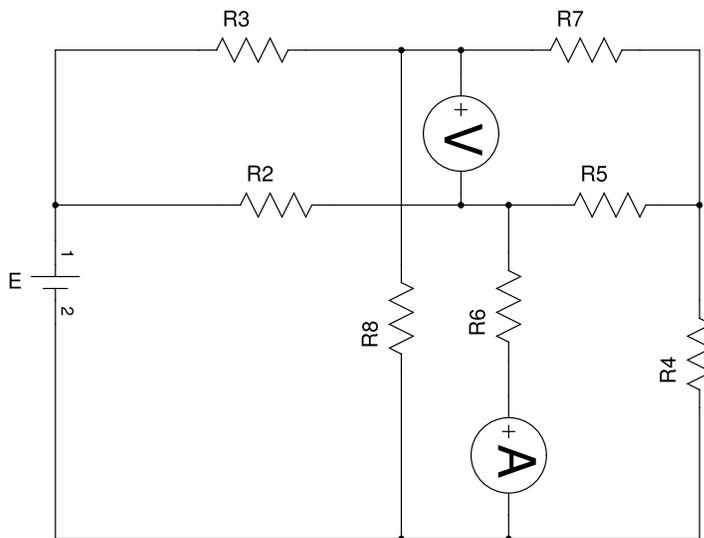


Figura 2.3

3. Repita o procedimento 2 para $E = 2 \cdot E_1$;
4. Repita o procedimento 2 para $E = 3 \cdot E_1$ e para $E = 5 \cdot E_1$;
5. Troque a posição da fonte tensão E com o amperímetro, na figura 2.3, e repita os procedimentos 2-4;
6. Troque a posição da fonte tensão E com o voltímetro, na figura 2.3, e repita os procedimentos 2-4;
7. Monte novamente o circuito da figura 2.1 e meça a tensão no resistor R_5 ;
8. Troque a fonte E_1 e o resistor R_5 de posição e meça a tensão no resistor R_5 ;
9. Monte novamente o circuito original da figura 2.1, substitua E_1 por um voltímetro e coloque E_1 em paralelo com R_5 ;
10. Verifique a tensão indicada no voltímetro;

11. Monte novamente o circuito original da figura 2.1;
12. Faça $E_2 = 0V$;
13. Meça a tensão no resistor R_5 ;
14. Substitua E_1 por um voltímetro e coloque E_1 em paralelo com R_5 ;
15. Verifique a tensão indicada no voltímetro.

2.3 Questões para o relatório

- 2.1. Utilize os dados do experimento 2.2.1 para verificar as leis de Kirchhoff. Verifique em cada caso o erro associado ao experimento.
- 2.2. Como limitar a corrente da fonte de tensão? Qual a utilidade dessa prática?
- 2.3. Quais cuidados devem ser tomados ao se utilizar o amperímetro?
- 2.4. Com base nos resultados dos procedimentos 1-4 do experimento 2.2.2, esboce gráficos da tensão medida no voltímetro versus a tensão da fonte E , e da corrente medida no amperímetro versus a tensão da fonte E . Existe uma relação linear entre esse par de grandezas? Explique sua resposta.
- 2.5. Com base nos resultados dos procedimentos 1-4 do experimento 2.2.2 e no conceito de linearidade aplicado a redes elétricas, qual seria a tensão indicada pelo voltímetro e pelo amperímetro se a tensão da fonte fosse $E = 20V$? E se fosse $E = 30V$?
- 2.6. As mesmas propriedades verificadas nas duas questões anteriores podem ser estendidas para os circuitos das figuras 2.1 e 2.2? Isto é, existe relação de linearidade entre as tensões/correntes medidas e as tensões de alimentação? Explique sua resposta.
- 2.7. No circuito da figura 2.1, ao dobrarmos o valor de E_1 irá dobrar a a tensão no R_8 ? E no circuito da figura 2.2? Justifique e compare suas respostas com a análise da questão 8.4.
- 2.8. Observe os resultados obtidos nos procedimentos 1-6 do experimento 2.2.2. Qual o efeito da troca de posição nas medidas obtidas pelo voltímetro e pelo amperímetro? Explique o ocorrido com base na revisão teórica.
- 2.9. Observe os resultados obtidos nos procedimentos 7-8 do experimento 2.2.2. Qual o efeito da troca de posição na tensão medida? Explique o ocorrido.
- 2.10. Observe os resultados obtidos nos procedimentos 9-10 do experimento 2.2.2. Qual o efeito da troca de posição nas medidas obtidas pelo voltímetro? Compare com os resultados dos procedimentos anteriores. Explique o ocorrido.
- 2.11. Observe os resultados obtidos nos procedimentos 11-15 do experimento 2.2.2. Qual o efeito da troca de posição nas medidas obtidas pelo voltímetro? Compare com os resultados dos procedimentos anteriores. Explique o ocorrido.

2.12. Com base no experimento 2.2.2 e na fundamentação teórica, discusse sobre a linearidade e a reciprocidade em redes elétricas.

2.13. Qual o impacto das características não ideais dos medidores elétricos na reciprocidade e na linearidade? Explique com base na fundamentação teórica e nos experimentos executados.

Experimento 3

Resistores Variáveis

Resumo Além dos resistores fixos estudados até então, existem diversos tipos de resistores que podem ter seu valor alterado em função de sua aplicação, seja manualmente ou automaticamente, como respostas às condições de operações. Esses resistores são denominados **resistores variáveis**, entre os quais podemos destacar os potenciômetros, trimpots, multivoltas, NTC's, PTC's, e varistores. Nesses experimentos, alguns desses dispositivos serão conhecidos.

3.1 Introdução

Os resistores podem ser classificados entre resistores fixos e resistores variáveis. Os resistores variáveis são aqueles cujos valores podem ser modificados. Dentre os resistores variáveis, um dos mais populares são os potenciômetros. Um potenciômetro é constituído basicamente de uma película ou fio percorrido por cursor móvel rotativo que desliza sobre este fio, variando a resistência entre o terminal conectado ao cursor e os demais.

O trimpot e o multivolta têm funcionamento muito semelhante ao do potenciômetro, sendo o primeiro muito menor que o potenciômetro, e geralmente empregado em situações em que a resistência não deva ser variada com frequência, e o segundo apresenta um cursor que permite a variação em valores bem pequenos, e é empregado em situações que exijam grande precisão.

Além desses resistores de valores ajustáveis, existem alguns resistores cuja variação de resistência se dá automaticamente em função das condições de operação, como o NTC e o PTC, geralmente empregados como sensores de temperatura, e o varistor, empregado como equipamento de proteção.

3.1.1 Objetivos

Os objetivos desse experimento são:

- Conhecer alguns tipos básicos de resistores variáveis;

- Verificar experimentalmente a variação de resistência de resistores variáveis.

3.2 Descrição dos experimentos

3.2.1 Potenciômetro

3.2.1.1 Materiais Utilizados

- 1 potenciômetro linear;
- 1 potenciômetro logarítmico;
- Multímetro digital.

3.2.1.2 Procedimentos Experimentais

- Meça a resistência entre os terminais AB, BC e AC para cada um dos potenciômetros e ângulos da tabela 3.1, preenchendo-a;

Tabela 3.1

Ângulo	Resistência AB		Resistência AC		Resistência BC	
	Estimado	Medido	Estimado	Medido	Estimado	Medido
0						
MAX/4						
MAX/2						
3MAX/4						
MAX						

- Plote um gráfico Resistência X Ângulo a partir das medidas do procedimento anterior.
- Comente e compare os resultados.

3.2.2 Trimpots e Multivoltas

3.2.2.1 Materiais Utilizados

- 1 Trimpot;
- 1 Multivolta;
- Multímetro digital.

3.2.2.2 Procedimentos Experimentais

1. Meça a resistência entre os terminais AB, BC e AC para cada um dos resistores;
2. Modifique a posição do cursor, variando a resistência, e observe como sua medida se comporta. Comente os resultados.

3.2.3 Termistores

3.2.3.1 Materiais Utilizados

- 1 resistor de $0,22\Omega/5W$
- 1 NTC.

3.2.3.2 Procedimentos Experimentais

1. Monte o circuito da figura 3.1;

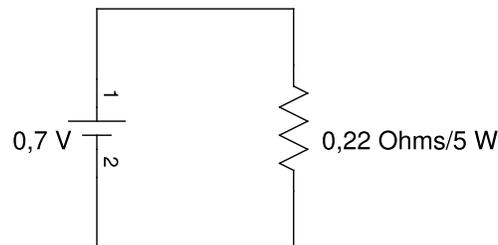


Figura 3.1

2. Aproxime o NTC do resistor de 180 ohms;
3. Meça e anote a resistência do NTC a cada 10 segundos durante 3 minutos;

3.3 Questões para o relatório

3.1. Fale sobre os diferentes tipos de resistores variáveis, salientando as diferenças e dando exemplos de aplicações.

3.2. Qual tipo de resistor variável tem a sua resistência drasticamente reduzida quando submetido a altas tensões?

3.3. Uma determinada máquina industrial deve ser calibrada anualmente. Para isso se ajusta uma determinada resistência para um valor, onde a precisão exigida é na ordem de $10^{-2}\Omega$. Qual tipo de resistor variável você considera adequado para essa aplicação?

- 3.4.** Calcule a discrepância relativa percentual para cada resistência elétrica medida nos experimentos acima.
- 3.5.** Plote gráficos para as resistências do NTC e do PTC em função do tempo no procedimento 3.2.3 e explique o comportamento das mesmas.
- 3.6.** Cite alguns resistores variáveis além dos estudados nesse roteiro, explique o funcionamento e dê exemplo de aplicações.

Parte II
Teoremas de Análise de Circuitos

Experimento 4

Análise nodal e de malhas e circuitos com amplificadores operacionais

Resumo A **análise nodal**, **análise de malhas** e suas variantes são ferramentas extensivamente utilizadas em análise de redes elétricas, sobretudo, nas análises auxiliadas por computador. Nestes experimentos, essas técnicas de análise serão aplicadas experimentalmente em redes resistivas. Adicionalmente, serão introduzidos os **amplificadores operacionais** (AMP-OP's), que são dispositivos utilizados em diversas aplicações em sistemas elétricos, eletrônicos e computacionais. Serão executados experimentos utilizando CI's AMP-OP's onde se aplicarão as análises nodal e de malhas.

4.1 Introdução

As técnicas primárias de análise de circuitos, análise de malhas e análise nodal, constituem a base fundamental da teoria de redes elétricas, apresentando metodologias bem definidas para obtenção da resposta de circuitos elétricos com base nas Leis de Kirchhoff. Especialmente, a análise nodal é o procedimento essencial empregado nas análises computacionais de circuitos, fundamentais em estudos de grandes redes.

Essas técnicas e suas variantes podem ser adotadas na análise de qualquer circuito elétrico linear, e em certos problemas não lineares, como problemas de fluxo de carga. Neste experimento, essas técnicas serão aplicadas para auxiliar a análise de circuitos com amplificadores operacionais e de pontes de Wheatstone.

4.1.1 Objetivos

Os objetivos desse experimento são:

- Aplicar as técnicas básicas de análises circuitos: análise de malhas e análise nodal;
- Verificar experimentalmente o funcionamento da ponte de Wheatstone;

- Obter uma visão geral e analisar o funcionamento básico do amplificador operacional.

4.2 Descrição dos experimentos

4.2.1 Ponte de Wheatstone

4.2.1.1 Materiais Utilizados

- 5 resistores com valores diferentes, maiores que $1k\Omega$ e menores que $10k\Omega$;
- 1 potenciômetro de $47k\Omega$;
- 1 potenciômetro linear de $10k\Omega$;
- Multímetro digital.

4.2.1.2 Procedimentos Experimentais

1. Monte o circuito da figura 4.1;

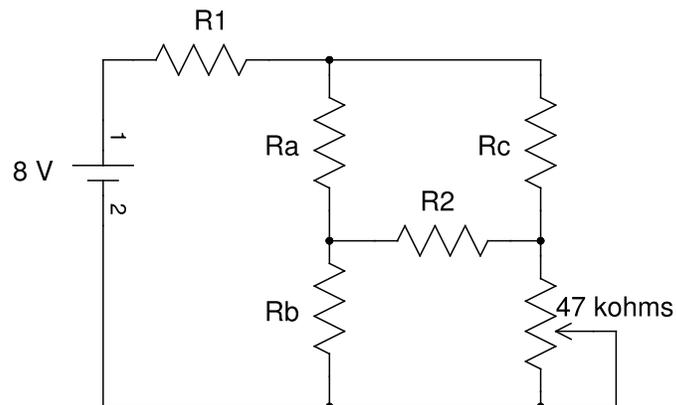


Figura 4.1

2. Ajuste o potenciômetro para que a ponte de Wheatstone fique em equilíbrio;
3. Ajuste aleatoriamente o potenciômetro para 20 posições diferentes e meça os valores da corrente em R_2 ;
4. Substitua o potenciômetro pelo de $10k\Omega$;
5. Varie o valor da resistência do potenciômetro de 400 em 400Ω a partir de seu valor mínimo até o seu valor máximo, medindo e anotando a corrente em R_2 .

4.2.2 O amplificador operacional

4.2.2.1 Materiais Utilizados

- 1 potenciômetro de $10k\Omega$;
- 1 CI TL072
- Multímetro digital.

4.2.2.2 Procedimentos Experimentais

1. Monte o circuito da figura 4.2, alimentando o AMP-OP com $V_{cc+} = 10V$ e $V_{cc-} = -10V$;

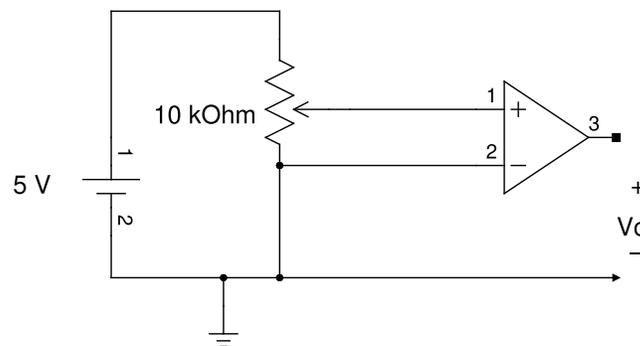


Figura 4.2

2. Meça a tensão de saída V_o com um multímetro;
3. Varie o valor do potenciômetro de uma extremidade à outra, observe o comportamento de V_o e anote os seus valores;
4. Repita os passos 2 e 3 conectando o V_{cc-} ao terra;
5. Repita os passos 2 e 3 conectando o V_{cc+} ao terra e reajustando V_{cc-} ao valor inicial.

4.2.3 Comparador de tensão

4.2.3.1 Materiais Utilizados

- 1 potenciômetro de $10k\Omega$;
- 1 CI TL072
- Multímetro digital.

4.2.3.2 Procedimentos Experimentais

1. Monte o circuito da figura 4.3, alimentando o AMP-OP com $V_{cc+} = 10V$ e $V_{cc-} = -10V$;

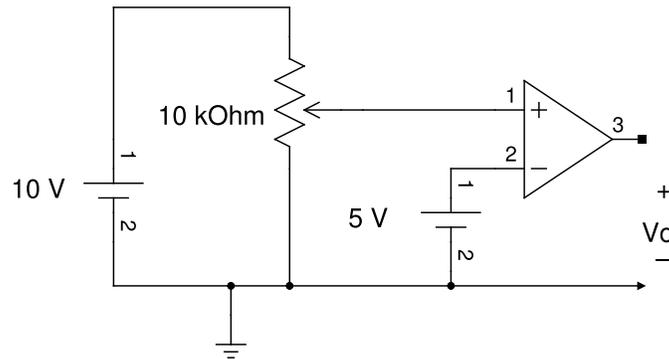


Figura 4.3

2. Meça a tensão de saída V_o e a tensão da entrada não inversora com um multímetro;
3. Varie o valor do potenciômetro de uma extremidade à outra e observe o comportamento de V_o e V_+ , anotando os seus valores;
4. Repita os passos 2 e 3 conectando o V_{cc-} ao terra e $V_{cc+} = 5V$;

4.2.4 Seguidor de Tensão (Buffer)

4.2.4.1 Materiais Utilizados

- 1 CI TL072;
- Multímetro digital.

4.2.4.2 Procedimentos Experimentais

1. Monte o circuito da figura 4.4, alimentando o AMP-OP com $V_{cc+} = 3V$ e $V_{cc-} = -3V$;
2. Usando um gerador de sinais, ajuste V_S para $500mV_p$ e a frequência $10kHz$, e meça a tensão V_o ;
3. Altere o valor de V_S para $1V$, $2V$, $3V$, $4V$, $5V$, $6V$, $7V$, $8V$ e $10V$, medindo e anotando os valores de V_o .

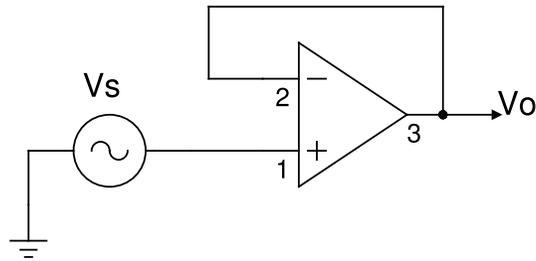


Figura 4.4

4.2.5 Amplificador Inversor

4.2.5.1 Materiais Utilizados

- 1 potenciômetro de $47k\Omega$;
- 2 resistores de valores distintos, maiores que $2k\Omega$ e menores que $10k\Omega$;
- 1 CI TL072;
- Multímetro digital.

4.2.5.2 Procedimentos Experimentais

1. Monte o circuito da figura 4.5, alimentando o AMP-OP com $V_{cc+} = 12V$ e $V_{cc-} = -12V$;

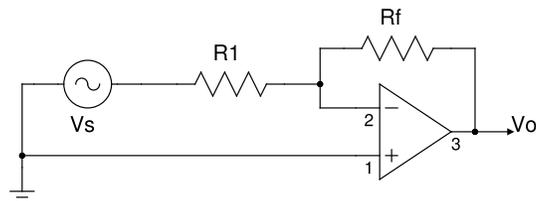


Figura 4.5

2. Usando um gerador de sinais, ajuste V_S para $200mV_p$ e a frequência $10kHz$, e meça a tensão V_o ;
3. Substitua o resistor R_f pelo potenciômetro;
4. Varie o valor do potenciômetro para $1k\Omega$, $5k\Omega$, $10k\Omega$, $20k\Omega$, $30k\Omega$, $40k\Omega$ e $47k\Omega$, e observe o comportamento de V_o anotando os seus valores;
5. Repita o passo anterior para $V_S = 500mV$ e para $V_S = 1V$.

4.2.6 Divisor de Tensão

4.2.6.1 Materiais Utilizados

- 1 potenciômetro de $10k\Omega$;
- 5 resistores ($2,2k\Omega$, $1k\Omega$, $10k\Omega$, $100k\Omega$ e $1M\Omega$);
- 1 CI TL072;
- Multímetro digital.

4.2.6.2 Procedimentos Experimentais

1. Monte o circuito da figura 4.6 com $R_5 = 2,2k\Omega$ sem conectar a carga R_L ;

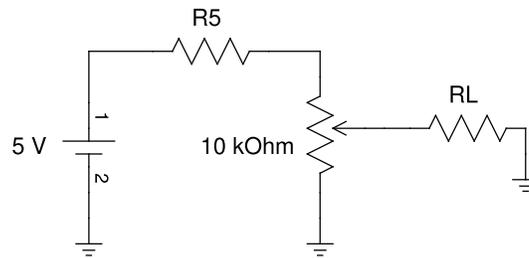


Figura 4.6

2. Ajuste o potenciômetro de forma que a saída do divisor de tensão (ddp entre o terminal central do potenciômetro e a referência) forneça uma tensão de $3V$;
3. Conecte a carga $R_L = 1M\Omega$ na saída e meça a queda de tensão em cima dela;
4. Repita o procedimento 3 para $R_L = 100k\Omega$, $R_L = 10k\Omega$, e $R_L = 1k\Omega$;
5. Monte o circuito da figura 4.5, alimentando o AMP-OP com $V_{cc+} = 5V$ e $V_{cc-} = -5V$, $R_5 = 2,2k\Omega$, e sem conectar a carga R_L ;

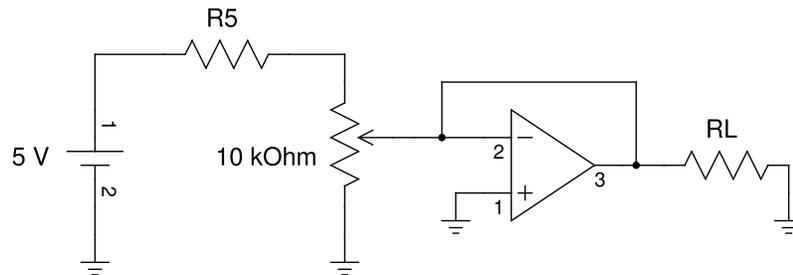


Figura 4.7

6. Ajuste o potenciômetro de forma que a saída do divisor de tensão (ddp na saída do AMP-OP) forneça uma tensão de $3V$;

7. Conecte a carga $R_L = 1M\Omega$ na saída e meça a queda de tensão em cima dela;
8. Repita o procedimento 7 para $R_L = 100k\Omega$, $R_L = 10k\Omega$, e $R_L = 1k\Omega$;

4.3 Questões para o relatório

4.1. Considere o circuito da figura 4.1 e o experimento 4.2.1.

(a) Utilize análise nodal para calcular a queda de tensão em R_2 e a corrente I_{R_2} que passa por ele em função de R_1 , R_a , R_b , R_1 , da tensão V_E que alimenta o circuito e da resistência R_P do potenciômetro.

(b) Refaça o item (a) com análise de malhas. (c) O valor de R_P pode ser calculado em função das resistências conhecidas e da corrente em R_2 ? Em caso positivo, encontre uma expressão para $R_P = f(I_{R_2})$.

(d) Utilizando o resultado do item (b), calcule a resistência R_P para cada posição do potenciômetro do procedimento 3 do experimento 4.2.1.

(e) Plote as curvas teóricas e práticas para $R_P = f(I_{R_2})$, com base nos dados obtidos no procedimento 5 do experimento 4.2.1.

4.2. O que é a ponte de Wheatstone? Explique seu funcionamento e aponte aplicações. Explique como este circuito é empregado em medidas por comparação de resistências elétricas.

4.3. Diversos outros circuitos inspirados na ponte de Wheatstone são utilizados na engenharia, entre os quais está a ponte de Maxwell. Fale sobre esse circuito, explicando seu funcionamento e citando exemplos de aplicações.

4.4. Diversos outros circuitos inspirados na ponte de Wheatstone são utilizados na engenharia, entre os quais está a ponte de Maxwell. Fale sobre esse circuito, explicando seu funcionamento e citando exemplos de aplicações.

4.5. Explique o funcionamento, as propriedades e os modos de operação dos amplificadores operacionais ideais e reais.

4.6. Obtenha o datasheet do CI TL072, descreva sua pinagem e seus limites de operações.

4.7. Considerando os dados dos procedimentos de 4.2.2, plote um gráfico de $V_0 \times V_+$. Analise os resultados desse experimento e explique o comportamento desta curva.

4.8. Considerando os dados dos procedimentos de 4.2.3, plote um gráfico de $V_0 \times V_+$. Analise os resultados desse experimento e explique o comportamento desta curva. Explique o funcionamento do circuito montado na figura 4.3.

4.9. Considerando os procedimentos de 4.2.4, plote um gráfico de $V_0 \times V_S$. Analise os resultados desse experimento e explique o comportamento desta curva. Explique o funcionamento do circuito montado na figura 4.4.

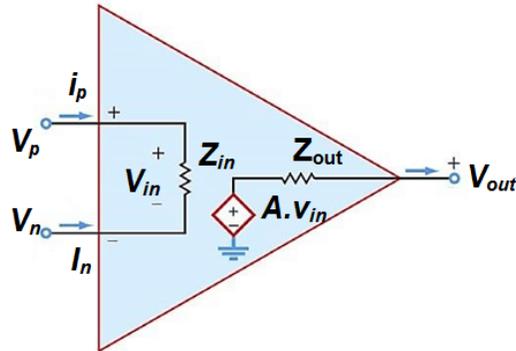


Figura 4.8

4.10. Admita que um amplificador operacional possa ser modelado simplificada-mente através do circuito da figura 4.8.

(a) Redesenhe o circuito da figura 4.5, substituindo o AMP-OP pelo seu modelo da figura 4.8. (b) Utilizando análise de malhas, obtenha equações que para o circuito obtido no item (a). (c) Utilizando análise nodal, obtenha equações que para o circuito obtido no item (a). (d) Encontre uma expressão para V_o em função dos parâmetros do AMP-OP, das resistências R_1 e R_f , e da tensão de entrada V_S . (e) Considere que o AMP-OP é ideal e obtenha uma expressão para o ganho $\frac{V_o}{V_S}$ em função das resistências R_1 e R_f , e da tensão de entrada V_S .

4.11. Considerando o experimento 4.2.5, analise o comportamento do circuito da figura 4.5. Descreva como V_o varia com a variação de $V(s)$, e como o ganho $\frac{V_o}{V_S}$ varia com o valor de R_f . Plote um gráfico de $\frac{V_o}{V_S} \times R_f$ e analise seu comportamento.

4.12. O que é um divisor de tensão? Qual o comportamento que você espera de tal circuito? Ele pode ser utilizado como regulador de tensão?

4.13. Considerando o experimento 4.2.6, calcule o a discrepância relativa percentual associada a tensão de saída do circuito da figura 4.6 para cada situação de carga.

4.14. Considerando o experimento 4.2.6, calcule o a discrepância relativa percentual associada a tensão de saída do circuito da figura 4.7 para cada situação de carga.

4.15. Analise a capacidade de regulação de tensão de cada um dos circuitos das figuras 4.7 e 4.6, descrevendo as limitações de operações.

Experimento 5

Teoremas de Análise de Circuitos

Resumo Nesse experimentos serão observados experimentalmente os teoremas básicos de análise de redes elétricas: **teorema da transformação de fontes, teorema de Millman, teorema de Norton, teorema de Thevenín e teorema da superposição.**

5.1 Introdução

Além das técnicas primárias de análise de circuitos vistas anteriormente e baseadas nas leis de Kirchhoff, existem outros diversos teoremas de circuitos elétricos que ajudam a reduzir a complexidade das redes elétricas e, portanto, facilitar a análise dos mesmos. Aqui serão verificados cinco desses teoremas: teorema da transformação de fontes, teorema de Millman, teorema de Norton, teorema de Thevenín, teorema da superposição.

O teorema da transformação e o teorema de Millman permitem respectivamente transformar geradores reais de tensão em geradores de correntes, e associar geradores reais em série e em paralelo.

O teorema de Norton permite substituir um trecho de uma rede elétrica por apenas uma fonte de corrente em paralelo com um resistor, sem que se altere as correntes e tensões nos demais componentes do circuito. Uma abstração similar é possibilitada pelo teorema de Thevenín. Neste caso, o trecho da rede é substituído por uma fonte de tensão em série com um resistor.

O teorema da superposição se baseia no princípio da linearidade visto anteriormente. Desta forma, a resposta de uma rede linear pode ser obtida através da soma das contribuições individuais de cada uma das fontes de corrente e tensão.

Juntamente às técnicas vistas em experimentos anteriores, esses teoremas permitem encontrar facilmente a resposta completa de circuitos lineares.

5.1.1 Objetivos

Os objetivos desse experimento são:

- Aplicar e verificar experimentalmente alguns dos teoremas básicos de análise de circuitos: teorema da transformação de fontes, teorema de Millman, teorema de Norton, teorema de Thevenin, teorema da superposição.

5.2 Materiais Utilizados

- 4 resistores (R_1 , R_2 , R_3 e R_4), tais que $750\Omega \leq R_1 < R_2 < R_3 < R_4 \leq 10k\Omega$;
- 1 CI TL072;
- 1 resistor variável;
- 4 resistores (R_L) de 100Ω , $1k\Omega$, $10k\Omega$, e $100k\Omega$;
- Multímetro digital.

5.3 Descrição dos experimentos

5.3.1 Associação e Transformação de fontes

5.3.1.1 Procedimentos Experimentais

1. Monte o circuito da figura 5.1 para $R_L = 100\Omega$;

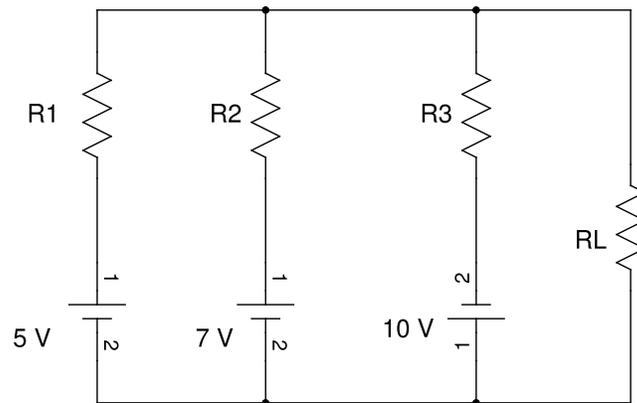


Figura 5.1

2. Meça e anote a tensão e a corrente em R_L ;
3. Monte o circuito da figura 5.2 para $R_{eqv} = R_1 // R_2 // R_3$ (utilize um potenciômetro para ajustar R_{eqv});

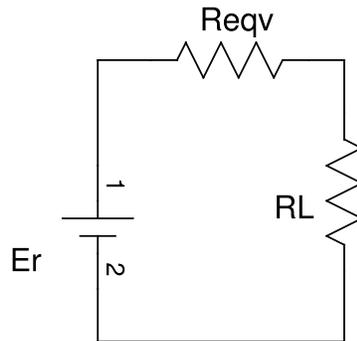


Figura 5.2

4. Varie o valor da tensão E_r até que a tensão e a corrente em R_L volte a ser igual a da figura 5.1;
5. Anote o valor de E_r ;
6. Monte o circuito da figura 5.3 para $R_{eqv} = R_1 // R_2 // R_3$ e $I_r = \frac{E_r}{R_{eqv}}$ (utilize um potenciômetro para ajustar R_{eqv});

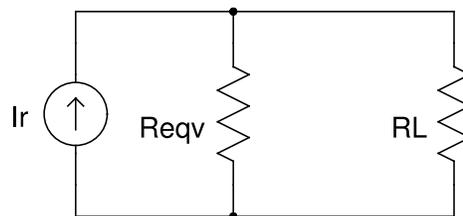


Figura 5.3

7. Repita os passos 1–6 para R_L igual a $1k\Omega$, $10k\Omega$ e $100k\Omega$.

5.3.2 Teoremas de Norton, Thevenin e Superposição

5.3.2.1 Procedimentos Experimentais

1. Monte o circuito da figura 5.4 para $R_L = 100\Omega$;
2. Meça e anote a tensão e a corrente em R_L ;
3. Retire R_L do circuito, relaxe todas as fontes, e meça a resistência de Norton R_N ;
4. Ative novamente as fontes e meça a corrente de Norton I_N ;
5. Monte o circuito equivalente de Norton para R_L ;
6. Meça e anote a tensão e a corrente em R_L ;
7. Monte novamente o circuito da figura 5.4;
8. Retire R_L do circuito, relaxe todas as fontes, e meça a resistência de Thevenin R_{Th} ;

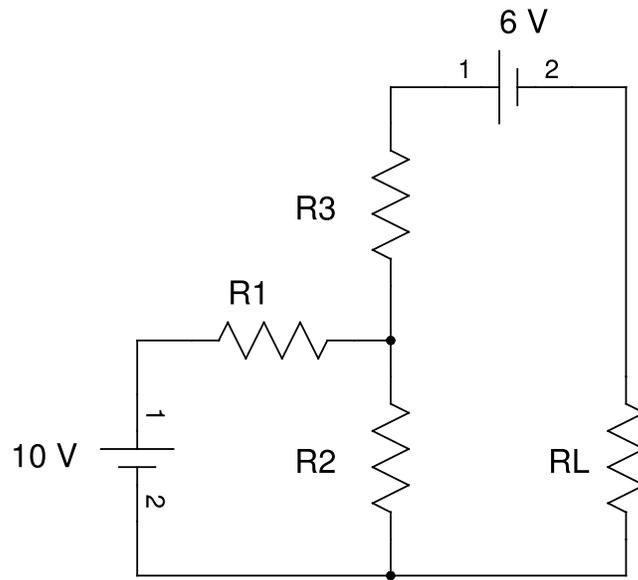


Figura 5.4

9. Ative novamente as fontes e meça tensão de Thevenín V_{Th} ;
10. Monte o circuito equivalente de Thevenín para R_L ;
11. Meça e anote a tensão e a corrente em R_L ;
12. Repita os passos 1–11 para os circuitos das figuras 5.1 e 5.5;
13. Monte novamente o circuito da figura 5.4;
14. Relaxe uma fonte de cada vez e meça em cada caso a tensão e a corrente em R_L ;
15. Repita os passos 1–14 para R_L igual a $1k\Omega$, $10k\Omega$ e $100k\Omega$;

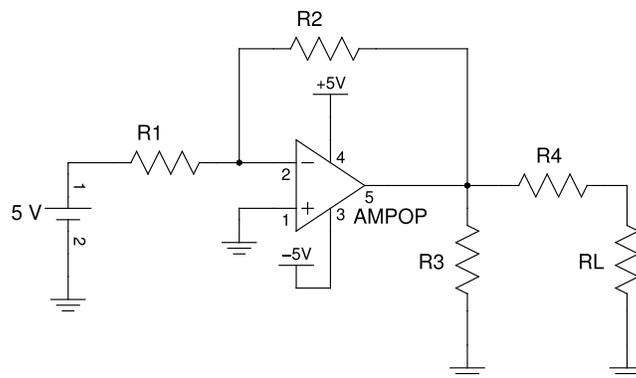


Figura 5.5

5.4 Questões para o relatório

5.1. Calcule as tensões e as correntes nos resistores de carga (R_L) para os circuitos das figuras 5.1, 5.4, e 5.5 utilizando análise de malhas e análise nodal. Compare com os resultados obtidos com as técnicas estudadas nesse experimento.

5.2. Para o circuito da figura 5.2, calcule o valor de E_r e R_{eq} , que faça o este circuito ser equivalente ao da figura 5.1.

5.3. Estenda a propriedade observada na questão anterior para o caso de um circuito composto por três geradores de corrente em série. obtenha o circuito simplificado, semelhante ao da figura 5.3, equivalente a situação descrita (com três geradores de corrente).

5.4. Utilizando o teorema da transformação de fontes, demonstre o Teorema de Millman para associação de fontes.

5.5. Comente sobre o efeito da variação da carga nos fenômenos observados nos procedimentos 5.3.1.

5.6. Utilize os dados dos procedimentos 5.3.2 para demonstrar os teoremas de Norton, de Thevenín e da Superposição.

5.7. Comente sobre o efeito da variação da carga nos fenômenos observados nos procedimentos 5.3.2.

5.8. Verifique e justifique as discrepâncias (para cada circuito) entre o emprego teórico e experimental dos teoremas tratados nos procedimentos 5.3.2.

5.9. Mostre a relação entre os Teoremas de Thevenín e Norton utilizando o teorema da transformação de fontes.

Parte III
Resposta completa de circuitos RLC

Experimento 6

Circuitos RC, RL e RLC

Resumo Capacitores e indutores formam ao lado dos resistores o conjunto de elementos ideais básicos de circuitos elétricos. Com esses três elementos e fontes de energia, qualquer tipo de rede elétrica pode ser modelada. Nesses experimentos, será estudado o comportamento transitório de circuitos compostos por resistores, indutores e capacitores.

6.1 Introdução

Capacitores são elementos constituídos por duas superfícies condutoras separadas por uma camada isolante. Quando uma tensão elétrica é aplicada entre as mesmas, provocará uma atração entre pólos opostos e repulsão entre pólos iguais, caracterizando-os com a propriedade de armazenar carga elétrica. Sua característica fundamental é a oposição a variação instantânea de tensão. A relação entre tensão e corrente de um capacitor é dada por:

$$i = C \frac{dv}{dt}. \quad (6.1)$$

O indutor, de forma dual, apresenta forte oposição à variação instantânea de corrente. São condutores dispostos em forma de espiral nos quais os campos eletromagnéticos formados geram correntes que tendem a se opor às variações da corrente aplicada nos mesmos. Em um indutor, a relação entre tensão e corrente é dada por:

$$v = L \frac{di}{dt}. \quad (6.2)$$

6.1.1 Objetivos

Os objetivos desse experimento são:

- Observar a resposta transitória de circuitos RC, RL e RLC;

- Utilizar o osciloscópio para leitura de sinais elétricos.

6.2 Materiais Utilizados

- Resistores de valores variados
- 2 Capacitores
- 1 Indutor
- 1 resistor variável;
- Multímetro digital.

6.3 Descrição dos experimentos

6.3.1 Carga e descarga de um capacitor

6.3.1.1 Procedimentos Experimentais

1. Monte o circuito da figura 6.1 para $R_1 = 10k\Omega$ e $C_1 = 1000\mu F$;

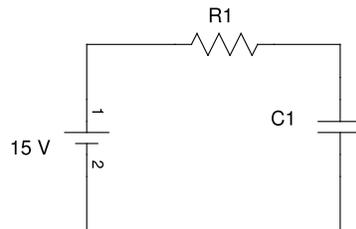


Figura 6.1

2. Meça a tensão no capacitor a cada 30 segundos até que a tensão seja aproximadamente igual a 15V;
3. Com o capacitor carregado com 15V, monte o circuito da figura 6.2 para $R_1 = 10k\Omega$ e $C_1 = 1000\mu F$;
4. Meça a tensão no capacitor a cada 30 segundos até que a tensão seja aproximadamente igual a 0 V;
5. Repita os procedimentos 1–4 para $R_1 = 1\Omega$, $R_1 = 100\Omega$, e $R_1 = 1M\Omega$.

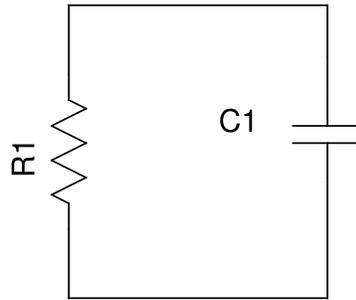


Figura 6.2

6.3.2 Transitório em circuitos RC

6.3.2.1 Procedimentos Experimentais

1. Monte o circuito da figura 7.1 para $10k\Omega < R_2 < 100k\Omega$ e $10nF < C_2 < 100\mu F$;

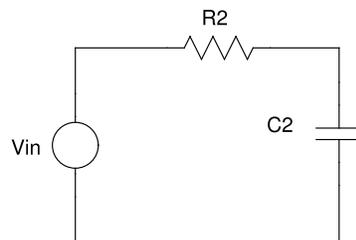


Figura 6.3

2. Alimente o circuito com uma onda quadrada na entrada (V_{in}), com $5V_{pp}$ e $f = 1kHz$;
3. Utilize o osciloscópio para visualizar simultaneamente a tensão de entrada e a tensão no capacitor;
4. Utilize o osciloscópio para visualizar simultaneamente a tensão de entrada e a tensão no resistor;
5. Estime graficamente o valor da constante de tempo do circuito (τ);
6. Repita os procedimentos 2–4, ajustando a onda quadrada de entrada (V_{in}) para um período $T = 10\tau$;
7. Repita os procedimentos 2–4, ajustando a onda quadrada de entrada (V_{in}) para um período $T = \tau$;
8. Repita os procedimentos 2–4, ajustando a onda quadrada de entrada (V_{in}) para um período $T = 50\tau$;
9. Repita os procedimentos 1–8 para uma resistência R_2 dez vezes maior que a anterior;

- Repita os procedimentos 1–8 para uma resistência R_2 dez vezes menor que o inicial.

6.3.3 Transitório em circuitos RL

6.3.3.1 Procedimentos Experimentais

- Monte o circuito da figura 7.2 para $100\Omega < R_3 < 1k\Omega$ e $1mH < L_1 < 10H$;

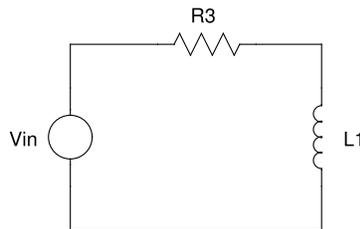


Figura 6.4

- Alimente o circuito com uma onda quadrada na entrada (V_{in}), com $5V_{pp}$ e $f = 1kHz$;
- Utilize o osciloscópio para visualizar simultaneamente a tensão de entrada e a tensão no indutor;
- Utilize o osciloscópio para visualizar simultaneamente a tensão de entrada e a tensão no resistor;
- Estime graficamente o valor da constante de tempo do circuito (τ);
- Repita os procedimentos 2–4, ajustando a onda quadrada de entrada (V_{in}) para um período $T = 10\tau$;
- Repita os procedimentos 2–4, ajustando a onda quadrada de entrada (V_{in}) para um período $T = \tau$;
- Repita os procedimentos 2–4, ajustando a onda quadrada de entrada (V_{in}) para um período $T = 50\tau$;
- Repita os procedimentos 1–8 para uma resistência R_3 dez vezes maior que a anterior;
- Repita os procedimentos 1–8 para uma resistência R_3 dez vezes menor que o inicial.

6.3.4 Transitório em circuitos RLC

6.3.4.1 Procedimentos Experimentais

- Monte o circuito da figura 7.3;

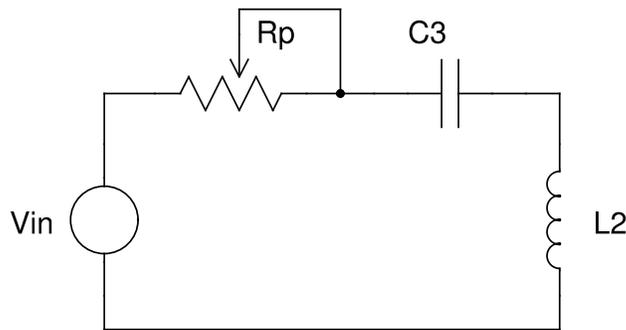


Figura 6.5

2. Alimente o circuito com uma onda quadrada na entrada (V_{in}), com $5V_{pp}$ e $f = 500\text{Hz}$;
3. Utilize o osciloscópio para visualizar simultaneamente a tensão de entrada e a tensão no capacitor;
4. Utilize o osciloscópio para visualizar simultaneamente a tensão de entrada e a tensão no resistor;
5. Varie o valor R_p e repita os procedimentos 3–4 para condições de amortecimento crítico, subamortecimento, e superamortecimento, obtendo para cada caso o valor da resistência e a frequência angular amortecida;
6. Obtenha com o auxílio do osciloscópio o valor da frequência natural deste circuito;
7. Repita os procedimentos 1–6 para o circuito da figura 7.4, onde $R_5 = 10k\Omega$.

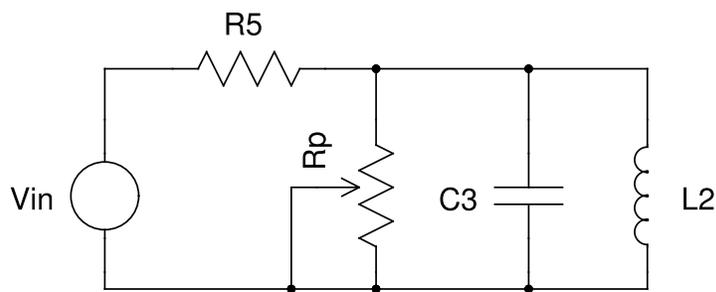


Figura 6.6

6.4 Questões para o relatório

- 6.1. Para todos os circuitos montados nos experimentos 6.3.1, 7.3.1, e 7.3.2, calcule os valores das constantes de tempo e compare com os obtidos experimentalmente.

- 6.2.** É possível obter sinais de corrente utilizando o osciloscópio? Estime o sinal da corrente no indutor em cada circuito montado nos experimentos 7.3.2 e 7.3.3.
- 6.3.** Para o experimento 6.3.1, plote gráficos da tensão do capacitor em função do tempo.
- 6.4.** Para o experimento 6.3.1, plote gráficos da derivada numérica da tensão do capacitor em função do tempo. Qual o significado do valor inicial desta derivada? Assumindo que t_s é o tempo necessário para que a derivada da tensão no capacitor seja menor que $0,2V/min$, faça um gráfico de $t_s \times R_1$ e um gráfico de $t_s \times \tau$.
- 6.5.** Qual o significado prático da constante de tempo? Como ela pode ser alterada em cada tipo de circuito?
- 6.6.** Para todos os circuitos montados em 6.3.1, 7.3.1, 7.3.2, e 7.3.3 calcule a resposta completa ao degrau unitário da tensão no capacitor e da corrente no indutor. Mostre que os valores obtidos nas circunstâncias experimentais podem ser obtidos a partir da resposta ao degrau unitário aqui obtida.
- 6.7.** Calcule o valor da frequência natural e frequência natural amortecida para cada circuito montado em 7.3.3 e compare com os valores obtidos experimentalmente.
- 6.8.** Calcule o valor de R_p para que cada circuito montado em 7.3.3 esteja em amortecimento crítico e compare com os valores obtidos experimentalmente.
- 6.9.** Qual o efeito da variação da resistência em cada circuito montado em 6.3.1, 7.3.1, 7.3.2, e 7.3.3?
- 6.10.** O que é a frequência natural e a frequência natural amortecida num sistema de segunda ordem?

Parte IV
Análise no Regime Permanente Senoidal

Experimento 7

Circuitos elétricos no regime estacionário senoidal - Parte I

Resumo O estudo da resposta das redes elétricas a funções de excitação senoidais é de grande importância por dois diferentes motivos. Primeiramente, a forma de onda usual empregada nos sistemas de geração, transmissão, e distribuição de energia elétrica é senoidal. Além disso, o estudo da resposta a qualquer sinal periódico pode ser traduzido a resposta a uma série de sinais senoidais. Para o estudo do comportamento de circuitos elétricos submetidos a esse tipo de excitação faz-se necessária a consolidação de alguns novos conceitos, como o conceito de **fasor** e de **impedância**. Este experimento permitirá a observação experimental desses conceitos, além de possibilitar o uso do osciloscópio para medidas de defasagem.

7.1 Introdução

A análise de circuitos em regime senoidal permanente é de vital importância para a engenharia elétrica. Além de este ser de fato o regime de operação de diversas redes elétricas importantes presentes no nosso cotidiano, a incorporação de algumas ferramentas matemáticas permitem a extensão das conclusões obtidas por meio desta análise o comportamento de circuitos elétricos diante de excitações periódicas de qualquer formato.

O estudo da resposta completa de circuitos RLC naturalmente permitiria a modelagem do comportamento de qualquer circuito elétrico linear em regime senoidal, no entanto, esta análise se mostra complexa e pode ser extremamente simplificada ao considerarmos peculiaridades da resposta a excitação senoidal e restringirmos as análises ao regime permanente. Alguns conceitos foram então desenvolvidos para viabilizar essa simplificação. Entre estes conceitos, o conceito de fasor se destaca pela importância. A transformação fasorial permite que se analise de forma rápida as grandezas que realmente variam no regime permanente senoidal (amplitude e fase), deixando de lado informações que naturalmente não afetarão a resposta desses circuitos supostos lineares e que apareceriam em análises no domínio do tempo, como a frequência. Desta forma, as tensões e correntes dos circuitos passam a ser representadas por fasores. E a razão entre esses fasores, que outrora era tratada como resistência segundo a lei de Ohm, agora é um número complexo denominado impe-

dância, cuja parte real corresponde a resistências e a parte imaginária corresponde a reatância.

7.1.1 Objetivos

Os objetivos desse experimento são:

- Observar o comportamento da impedância dos sistemas elétricos e sua relação com a frequência da excitação;
- Utilizar o osciloscópio para plotagem de figuras de Lissajous.

7.2 Materiais Utilizados

- Resistores de valores variados
- 2 Capacitores
- 1 Indutor
- 1 resistor variável de $1k\Omega$;
- Osciloscópio digital.

7.3 Descrição dos experimentos

7.3.1 Regime permanente senoidal em circuitos RC

7.3.1.1 Procedimentos Experimentais

1. Monte o circuito da figura 7.1 para $10k\Omega < R_2 < 100k\Omega$ e $10nF < C_2 < 100\mu F$;

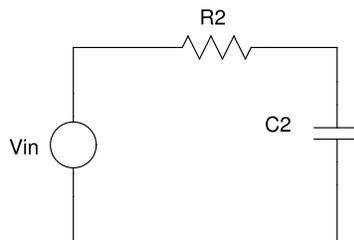


Figura 7.1

2. Alimente o circuito com uma onda senoidal na entrada (V_{in}), com $5V_{pp}$ e $f = 1kHz$;

3. Utilize o osciloscópio para visualizar simultaneamente a tensão de entrada (CH1) e a tensão no capacitor (CH2);
4. Utilize o modo X-Y do osciloscópio e analise a figura resultante;
5. Utilize o osciloscópio para visualizar simultaneamente a tensão de entrada (CH1) e a tensão no resistor (CH2);
6. Utilize o modo X-Y do osciloscópio e analise a figura resultante;
7. Repita os procedimentos 2–6, para frequência $f = 100\text{Hz}$, $f = 500\text{Hz}$, $f = 2\text{kHz}$, $f = 5\text{kHz}$, $f = 10\text{kHz}$, $f = 15\text{kHz}$, $f = 20\text{kHz}$, $f = 25\text{kHz}$, $f = 30\text{kHz}$, $f = 50\text{kHz}$, $f = 100\text{kHz}$ e $f = 1\text{MHz}$;
8. Repita os procedimentos 1–7 para uma resistência R_2 dez vezes maior que a anterior;
9. Repita os procedimentos 1–7 para uma resistência R_2 dez vezes menor que o inicial.

7.3.2 Regime permanente senoidal em circuitos RL

7.3.2.1 Procedimentos Experimentais

1. Monte o circuito da figura 7.2 para $100\Omega < R_3 < 1\text{k}\Omega$ e $1\text{mH} < L_1 < 10\text{H}$;

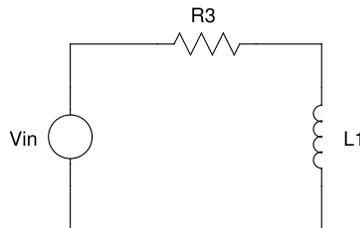


Figura 7.2

2. Alimente o circuito com uma onda senoidal na entrada (V_{in}), com $5V_{pp}$ e $f = 1\text{kHz}$;
3. Utilize o osciloscópio para visualizar simultaneamente a tensão de entrada (CH1) e a tensão no indutor (CH2);
4. Utilize o modo X-Y do osciloscópio e analise a figura resultante;
5. Utilize o osciloscópio para visualizar simultaneamente a tensão de entrada (CH1) e a tensão no resistor (CH2);
6. Utilize o modo X-Y do osciloscópio e analise a figura resultante;
7. Repita os procedimentos 2–6, para frequência $f = 100\text{Hz}$, $f = 500\text{Hz}$, $f = 2\text{kHz}$, $f = 5\text{kHz}$, $f = 10\text{kHz}$, $f = 15\text{kHz}$, $f = 20\text{kHz}$, $f = 25\text{kHz}$, $f = 30\text{kHz}$, $f = 50\text{kHz}$, $f = 100\text{kHz}$ e $f = 1\text{MHz}$;
8. Repita os procedimentos 1–7 para uma resistência R_2 dez vezes maior que a anterior;
9. Repita os procedimentos 1–7 para uma resistência R_2 dez vezes menor que o inicial.

7.3.3 Regime permanente senoidal em circuitos RLC

7.3.3.1 Procedimentos Experimentais

1. Monte o circuito da figura 7.3 com $10mH < L_2 < 10H, L_2 \neq L_1$, e $10pF < C_3 < 100nF, C_3 \neq C_2$;

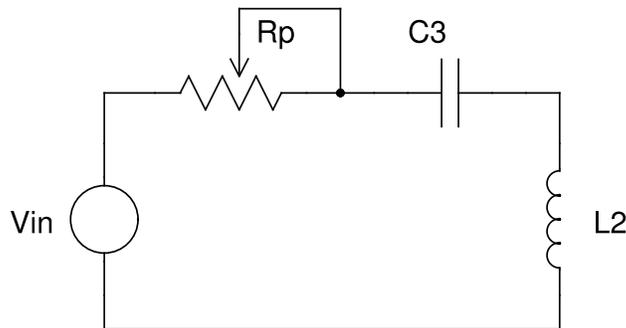


Figura 7.3

2. Alimente o circuito com uma onda senoidal na entrada (V_{in}), com $5V_{pp}$ e $f = 1kHz$;
3. Utilize o osciloscópio para visualizar simultaneamente a tensão de entrada (CH1) e a tensão no indutor (CH2);
4. Utilize o modo X-Y do osciloscópio e analise a figura resultante;
5. Utilize o osciloscópio para visualizar simultaneamente a tensão de entrada e a tensão no capacitor;
6. Utilize o modo X-Y do osciloscópio e analise a figura resultante;
7. Utilize o osciloscópio para visualizar simultaneamente a tensão de entrada e a tensão no resistor;
8. Utilize o modo X-Y do osciloscópio e analise a figura resultante;
9. Estime graficamente o valor da frequência de ressonância do circuito;
10. Repita os procedimentos 2–8, para frequência de ressonância estimada;
11. Repita os procedimentos 2–8, para frequência $f = 100Hz, f = 500Hz, f = 2kHz, f = 5kHz, f = 10kHz, f = 15kHz, f = 20kHz, f = 25kHz, f = 30kHz, f = 50kHz, f = 100kHz$ e $f = 1MHz$;
12. Varie o valor R_p e observe o efeito em cada uma das plotagens no osciloscópio realizadas nos procedimentos 3–11;
13. Troque C_3 por C_2 e observe o efeito em cada uma das plotagens no osciloscópio realizadas nos procedimentos 3–11;
14. Mantenha C_2 , troque L_2 por L_1 , e observe o efeito em cada uma das plotagens no osciloscópio realizadas nos procedimentos 3–11;
15. Mantenha L_1 , troque C_2 por C_3 , e observe o efeito em cada uma das plotagens no osciloscópio realizadas nos procedimentos 3–11;
16. Repita os procedimentos 1–15 para o circuito da figura 7.4, onde $R_5 = 3,6k\Omega$;

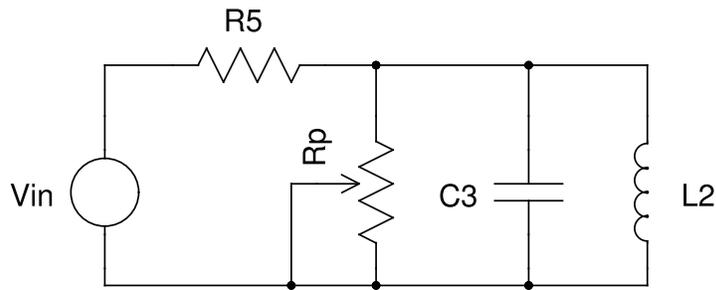


Figura 7.4

7.4 Questões para o relatório

7.1. Fale sobre o(s) sistema(s) de leitura de valores nominais de capacitores e indutores comerciais.

7.2. Como um indutor pode ser construído artesanalmente? Relacione seu valor nominal com as características físicas dos mesmos.

7.3. Para todos os circuitos montados nesse experimento plote (com base nos dados experimentais) os diagramas fasoriais de tensões e correntes e demonstre a validade das leis de Kirchhoff das malhas e das correntes no domínio fasorial. Plote também os diagramas fasoriais teóricos e compare-os com os experimentais.

7.4. Para todos os circuitos montados nesse experimento (com base nos dados experimentais) plote curvas da variação do módulo e fase da impedância: (a) do circuito equivalente; (b) de cada elemento reativo individualmente; (c) de cada elemento resistivo individualmente.

7.5. Calcule a frequência de ressonância de cada circuito montado nos experimentos 7.3.3 e compare com os obtidos experimentalmente.

7.6. Discuta o efeito prático percebido experimentalmente da frequência de ressonância. Ela tem alguma relação com os parâmetros de análise da resposta completa de circuitos de segunda ordem?

7.7. Com base nos experimentos realizados discuta os efeitos da alteração dos valores dos elementos resistivos no comportamento em regime permanente senoidal. Quais grandezas são afetadas? A frequência de ressonância de circuitos RLC é afetada?

7.8. Qual o efeito da alteração dos elementos reativos no comportamento em regime permanente senoidal. Quais grandezas são afetadas? A frequência de ressonância de circuitos RLC é afetada?

7.9. Discorra sobre as informações que podem ser fornecidas pelas figuras de Lissajous.

Experimento 8

Circuitos elétricos no regime estacionário senoidal - Parte II

Resumo Neste segundo experimento sobre análise em regime permanente senoidal serão revisitadas as técnicas básicas de análise no contexto de circuitos RLC em regime senoidal.

8.1 Introdução

A notação fasorial é extremamente importante para a análise senoidal em regime permanente, conforme o visto no experimento anterior. Desta forma, pode-se reutilizar todas as técnicas de análise de circuitos aprendidas anteriormente no contexto de resistências, para circuitos RLC em regime senoidal, utilizando conceitos de impedância de análise fasorial.

Com todo esse aparato ferramental, pode-se discutir conceitos de extrema importância para a engenharia elétrica: a potência elétrica. Naturalmente, é a potência média que nos apresenta mais interesse, no entanto, outras grandezas como potência reativa, potência aparente e valor eficaz também são muito importantes para a análise abrangente de redes elétricas em regimes senoidais.

8.1.1 Objetivos

Os objetivos desse experimento são:

- Reproduzir técnicas conhecidas de análise de circuitos a circuitos RLC em regime senoidal;
- Observar o significado de diversas grandezas relacionadas á potência elétrica em regime permanente senoidal.

8.2 Materiais Utilizados

- Resistores e indutores de diversos valores;
- 3 capacitores;
- 1 resistor variável;
- 1 capacitor variável;
- 1 indutor variável;
- Multímetro digital;
- Osciloscópio digital.

Nota: nos circuitos desse experimento, deverão ser escolhidos $R_1, R_a, R_b, R_c, L_a, L_b$ e L_c , de tal forma que a restrição (8.1) seja satisfeita para a frequência de 60 Hz.

$$X_a > X_b > X_c > 5R_a \geq R_b \geq R_c > 10R_1 \quad (8.1)$$

8.3 Descrição dos experimentos

8.3.1 Teorema de Thevenin e Potência no Regime permanente Senoidal

8.3.1.1 Procedimentos Experimentais

1. Monte o circuito da figura 8.1 para $Z_L = 10\Omega$ e sendo E uma tensão senoidal de $1,5V_p$ e $60Hz$;

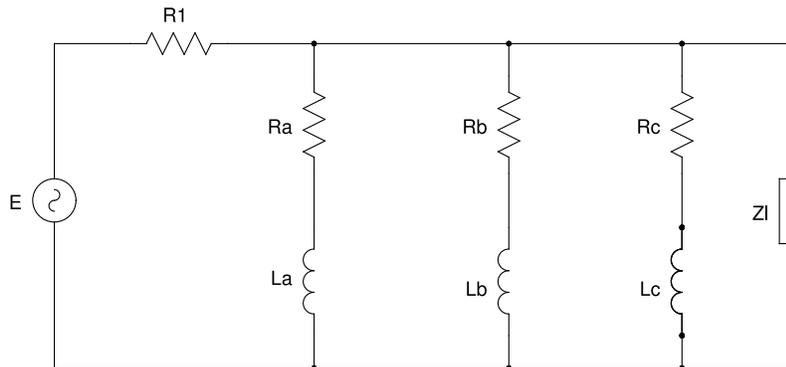


Figura 8.1

2. Obtenha o sinal de tensão em R_1 ;
3. Obtenha com auxílio do osciloscópio o fasor de tensão em R_1 ;
4. Meça a tensão e a corrente em R_1 com um multímetro digital;
5. Obtenha o sinal de tensão em Z_L ;
6. Obtenha com auxílio do osciloscópio o fasor de tensão em Z_L ;

7. Estime experimentalmente o fasor de corrente total do circuito;
8. Meça com um multímetro digital a corrente total do circuito;
9. Meça a tensão e a corrente em Z_l com um multímetro digital;
10. Obtenha experimentalmente a impedância e a tensão de Thevenín enxergada por Z_L ;
11. Monte o circuito equivalente de Thevenín para Z_L , utilizando o resistor e o indutor variável para obter a impedância de Thevenín desejada;
12. Obtenha o sinal de tensão em Z_l no circuito equivalente de Thevenín;
13. Obtenha com auxílio do osciloscópio o fasor de tensão em Z_l no circuito equivalente de Thevenín;
14. Meça a tensão e a corrente em Z_l com um multímetro digital no circuito equivalente de Thevenín;
15. Repita os procedimentos 1–12 para a frequência $f = 10Hz$, $f = 100Hz$, $f = 1kHz$, e $f = 10kHz$;
16. Repita os procedimentos 1–12 para $Z_L = 47 - j68\Omega$ e $Z_L = 1k\Omega$;
17. Remonte o circuito da figura 8.1 de forma a obter a máxima potência possível entregue a Z_L e repita os procedimentos 1–13.

8.3.2 Correção de fator de potência

8.3.2.1 Procedimentos Experimentais

1. Monte o circuito da figura 8.2 para $20\Omega < R_4 = 100\Omega$, $80mH < L_4 = 150mH$, $1\mu F < C_1 < 10\mu F$, com as chaves S_1 , S_2 e S_3 , aberta e sendo V_{in} uma tensão senoidal de $2,5V_p$ e $60Hz$;
2. Estime com auxílio do osciloscópio e do voltímetro a potência aparente e a potência ativa do circuito;
3. Verifique com o auxílio do osciloscópio o fator de potência do circuito;
4. Feche a chave S_1 e repita os passos 2–3;
5. Feche também a chave S_2 e repita os passos 2–3;
6. Feche também a chave S_3 e repita os passos 2–3;
7. Repita os procedimentos 2–5 para a frequência $f = 10Hz$, $f = 100Hz$, $f = 1kHz$, e $f = 10kHz$.

8.4 Questões para o relatório

- 8.1. Qual a diferença entre o uso de multímetro e de osciloscópio para medições elétricas em corrente alternada?
- 8.2. Descreva os procedimentos para estimar a potência ativa e a potência aparente com o auxílio de um osciloscópio e um multímetro.
- 8.3. Explique o que é valor RMS de uma medida elétrica.
- 8.4. Qual a vantagem dos multímetros True RMS?

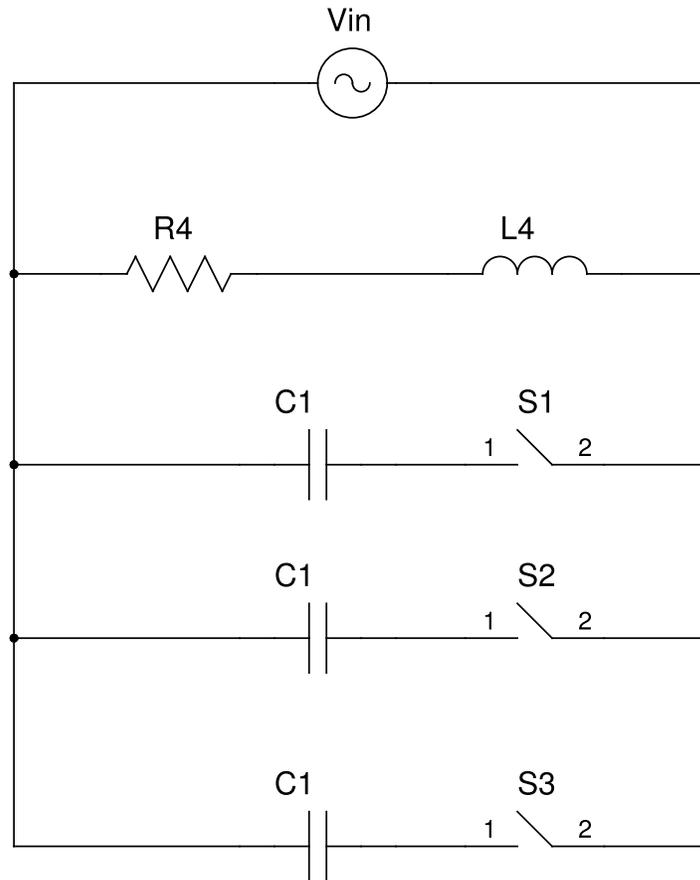


Figura 8.2

8.5. Compare os procedimentos para realização do equivalente Thevenín para circuitos resistivos em corrente contínua com os procedimentos aplicados para circuitos RLC em corrente alternada. Existe alguma diferença?

8.6. Nos procedimentos 8.3.1, compare os resultados obtidos no equivalente Thevenín e no circuito original. Discuta as discrepâncias.

8.7. Qual foi a máxima potência transferida para carga no procedimento 8.3.1 e em que circunstância ocorreu? Esse resultado é afetado pela frequência?

8.8. Discuta o efeito da alteração da frequência nos procedimentos 8.3.1 e 8.3.1.

8.9. Estime em cada caso do procedimento 8.1 a potência total lançada ao circuito. Calcule o fator de potência e desenhe o triângulo de potências em cada caso.

8.10. Plote gráficos que relacionam a resistência de Thevenín, a tensão de Thevenín, a potência da carga (ativa, reativa e aparente) e a potência total lançada ao circuito em função da variação da frequência.

8.11. Calcule o fator de potência em cada caso para o procedimento 8.3.2. Plote um gráfico do fator de potência em função da frequência em cada caso. Discuta o efeito da adição de capacitores.

8.12. Adapte o circuito da figura 8.2 para que o fator de potência se torne maior que 0,95.

Parte V
Potência e Energia

