



Eletricidade

2025



Prof. Me. Daniel Rodrigues de Sousa
Curso Superior em Manutenção Industrial
Fatec Itaquera - Professor Miguel Reale

Sumário

1	A Natureza da Eletricidade	13
1.1	Introdução	13
1.2	Formas de Conversão de Energia	14
1.3	Tipos de Eletricidade	14
1.4	Estrutura do Átomo	15
1.5	Condutores e Isolantes	15
1.6	Conceitos Fundamentais	15
1.7	Princípios de Atração e Repulsão	15
1.8	Princípio da Conservação das Cargas Elétricas	16
1.9	Processos de Eletrização	16
1.9.1	Exemplos Práticos de Eletrização	16
1.9.2	Aplicações e Ocorrências da Eletricidade Estática	17
1.10	Recapitulando	17
1.11	Atividades Sugeridas	17
1.12	Material Complementar	18
2	Lei de Ohm e Corrente Elétrica	19
2.1	Introdução	19
2.2	Eletrodinâmica: O Início	19
2.3	Geradores de Corrente	20
2.4	Sentido da Corrente Elétrica	20

2.5	Materiais Condutores de Eletricidade	20
2.6	Definição de Corrente Elétrica	20
2.7	Medição de Corrente e Tensão Elétrica	21
2.8	Resistência Elétrica	21
2.9	Primeira Lei de Ohm	21
2.10	Segunda Lei de Ohm	22
2.10.1	Tabela de Resistividade de Materiais	22
2.10.2	Influência da Temperatura	22
2.11	Exercícios Resolvidos	23
2.12	Notação Científica e Unidades	24
2.13	Considerações Finais	24
2.14	Material Complementar	25
3	Associação de Resistores	27
3.1	Revisão: Leis de Ohm	27
3.2	Associação de Resistores	28
3.2.1	Associação de Resistores em Série	28
3.2.2	Associação de Resistores em Paralelo	29
3.2.3	Observações Práticas	30
3.2.4	Comparativo: Série vs. Paralelo	31
3.3	Considerações Finais	31
4	Exercícios sobre Associação de Resistores	33
4.1	Exercícios sobre Associação de Resistores	33
4.1.1	Revisão: Associação em Série	33
4.1.2	Revisão: Associação em Paralelo	35
4.1.3	Associação Mista de Resistores	36
4.1.4	Dicas Finais e Encerramento	38

5	Verificação Experimental da Lei de Ohm	39
5.1	Verificação Experimental da Lei de Ohm	39
5.1.1	Introdução	39
5.1.2	Resistores: Tipos e Aplicações	39
5.1.3	Código de Cores dos Resistores	40
5.1.4	Protoboard: Montagem e Estrutura	40
5.1.5	Utilização do Multímetro Digital	41
5.1.6	Montagem do Circuito	41
5.1.7	Primeira Etapa: Resistor de $330\ \Omega$	41
5.1.8	Segunda Etapa: Resistor de $1\ \text{k}\Omega$	42
5.1.9	Terceira Etapa: Resistor de $10\ \text{k}\Omega$	43
5.1.10	Comparação com Medição Direta no Multímetro	43
5.1.11	Conclusão	43
6	Geradores e Receptores Elétricos	45
6.1	Introdução	45
6.2	O Que São Geradores Elétricos?	46
6.2.1	Exemplos de Geração de Energia	46
6.2.2	Geradores de Tensão e Corrente	46
6.2.3	Modelo Real de Gerador de Tensão Contínua	47
6.2.4	Potência em Geradores Reais	47
6.2.5	Rendimento do Gerador	47
6.2.6	Condição de Máxima Transferência de Potência	48
6.2.7	Exemplo Resolvido	48
6.3	Receptores Elétricos	49
6.3.1	Modelo Real do Receptor	49
6.3.2	Potência nos Receptores	49
6.3.3	Exemplo Resolvido	49
6.3.4	Observação Importante:	50
6.3.5	Receptor em Corrente Alternada (CA)	50
6.3.6	Associação de Geradores	50
6.3.7	Considerações Finais	51
6.4	Material Complementar	51

7	Leis de Kirchhoff	53
7.1	Introdução às Leis de Kirchhoff	53
7.2	Definições Importantes	54
7.2.1	Exemplo Prático	54
7.3	Primeira Lei de Kirchhoff Lei dos Nós	54
7.3.1	Forma Algébrica	54
7.3.2	Exemplo:	55
7.4	Segunda Lei de Kirchhoff Lei das Malhas	55
7.4.1	Regras para os Sinais	55
7.5	Exemplo de Aplicação da 2ª Lei de Kirchhoff	55
7.5.1	Verificação:	56
7.6	Malhas com Mais de Uma Fonte	56
7.7	Análise de Circuito com Duas Malhas	56
7.7.1	Equações das Malhas	56
7.7.2	Resolvendo o Sistema de Equações	57
7.7.3	Interpretação	57
7.8	Dica de Resolução	57
7.9	Circuito com Duas Fontes em Malhas Diferentes	58
7.9.1	Equações das Malhas	58
7.9.2	Resolvendo o Sistema	58
7.9.3	Verificação	58
7.10	Considerações Finais	59
8	Aplicações das Leis de Kirchhoff	61
8.1	Introdução	61
8.2	Exercício 1 Duas Malhas com Fontes Diferentes	61
8.2.1	Descrição do Circuito	61
8.2.2	1ª Equação Lei dos Nós (1ª Lei de Kirchhoff)	62
8.2.3	2ª Equação Malha 1 (2ª Lei de Kirchhoff)	62
8.2.4	3ª Equação Malha 2	62
8.2.5	Simplificação das Equações	62

8.2.6	Resolução do Sistema (Exercício 1)	62
8.2.7	Interpretação dos Resultados	63
8.2.8	Verificação Quedas de Tensão	63
8.3	Exercício 2 Duas Fontes e Três Malhas com Correntes Interligadas	64
8.3.1	Descrição do Circuito	64
8.3.2	Equação da Malha 1	64
8.3.3	Equação da Malha 2	64
8.3.4	Lei dos Nós	64
8.3.5	Dividindo todas as equações por 5	64
8.3.6	Resolução do Sistema (Exercício 2)	64
8.3.7	Interpretação dos Resultados	65
8.3.8	Verificação Quedas de Tensão	65
8.4	Considerações Finais	65
9	Instrumentação Elétrica e Eletrônica	67
9.1	Conceito de Medição	67
9.2	Tipos de Erros de Medição	67
9.3	Exatidão e Precisão	68
9.4	Instrumento de Medição	68
9.5	Classificação dos Instrumentos	68
9.5.1	Por grandeza medida	68
9.5.2	Por tipo de indicação	68
9.5.3	Por capacidade de armazenamento	68
9.5.4	Por finalidade	68
9.6	Instrumentos Analógicos	69
9.6.1	Princípio de Funcionamento	69
9.6.2	Escalas e Fundo de Escala	69
9.6.3	Ajuste de Zero em Ohmímetros	69
9.7	Instrumentos Digitais	69
9.7.1	Arquitetura Básica	69
9.7.2	Displays LED vs. LCD	69
9.7.3	Resolução e Dígitos	70

9.8	Exatidão (Classe) e Segurança	70
9.8.1	Classe de Exatidão	70
9.8.2	Categoria de Sobretensão (CAT)	70
9.9	True RMS vs. Medição de Pico	70
9.10	Resumo	70
9.11	Exercícios Propostos	71
10	Números Complexos para Análise de Circuitos em Corrente Alternada	73
10.1	Revisão dos Conjuntos Numéricos	73
10.2	Forma Retangular	74
10.3	Forma Polar	74
10.4	Conversões	74
10.4.1	Retangular → Polar	74
10.4.2	Polar → Retangular	74
10.5	Propriedades Fundamentais	74
10.6	Operações com Números Complexos	75
10.6.1	Adição e Subtração (forma retangular)	75
10.6.2	Multiplicação (forma polar)	75
10.6.3	Divisão (forma polar)	75
10.6.4	Potenciação (fórmula de De Moivre)	75
10.7	Importância em Circuitos CA	75
10.8	Exercícios Propostos	75
11	Corrente Alternada e Indução Eletromagnética	77
11.1	Sinais Periódicos e Corrente Alternada	77
11.2	Conceito de Corrente Alternada	78
11.3	Indução Eletromagnética: Leis de Faraday e Lenz	78
11.3.1	Condições para a Geração de Corrente Induzida	78
11.3.2	Regra da Mão Direita	79

11.4	Geração Elementar de Corrente Alternada	79
11.4.1	Análise por Intervalos	79
11.5	Forma de Onda Senoidal	79
11.5.1	Características	79
11.5.2	Conversão Grau-Radiano	79
11.6	Valor Eficaz ou RMS	80
11.6.1	Definição	80
11.6.2	Para formas senoidais puras:	80
11.6.3	Instrumentos True RMS	80
11.7	Defasagem Angular	80
11.7.1	Conceito	80
11.7.2	Exemplo com Corrida	80
11.7.3	Equações com Defasagem	80
11.8	Valor Instantâneo da Grandeza	81
11.8.1	Unidades	81
11.8.2	Conversão	81
11.9	Exemplo Resolvido	81
11.10	Resumo	81
	Bibliografia	83
	Livros	83

1. A Natureza da Eletricidade



Objetivo

Ao final deste capítulo, espera-se que o estudante seja capaz de:

- Compreender o que é eletricidade e suas formas de manifestação.
- Identificar diferentes formas de conversão de energia envolvendo eletricidade.
- Distinguir os tipos de eletricidade: eletrostática, eletrodinâmica e eletromagnetismo.
- Reconhecer a estrutura básica do átomo e a relação entre elétrons e condução elétrica.
- Classificar materiais como condutores ou isolantes com base em suas propriedades elétricas.
- Aplicar corretamente os conceitos de corrente, tensão, resistência e potência elétrica.
- Explicar os princípios de atração e repulsão entre cargas elétricas.
- Entender os processos de eletrização por atrito, contato e indução.
- Relacionar fenômenos do cotidiano com os princípios da eletrostática.

1.1 Introdução

A eletricidade é um fenômeno físico fundamental, presente em praticamente todos os aspectos da vida moderna. Ela pode ser compreendida como uma forma de energia, cuja produção e conversão podem ocorrer de diversas maneiras. Neste capítulo, exploraremos os conceitos básicos sobre a natureza da eletricidade, as formas de geração e conversão de energia, os tipos de eletricidade e os princípios físicos que regem seu comportamento.

1.2 Formas de Conversão de Energia

A eletricidade pode ser gerada a partir de diferentes fontes de energia. Algumas das principais conversões de energia incluem:

- **Energia química para elétrica:** como ocorre em pilhas e baterias.
- **Energia elétrica para energia química:** como no processo de eletrólise.
- **Energia térmica para elétrica:** usada, por exemplo, em baterias term nucleares de sondas espaciais.
- **Energia elétrica para térmica:** como ocorre em ferros de passar roupa e sanduicheiras.
- **Energia luminosa para elétrica:** como nas células fotovoltaicas.
- **Energia elétrica para luminosa:** como nas lâmpadas em geral.
- **Energia mecânica para elétrica:** como nos geradores.
- **Energia elétrica para mecânica:** como nos motores elétricos.

A eficiência das conversões pode variar conforme o tipo de energia de origem e de destino, sendo necessário, muitas vezes, passar por múltiplas etapas até alcançar uma forma de energia útil de maneira eficiente.

Exemplo: Lanterna Elétrica

Um exemplo didático para ilustrar a conversão de energia é o funcionamento de uma lanterna simples:

- **Fonte de energia:** pilhas conectadas em série (ex.: 3 pilhas de 1,5 V = 4,5 V).
- **Condutores:** partes metálicas internas que permitem a passagem dos elétrons.
- **Chave liga/desliga:** controla o fluxo de corrente elétrica.
- **Lâmpada:** transforma energia elétrica em energia luminosa e térmica.

Ao ligar a lanterna, a energia química das pilhas é convertida em energia elétrica, que percorre os condutores, acionando a lâmpada e convertendo-se em luz e calor.

1.3 Tipos de Eletricidade

A eletricidade pode ser dividida, de maneira geral, em três categorias principais:

- **Eletrostática:** estuda as cargas elétricas em repouso.
- **Eletrodinâmica:** estuda as cargas elétricas em movimento.
- **Eletromagnetismo:** estuda a interação entre eletricidade e magnetismo.

A eletrodinâmica é a mais utilizada no nosso cotidiano, enquanto a eletrostática está presente em fenômenos como o choque ao encostar em uma maçaneta ou os raios durante tempestades.

1.4 Estrutura do Átomo

Compreender a eletricidade requer uma noção básica da estrutura do átomo:

- **Núcleo:** formado por prótons (carga positiva) e nêutrons (sem carga).
- **Eletrosfera:** região ao redor do núcleo onde se localizam os elétrons (carga negativa).

Os elétrons mais externos do átomo são mais facilmente removíveis e, portanto, os principais responsáveis pela condução elétrica nos materiais.

1.5 Condutores e Isolantes

Os materiais se classificam quanto à sua capacidade de conduzir corrente elétrica:

- **Condutores:** permitem o livre movimento dos elétrons. Exemplos: metais como cobre, prata, alumínio, ferro, chumbo, ouro, além de ligas como bronze e constantan. Alguns líquidos, como soluções salinas, também conduzem eletricidade.
- **Isolantes:** dificultam o movimento dos elétrons. Exemplos: madeira seca, vidro, borracha, plásticos. Contudo, não existe isolante perfeito todo material tem um limite de tensão, acima do qual pode se tornar condutor.

O ar, por exemplo, normalmente é isolante, mas pode se tornar condutor quando submetido a uma tensão suficientemente alta, como no caso dos raios.

1.6 Conceitos Fundamentais

Antes de avançarmos, é importante revisar alguns conceitos essenciais:

- **Tensão elétrica (ou diferença de potencial):** é a "força" que impulsiona os elétrons em um circuito. Sua unidade é o Volt (V).
- **Corrente elétrica:** é o movimento ordenado dos elétrons em um condutor. Sua unidade é o Ampère (A).
- **Resistência elétrica:** é a oposição à passagem da corrente elétrica. Sua unidade é o Ohm (Ω).
- **Potência elétrica:** é a quantidade de energia consumida ou gerada por unidade de tempo. Sua unidade é o Watt (W).

1.7 Princípios de Atração e Repulsão

Um dos primeiros fenômenos observados na história da eletricidade foi o de atração e repulsão entre cargas elétricas, descrito pela **Lei de Du Fay**:

- Cargas de mesmo sinal se repelem.
- Cargas de sinais opostos se atraem.

1.8 Princípio da Conservação das Cargas Elétricas

A **conservação da carga elétrica** afirma que as cargas elétricas não podem ser criadas nem destruídas, apenas transferidas. Em um sistema isolado, a soma algébrica das cargas antes e depois de um processo de eletrização permanece constante.

1.9 Processos de Eletrização

Os corpos podem adquirir carga elétrica por três métodos principais:

a) Eletrização por Atrito

Neste processo, dois materiais inicialmente neutros são atritados. O atrito provoca a transferência de elétrons de um corpo para outro, fazendo com que um fique eletricamente negativo (com excesso de elétrons) e o outro positivo (com falta de elétrons).

Exemplo: atritar um pente em um pedaço de tecido e depois aproximá-lo de pedacinhos de papel.

b) Eletrização por Contato

Um corpo previamente eletrizado encosta em outro corpo condutor neutro. Como resultado, há uma redistribuição de cargas, e o corpo neutro passa a apresentar carga elétrica semelhante à do corpo eletrizado.

c) Eletrização por Indução

Neste processo, um corpo eletrizado é aproximado de um corpo neutro, sem que haja contato físico. O campo elétrico do corpo eletrizado provoca uma separação de cargas no corpo neutro (polarização). A seguir, ao se conectar esse corpo neutro à terra, parte das cargas será escoada, e ao desconectá-lo da terra, ele ficará eletrizado com carga oposta à do indutor.

1.9.1 Exemplos Práticos de Eletrização

Diversos experimentos simples podem demonstrar os fenômenos da eletrização. Alguns exemplos:

- **Eletrização por atrito com balões:** ao esfregar um balão em cabelos secos ou em tecido de lã, o balão pode atrair pedaços de papel ou até grudar temporariamente em uma parede.

- **Canudos plásticos:** ao atritar canudos plásticos com pano e aproximá-los de pequenos corpos leves ou outros canudos, observamos repulsão ou atração, dependendo da carga acumulada.
- **Disco de pizza e bolinhas metálicas:** usando discos plásticos, pano e bolinhas metálicas suspensas por fios, pode-se montar um experimento para observar o armazenamento e a transferência de eletricidade estática.

Vídeos demonstrativos desses experimentos serão disponibilizados no material complementar da disciplina.

1.9.2 Aplicações e Ocorrências da Eletricidade Estática

A eletricidade estática está presente em diversas situações cotidianas:

- **Descargas eletrostáticas:** ao caminhar sobre certos pisos com sapatos isolantes e encostar em objetos metálicos, pode-se sentir um leve choque.
- **Clima e atmosfera:** os raios são exemplos de descarga eletrostática entre nuvens ou entre nuvens e o solo.
- **Indústria:** controle de eletricidade estática é fundamental em ambientes industriais, especialmente com componentes eletrônicos sensíveis.

1.10 Recapitulando

Neste capítulo, aprendemos que:

- A eletricidade é uma forma de energia resultante do movimento ou acúmulo de cargas elétricas.
- Ela pode ser gerada e convertida por diferentes formas de energia.
- Existem três formas de eletrização: atrito, contato e indução.
- Conhecimentos básicos sobre átomos, materiais condutores e isolantes são essenciais para o entendimento da eletricidade.
- A eletricidade estática está presente em fenômenos naturais e experimentos simples do cotidiano.

1.11 Atividades Sugeridas

1. Explique com suas palavras a diferença entre eletrostática e eletrodinâmica.
2. Liste 3 exemplos de conversão de energia que envolvem eletricidade.
3. Faça um experimento caseiro de eletrização por atrito usando balões, canudos ou pentes, e registre suas observações.
4. Desenhe o modelo atômico e indique onde se localizam os prótons, nêutrons e elétrons.

1.12 Material Complementar



O vídeo produzido pela TV Unifesp, apresenta demonstrações práticas dos processos de eletrização, e está disponível no link https://www.youtube.com/watch?v=MvV46hVy3_Y.

Próximo capítulo: Lei de Ohm e Corrente Elétrica.

2. Lei de Ohm e Corrente Elétrica



Objetivo

Ao final deste capítulo, espera-se que o estudante seja capaz de:

- Compreender o conceito de corrente elétrica e sua definição matemática.
- Diferenciar corrente real e corrente convencional.
- Reconhecer os diversos tipos de materiais condutores: metálicos, líquidos e gasosos.
- Utilizar corretamente a Primeira Lei de Ohm para relacionar tensão, corrente e resistência.
- Aplicar a Segunda Lei de Ohm para calcular a resistência em função das propriedades do condutor.
- Interpretar tabelas de resistividade e compreender a influência da temperatura na resistência elétrica.
- Efetuar cálculos com múltiplos e submúltiplos das unidades elétricas.
- Resolver problemas práticos envolvendo a Lei de Ohm em diferentes contextos.

2.1 Introdução

Neste capítulo, abordaremos a Lei de Ohm, uma das mais importantes leis da eletricidade, que estabelece a relação entre tensão elétrica, corrente e resistência. Vamos também relembrar conceitos fundamentais da eletrodinâmica, explorar os tipos de corrente e discutir os materiais condutores.

2.2 Eletrodinâmica: O Início

A eletrodinâmica teve grande avanço com a invenção da pilha elétrica por Alessandro Volta. Antes disso, os estudos em eletricidade limitavam-se a fenômenos eletrostáticos, como a eletrização por atrito.

A pilha de Volta consistia em discos alternados de cobre e zinco, separados por feltros embebidos em solução ácida. Essa configuração permitia gerar uma diferença de potencial entre os terminais.

2.3 Geradores de Corrente

Os geradores podem ser classificados em:

- **Geradores de corrente contínua (CC):** como pilhas e baterias.
- **Geradores de corrente alternada (CA):** usados em usinas hidroelétricas, termelétricas, entre outras.

2.4 Sentido da Corrente Elétrica

A corrente elétrica é o movimento ordenado dos elétrons através de um condutor. Esse movimento real ocorre do polo negativo para o polo positivo do gerador. No entanto, por convenção, a corrente elétrica é representada como fluindo do polo positivo para o negativo, chamada de **corrente convencional**.

Ambos os sentidos não ocorrem simultaneamente. A corrente real representa o fluxo físico de elétrons; a convencional é adotada por convenção para facilitar a análise de circuitos.

2.5 Materiais Condutores de Eletricidade

Existem diferentes tipos de materiais capazes de conduzir corrente elétrica:

- **Condutores metálicos:** metais como cobre, alumínio, ouro, prata e ferro, com presença de elétrons livres.
- **Condutores líquidos:** soluções eletrolíticas, como água com sais ou ácidos, que possuem íons livres.
- **Condutores gasosos:** requerem alta diferença de potencial para se ionizarem e permitirem a passagem de corrente.

2.6 Definição de Corrente Elétrica

A corrente elétrica (I) é definida como a quantidade de carga (Q), em coulombs, que passa por uma seção transversal de um condutor em um intervalo de tempo (Δt):

$$I = \frac{Q}{\Delta t}$$

A unidade de medida da corrente elétrica é o **ampère (A)**. Um ampère equivale a um coulomb por segundo:

$$1 \text{ A} = 1 \text{ C/s}$$

2.7 Medição de Corrente e Tensão Elétrica

Para medir corrente elétrica, utilizamos um **amperímetro**, que deve ser conectado em **série** com a carga no circuito.

Para medir tensão elétrica (diferença de potencial), usamos um **voltímetro**, que deve ser conectado em **paralelo** com o componente.

Hoje em dia, o **multímetro** é um instrumento muito utilizado para medir várias grandezas, como corrente, tensão e resistência.

2.8 Resistência Elétrica

A resistência elétrica (R) representa a oposição que um material oferece à passagem da corrente elétrica. Depende do tipo de material, do comprimento e da área da seção transversal do condutor.

A unidade de medida da resistência é o **ohm (Ω)**:

$$1 \Omega = \frac{1 \text{ V}}{1 \text{ A}}$$

2.9 Primeira Lei de Ohm

Formulada por Georg Simon Ohm, esta lei estabelece que, em um condutor ôhmico, a corrente elétrica (I) é diretamente proporcional à tensão elétrica (V) e inversamente proporcional à resistência (R):

$$I = \frac{V}{R}$$

As formas alternativas da equação são:

$$V = R \cdot I \quad \text{ou} \quad R = \frac{V}{I}$$

Triângulo REI: Um método mnemônico útil para lembrar as fórmulas:

$$V$$

$$R \quad I$$

2.10 Segunda Lei de Ohm

A Segunda Lei de Ohm descreve como a resistência elétrica de um fio depende de suas propriedades físicas:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A}$$

Onde:

- R : resistência elétrica (Ω)
- ρ : resistividade do material ($\Omega \cdot \text{m}$ ou $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$)
- L : comprimento do condutor (m)
- A : área da seção transversal (mm^2 ou mm^2))

2.10.1 Tabela de Resistividade de Materiais

Material	Resistividade ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$) a 20°C
Prata	$1,59 \times 10^{-2}$
Cobre	$1,68 \times 10^{-2}$
Ouro	$2,44 \times 10^{-2}$
Alumínio	$2,82 \times 10^{-2}$
Constantan (liga)	49×10^{-2}
Níquel	$6,99 \times 10^{-2}$

Observações:

- Materiais com menor resistividade conduzem melhor.
- Materiais como o ouro, embora mais caros, são usados em contatos elétricos por sua resistência à oxidação.
- Ligas como *Constantan* são preferidas na fabricação de resistores devido à baixa variação com a temperatura.

2.10.2 Influência da Temperatura

A resistividade varia com a temperatura. Em metais condutores, a resistividade aumenta com a elevação da temperatura. Já em ligas específicas (como Constantan), essa variação é muito menor, o que

as torna ideais para componentes eletrônicos.

2.11 Exercícios Resolvidos

Exemplo 1: O Pássaro no Fio

Um pássaro pousa em um fio de alta tensão que conduz uma corrente de 1000 A. A resistência por metro do fio é $5 \times 10^{-5} \Omega/\text{m}$ e a distância entre os pés do pássaro é de 6 cm. Qual a diferença de potencial entre os pés do pássaro?

Resolução:

- Convertendo $6 \text{ cm} = 0,06 \text{ m}$
- Resistência correspondente:

$$R = (5 \times 10^{-5}) \times 0,06 = 3 \times 10^{-6} \Omega$$

- Tensão elétrica:

$$V = R \cdot I = (3 \times 10^{-6}) \cdot 1000 = 3 \times 10^{-3} \text{ V} = 3 \text{ mV}$$

Conclusão: A diferença de potencial é muito pequena para causar dano ao pássaro: apenas 3 mV.

Exemplo 2: Resistência de um Cabo

Um cabo de transmissão é formado por 7 fios de cobre, cada um com 10 mm^2 de área. Qual a resistência elétrica para um comprimento de 1 km, dado que $\rho = 2,1 \times 10^{-2} \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$?

Resolução:

- Área total: $A = 7 \times 10 = 70 \text{ mm}^2$
- Comprimento: $L = 1000 \text{ m}$
- Aplicando a segunda lei de Ohm:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A} = 2,1 \times 10^{-2} \cdot \frac{1000}{70} = 0,3 \Omega$$

Exemplo 3: Tensão Elétrica

Um resistor de 100Ω é percorrido por uma corrente de 2,5 A. Qual a tensão?

$$V = R \cdot I = 100 \cdot 2,5 = 250 \text{ V}$$

Exemplo 4: Resistência

Um resistor é ligado a 110 V e conduz uma corrente de 5 A. Qual sua resistência?

$$R = \frac{V}{I} = \frac{110}{5} = 22 \Omega$$

Exemplo 5: Corrente Elétrica

Um resistor de 200Ω está ligado a uma fonte de 300 V. Qual a corrente?

$$I = \frac{V}{R} = \frac{300}{200} = 1,5 \text{ A}$$

Exemplo 6: Corrente em Circuito Automotivo

Um resistor de 6Ω é ligado a uma bateria de 12 V. Qual a corrente elétrica?

$$I = \frac{12}{6} = 2 \text{ A}$$

2.12 Notação Científica e Unidades

- **Múltiplos:**

- $1 \text{ k} = 10^3 = 1000$
- $1 \text{ M} = 10^6 = 1\,000\,000$

- **Submúltiplos:**

- $1 \text{ m} = 10^{-3}$
- $1 \mu = 10^{-6}$

- **Representação correta:** número + espaço + unidade (ex.: 2,5 A).
- **Separador decimal:** utilizar vírgula (ex.: 3,14), e não ponto.
- **Números grandes:** não utilizar ponto entre milhares (ex.: 10000, e não 10.000).

O material extra sobre notação científica e unidades serão disponibilizados no material complementar.

2.13 Considerações Finais

Neste capítulo, abordamos a corrente elétrica, os tipos de condutores, a resistência e as leis fundamentais de Ohm. Compreender esses conceitos é essencial para o estudo de circuitos elétricos e aplicações em eletrônica, instalações e equipamentos.

2.14 Material Complementar



O site do INMETRO possui um documento sobre o Sistema Internacional de Medidas, e em especial ao **capítulo 3** (Múltiplos e submúltiplos decimais das unidades do SI), **seção 5.4.2** (Símbolos das grandezas e das unidades), **seção 5.4.3** (Escrita do valor de uma grandeza) e **seção 5.4.4** (Escrita dos números e separador decimal), são importantes para a disciplina. O material está disponível no link https://www.gov.br/inmetro/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/documentos-tecnicos-em-metrologia/si-versao_final.pdf.

Próximo capítulo: Associação de Resistores.

3. Associação de Resistores



Objetivo

Ao final deste capítulo, espera-se que o estudante seja capaz de:

- Compreender os conceitos de associação em série e paralelo de resistores.
- Calcular a resistência equivalente em associações simples.
- Reconhecer as características elétricas (tensão e corrente) nas diferentes associações.
- Identificar situações reais onde resistores são associados em série ou paralelo.
- Resolver circuitos com associação mista de resistores, utilizando estratégias passo a passo.
- Avaliar os efeitos da resistência dos condutores nas quedas de tensão em circuitos reais.
- Aplicar os conhecimentos em contextos práticos, como instalações elétricas residenciais e automotivas.
- Verificar se os resultados obtidos em cálculos são coerentes com os princípios teóricos.

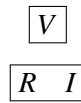
3.1 Revisão: Leis de Ohm

Antes de iniciarmos o estudo sobre associações de resistores, vamos relembrar brevemente as duas Leis de Ohm.

Primeira Lei de Ohm

A corrente elétrica (I) que percorre um condutor é diretamente proporcional à tensão (V) aplicada e inversamente proporcional à resistência elétrica (R):

$$I = \frac{V}{R} \quad \text{ou} \quad V = R \cdot I \quad \text{ou} \quad R = \frac{V}{I}$$

Triângulo REI:**Segunda Lei de Ohm**

A resistência elétrica de um condutor é dada por:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{A}$$

Onde:

- R : resistência do fio (Ω)
- ρ : resistividade do material
- L : comprimento do condutor (m)
- A : área da seção transversal (m^2)

3.2 Associação de Resistores**3.2.1 Associação de Resistores em Série**

A associação em série ocorre quando os resistores estão ligados um após o outro, em sequência, de modo que a mesma corrente percorre todos os componentes.

Características:

- **A corrente (I) é a mesma em todos os resistores.**
- **A tensão total** é a soma das quedas de tensão individuais:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n$$

- Cada queda de tensão (V_i) pode ser obtida pela Lei de Ohm:

$$V_i = R_i \cdot I$$

Resistência Equivalente em Série

A resistência total é a soma das resistências:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n$$

Aplicação Prática

Considere três lâmpadas incandescentes idênticas ligadas em série em uma tomada de 110V. Cada lâmpada receberá apenas $\frac{1}{3}$ da tensão, resultando em menor luminosidade. Se uma lâmpada queimar, o circuito será interrompido todas as demais também apagarão.

Exemplo Resolvido: Queda de Tensão em Condutores

Uma bateria de 24V alimenta uma carga de 3Ω através de dois fios, cada um com resistência de $0,5\Omega$. Determine a tensão na carga.

Solução:

- Resistência equivalente: $0,5 + 3 + 0,5 = 4\Omega$
- Corrente total:

$$I = \frac{V}{R} = \frac{24}{4} = 6\text{ A}$$

- Tensão sobre a carga:

$$V_{\text{carga}} = R_{\text{carga}} \cdot I = 3 \cdot 6 = 18\text{ V}$$

Conclusão: Mesmo com uma fonte de 24V, a carga recebe apenas 18V devido às perdas nos condutores.

3.2.2 Associação de Resistores em Paralelo

Na associação em paralelo, os resistores estão ligados de modo que seus terminais estejam conectados aos mesmos pontos. Isso significa que a tensão sobre cada resistor é a mesma.

Características:

- A tensão (V) é igual para todos os resistores:

$$V = V_1 = V_2 = V_3 = \dots = V_n$$

- A corrente total (I) é dividida entre os resistores:

$$I = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n$$

- Cada corrente individual pode ser calculada pela Lei de Ohm:

$$I_i = \frac{V}{R_i}$$

Resistência Equivalente em Paralelo

A fórmula geral para a resistência equivalente é:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

Fórmula genérica:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$$

Casos Especiais

- **Resistores com o mesmo valor:**

$$R_{eq} = \frac{R}{n}$$

Onde R é o valor de cada resistor e n é a quantidade de resistores.

- **Dois resistores apenas:** produto pela soma:

$$R_{eq} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Importante:

O valor da resistência equivalente de uma associação em paralelo **sempre será menor** que o menor resistor da associação.

Exemplo: Para resistores de 10Ω , 20Ω e 5Ω em paralelo, o valor de R_{eq} será menor que 5Ω .

Aplicação: Instalações Elétricas

Em circuitos elétricos residenciais, os dispositivos (lâmpadas, tomadas, etc.) são ligados em paralelo, para que todos recebam a mesma tensão da rede (geralmente 127 V ou 220 V). A corrente é dividida conforme a resistência de cada aparelho.

3.2.3 Observações Práticas**Queda de Tensão em Condutores**

Condutores reais apresentam resistência, mesmo que pequena. Em casos de alta corrente ou grandes comprimentos, essa resistência pode causar quedas de tensão significativas.

Exemplo prático: Instalações de chuveiros elétricos.

- Um chuveiro elétrico pode demandar de 25 a 35 A de corrente.
- Se os condutores forem finos (com seção transversal pequena), a resistência será maior.
- Isso pode provocar aquecimento dos cabos, queda de desempenho e até risco de incêndio.

- Por isso, utilizam-se cabos de **4 mm²** ou **6 mm²** para chuveiros.

Instalações Automotivas

Em automóveis, problemas de queda de tensão podem ocorrer devido à má conexão entre a bateria e o chassi. Esse tipo de problema é comum quando a **cordoalha de aterramento** está com mau contato, resultando em dificuldades de partida, falhas de recarga da bateria ou funcionamento irregular de componentes eletrônicos.

3.2.4 Comparativo: Série vs. Paralelo

Característica	Série	Paralelo
Tensão	Dividida	Igual em todos os resistores
Corrente	Igual em todos os resistores	Dividida
Fórmula de R_{eq}	Soma direta	Soma dos inversos
Comportamento se um resistor queimar	Abre todo o circuito	Os demais continuam funcionando

3.3 Considerações Finais

Neste capítulo, você aprendeu:

- Como funcionam as associações em série e paralelo.
- Como aplicar a Lei de Ohm para calcular tensões, correntes e resistências equivalentes.
- Como essas associações se aplicam em instalações elétricas residenciais e automotivas.
- Que o correto dimensionamento de cabos influencia diretamente no funcionamento e segurança dos circuitos.

Dica: sempre verifique se o valor da resistência equivalente faz sentido. Em série, deve ser maior que qualquer uma das individuais. Em paralelo, deve ser menor que a menor delas.

Próximo capítulo: Exercícios sobre Associação de Resistores.

4. Exercícios sobre Associação de Resistores



Objetivo

Ao final deste capítulo, espera-se que o estudante seja capaz de:

- Resolver exercícios aplicados sobre associação de resistores em série e paralelo.
- Aplicar corretamente fórmulas para cálculo da resistência equivalente.
- Realizar conversão entre unidades de resistência (ohm, quilohm, megaohm).
- Identificar visualmente associações em série, paralelo e mista, independentemente da orientação do desenho.
- Utilizar estratégias passo a passo para resolver associações mistas.
- Verificar a coerência dos resultados com base em princípios teóricos.
- Reforçar os conceitos estudados nos capítulos anteriores por meio da prática.

4.1 Exercícios sobre Associação de Resistores

4.1.1 Revisão: Associação em Série

Na associação em série, a **resistência equivalente** é a soma direta dos resistores ligados em sequência:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + \cdots + R_n$$

Importante: Todos os resistores devem estar na mesma unidade para que a soma seja válida.

Exemplo 1

Dois resistores de 100Ω em série entre os pontos A e B:

$$R_{eq} = 100 + 100 = 200\Omega$$

Exemplo 2

Um resistor de 50Ω e outro de 145Ω :

$$R_{eq} = 50 + 145 = 195\Omega$$

Exemplo 3: Conversão de Unidades

Um resistor de $1\text{ k}\Omega$ e outro de 220Ω :

$$1\text{ k}\Omega = 1000\Omega \Rightarrow R_{eq} = 1000 + 220 = 1220\Omega$$

Exemplo 4

$2,5\text{ k}\Omega$ e 560Ω :

$$2,5\text{ k}\Omega = 2500\Omega \Rightarrow R_{eq} = 2500 + 560 = 3060\Omega$$

Exemplo 5

Resistores: $100\text{ k}\Omega$, 550Ω e 6000Ω :

$$100\text{ k}\Omega = 100000\Omega \Rightarrow R_{eq} = 100000 + 550 + 6000 = 106550\Omega$$

Exemplo 6: Megaohms e kilohms

Resistores: $1\text{ M}\Omega$, $620\text{ k}\Omega$, 1000Ω :

$$1\text{ M}\Omega = 1000000\Omega, \quad 620\text{ k}\Omega = 620000\Omega \Rightarrow R_{eq} = 1000000 + 620000 + 1000 = 1621000\Omega$$

Nota:

A ordem e disposição dos resistores (horizontal, vertical, zigue-zague) não altera a configuração elétrica. O importante é observar como os terminais estão conectados em sequência.

Exemplo 7

$72\text{ k}\Omega + 330\text{ k}\Omega$:

$$R_{eq} = 72 + 330 = 402 \text{ k}\Omega$$

Ou, em ohms:

$$72000 + 330000 = 402000 \Omega$$

Exemplo 8: Resistores em zigue-zague

30 k Ω , 20 k Ω , 10 k Ω :

$$R_{eq} = 30 + 20 + 10 = 60 \text{ k}\Omega = 60000 \Omega$$

4.1.2 Revisão: Associação em Paralelo

Na associação em paralelo, a **tensão elétrica é a mesma** em todos os resistores, e a **corrente se divide** de acordo com o valor da resistência.

A resistência equivalente é dada pela fórmula geral:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$$

Importante: O resultado da resistência equivalente será sempre **menor que o menor resistor da associação**.

Casos Particulares

- **Resistores iguais:**

$$R_{eq} = \frac{R}{n}$$

- **Dois resistores apenas:**

$$R_{eq} = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Exemplo 1: Dois resistores diferentes

$$R_1 = 100 \Omega, R_2 = 50 \Omega$$

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{100} + \frac{1}{50} = \frac{3}{100} \Rightarrow R_{eq} = \frac{100}{3} \approx 33,33 \Omega$$

Verificação: $33,33 \Omega < 50 \Omega$

Exemplo 2: Mesmo problema usando produto pela soma

$$R_{eq} = \frac{100 \cdot 50}{100 + 50} = \frac{5000}{150} = 33,33 \Omega$$

Exemplo 3: Resistores de 25Ω e 30Ω

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{25} + \frac{1}{30} = \frac{11}{150} \Rightarrow R_{eq} \approx 13,63 \Omega$$

Verificação: $13,63 \Omega < 25 \Omega$

Exemplo 4: Três resistores distintos

$$R_1 = 30 \Omega, R_2 = 60 \Omega, R_3 = 90 \Omega$$

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{30} + \frac{1}{60} + \frac{1}{90} = \frac{6}{45} = \frac{2}{15} \Rightarrow R_{eq} = \frac{15}{2} = 7,5 \Omega$$

Verificação: $R_{eq} < 30 \Omega$

Exemplo 5: Três resistores iguais

Três resistores de 30Ω :

$$R_{eq} = \frac{30}{3} = 10 \Omega$$

Ou usando a fórmula geral:

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{30} + \frac{1}{30} + \frac{1}{30} = \frac{3}{30} = \frac{1}{10} \Rightarrow R_{eq} = 10 \Omega$$

Exemplo 6: Diversos valores

$$R_1 = 10 \text{ k}\Omega, R_2 = 300 \Omega, R_3 = 1 \text{ k}\Omega, R_4 = 500 \Omega$$

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{10000} + \frac{1}{300} + \frac{1}{1000} + \frac{1}{500} \Rightarrow R_{eq} \approx 154,4 \Omega$$

Verificação: $154,4 \Omega < 300 \Omega$

4.1.3 Associação Mista de Resistores

Associação mista ocorre quando resistores estão conectados em partes em série e outras em paralelo no mesmo circuito.

Estratégia de Resolução

1. Identificar trechos que estão em paralelo e calcular sua resistência equivalente.
2. Substituir os trechos calculados e verificar se restaram resistores em série.
3. Repetir o processo até reduzir o circuito a uma única resistência equivalente entre os pontos A e B.

Exemplo 1: Paralelo seguido de série

Resistores:

Paralelo: $R_1 = 100\Omega, R_2 = 200\Omega$ em paralelo em série com $R_3 = 300\Omega$

- Primeiro, calcule o paralelo:

$$\frac{1}{R_{12}} = \frac{1}{100} + \frac{1}{200} = \frac{3}{200} \Rightarrow R_{12} = \frac{200}{3} \approx 66,67\Omega$$

- Em seguida, calcule a série:

$$R_{eq} = R_{12} + R_3 = 66,67 + 300 = 366,67\Omega$$

Exemplo 2: Série seguida de paralelo

Resistores:

Série: $R_1 = 300\Omega, R_2 = 400\Omega$ em paralelo com $R_3 = 500\Omega$

- Série:

$$R_{12} = 300 + 400 = 700\Omega$$

- Paralelo com R_3 :

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{700} + \frac{1}{500} \Rightarrow R_{eq} \approx 291,67\Omega$$

Exemplo 3: Dois paralelos seguidos de série

Primeiro paralelo: $1\text{k}\Omega \parallel 20\text{k}\Omega$ Segundo paralelo: $10\text{k}\Omega \parallel 2\text{k}\Omega$

- Primeiro:

$$\frac{1}{R_1} = \frac{1}{1000} + \frac{1}{20000} \Rightarrow R_1 \approx 952,38\Omega$$

- Segundo:

$$\frac{1}{R_2} = \frac{1}{10000} + \frac{1}{2000} \Rightarrow R_2 \approx 1666,67 \, \Omega$$

- Série final:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 = 952,38 + 1666,67 = 2619,05 \, \Omega$$

4.1.4 Dicas Finais e Encerramento

- Sempre converta todas as resistências para a mesma unidade antes de somar.
- Em série: soma direta das resistências.
- Em paralelo: o resultado é sempre menor que o menor resistor.
- Identifique visualmente os caminhos e não se prenda à forma do desenho (horizontal, vertical, zigue-zague).
- Use a fórmula do produto pela soma apenas para dois resistores.
- Para mistos, resolva por etapas: paralelo substitui soma em série.

Próximo capítulo: Verificação Experimental da Lei de Ohm.

5. Verificação Experimental da Lei de Ohm



Objetivo

Ao final deste capítulo, espera-se que o estudante seja capaz de:

- Compreender a importância da experimentação na validação da Lei de Ohm.
- Utilizar corretamente o multímetro digital para medir corrente, tensão e resistência.
- Reconhecer os diferentes tipos de resistores e interpretar o código de cores.
- Montar circuitos simples em uma protoboard para fins de teste.
- Realizar medições práticas com resistores de diferentes valores.
- Calcular a resistência a partir dos valores medidos de tensão e corrente.
- Interpretar os resultados experimentais e comparar com valores nominais.
- Confirmar o comportamento ôhmico por meio de gráficos de tensão versus corrente.

5.1 Verificação Experimental da Lei de Ohm

5.1.1 Introdução

Neste capítulo, realizaremos uma atividade prática para verificar a **Primeira Lei de Ohm**, por meio de medições de corrente e tensão em resistores de diferentes valores. Faremos uso de uma **fonte de tensão**, um **multímetro digital**, uma **protoboard** e resistores de valores conhecidos.

5.1.2 Resistores: Tipos e Aplicações

Resistores são componentes eletrônicos utilizados para limitar ou controlar a corrente elétrica em um circuito. Eles estão presentes em diversos formatos e aplicações, desde grandes painéis industriais até microcomponentes em placas de circuito impresso.

Tipos de Resistor:

- **Resistores de potência:** usados em controle de carga e torque de motores.
- **Resistores PTH (com terminais):** muito comuns em montagens eletrônicas.
- **Resistores SMD (montagem superficial):** utilizados em placas compactas.
- **Redes de resistores integrados:** presentes em circuitos de instrumentação de alta precisão.
- **Resistores variáveis:** potenciômetros, trimpots e componentes digitais controlados por microcontroladores.

5.1.3 Código de Cores dos Resistores

Resistores apresentam faixas coloridas que indicam seu valor de resistência, fator multiplicador e tolerância. Para resistores de **quatro faixas**, temos:

- **1ª e 2ª faixas:** dígitos significativos
- **3ª faixa:** fator multiplicador
- **4ª faixa:** tolerância (ex: dourado = 5%, marrom = 1%)

Tabela de cores:

Cor	Valor
Preto	0
Marrom	1
Vermelho	2
Laranja	3
Amarelo	4
Verde	5
Azul	6
Violeta	7
Cinza	8
Branco	9

Exemplo: Faixas *verde, azul, vermelho, marrom* representam:

$$56 \times 10^2 = 5600\Omega \quad \text{com } \pm 1\% \text{ de tolerância}$$

5.1.4 Protoboard: Montagem e Estrutura

A protoboard é uma placa com contatos internos metálicos, usada para montar circuitos eletrônicos de forma temporária e segura.

Estrutura interna:

- Trilhas verticais: geralmente utilizadas para componentes
- Trilhas horizontais: usadas para alimentação (linhas de VCC e GND)
- A região central é separada para facilitar o encaixe de circuitos integrados

Ao inserir terminais nos furos, os contatos metálicos internos garantem a conexão elétrica entre os pontos da mesma fileira.

5.1.5 Utilização do Multímetro Digital

O multímetro é um instrumento essencial para medir várias grandezas elétricas. Os principais modos utilizados neste experimento são:

- **Tensão (V):** medir em paralelo com o componente.
- **Corrente (A ou mA):** medir em série com o componente.
- **Resistência (Ω):** medir preferencialmente com o componente fora do circuito.

Atenção na Medição de Corrente:

- Use a entrada correta (10A ou mA).
- Se não souber o valor da corrente, comece pela escala maior.
- A medição é sempre em série com o componente.
- Em correntes elevadas, o erro pode causar queima do fusível ou até do equipamento.

5.1.6 Montagem do Circuito

O circuito é composto por:

- Fonte regulável de tensão contínua
- Protoboard
- Resistores: 330Ω , $1k\Omega$ e $10k\Omega$
- Multímetro digital

Esquema de Ligação para Medir Corrente: A fonte é conectada ao resistor, com o multímetro em série entre eles. A tensão é lida diretamente na fonte, que já possui um voltímetro embutido.

5.1.7 Primeira Etapa: Resistor de 330Ω

O resistor identificado pelas cores **laranja, laranja, marrom e dourado** ($330, \$5$

Medições realizadas:

Tensão (V)	Corrente (mA)	Corrente (A)	Resistência (Ω)
2,05	6,30	0,0063	325
4,07	12,29	0,01229	331
5,99	18,70	0,01870	320
8,02	25,00	0,02500	319
10,10	31,90	0,03190	316
12,00	38,00	0,03800	315

Análise dos Resultados:

A resistência média calculada a partir das medições foi:

$$R_{\text{média}} = 321,48\Omega$$

O valor obtido está dentro da faixa de tolerância do resistor (5%), validando a precisão do experimento. O gráfico tensão vs. corrente resultou em uma reta, indicando comportamento ôhmico.

5.1.8 Segunda Etapa: Resistor de 1 kΩ

O resistor identificado pelas cores **marrom, preto, vermelho, dourado** (1000, ±5%)

Medições realizadas:

Tensão (V)	Corrente (mA)	Corrente (A)	Resistência (Ω)
2,02	2,00	0,00200	1010
3,99	3,99	0,00399	1000
6,04	6,01	0,00601	1004
8,04	7,97	0,00797	1009
10,00	9,98	0,00998	1002
12,01	12,00	0,01200	1000

Análise dos Resultados:

A resistência média foi:

$$R_{\text{média}} = 999,99\Omega$$

Valor excelente, muito próximo ao nominal. Também gerou um gráfico linear de tensão versus corrente, confirmando comportamento ôhmico.

5.1.9 Terceira Etapa: Resistor de 10 kΩ

Resistor de **marrom, preto, laranja, dourado** (10 k, 5%) testado com as mesmas tensões.

Medições realizadas:

Tensão (V)	Corrente (μA)	Corrente (A)	Resistência (Ω)
2,05	214	0,000214	9588
4,02	414	0,000414	9717
6,00	618	0,000618	9709
8,02	820	0,000820	9782
10,24	1025	0,001025	9990
12,01	1230	0,001230	9764

Análise dos Resultados:

Resistência média:

$$R_{\text{média}} = 9730,53 \Omega$$

Resultado compatível com a tolerância esperada. Comportamento ôhmico verificado.

5.1.10 Comparação com Medição Direta no Multímetro

Resistor	Resistência Média (Ensaio)	Resistência Medida no Multímetro
330	321,48	326
1 k	999,99	1006
10 k	9730,53	9780

5.1.11 Conclusão

O experimento confirmou que todos os resistores testados obedecem à **Primeira Lei de Ohm**. As medições mostraram proporcionalidade entre corrente e tensão, representada por gráficos com tendência linear. Os valores médios de resistência calculados coincidem com os valores nominais dentro das margens de tolerância indicadas nos componentes.

Este tipo de prática reforça a importância do conhecimento teórico aliado ao uso correto dos instrumentos de medição. Além disso, evidencia o comportamento ideal de componentes ôhmicos em circuitos reais.

Próximo capítulo: Geradores e Receptores Elétricos.

6. Geradores e Receptores Elétricos



Objetivo

Ao final deste capítulo, espera-se que o estudante seja capaz de:

- Compreender o funcionamento de geradores elétricos e os diferentes tipos de fontes de energia.
- Distinguir entre geradores ideais e reais, e aplicar o modelo equivalente com resistência interna.
- Calcular potência útil, potência dissipada e potência total fornecida por um gerador.
- Determinar o rendimento de um gerador e compreender os fatores que influenciam sua eficiência.
- Identificar a condição de máxima transferência de potência e suas implicações práticas.
- Compreender o funcionamento dos receptores elétricos e o conceito de força contra eletromotriz.
- Aplicar equações para receptores e calcular as potências associadas ao seu funcionamento.
- Analisar a associação de geradores em série e paralelo, identificando vantagens e cuidados.
- Reconhecer os efeitos da corrente circulante e como evitá-la em associações mal planejadas.

6.1 Introdução

Neste capítulo, abordaremos os principais tipos de **geradores e receptores elétricos**, analisando seus princípios de funcionamento, modelos ideais e reais, rendimento, potência útil e dissipação, além das associações em série e paralelo.

6.2 O Que São Geradores Elétricos?

Geradores elétricos são dispositivos capazes de **converter algum tipo de energia em energia elétrica**. As fontes podem ser:

- **Eletroquímicas** (pilhas, baterias);
- **Eletromagnéticas** (usinas hidroelétricas, termelétricas);
- **Termoelétricas** (junção de dois metais distintos);
- **Pisoelétricas** (pressão em cristais);
- **Fotoelétricas** (luz incidindo sobre materiais semicondutores).

6.2.1 Exemplos de Geração de Energia

- **Pilhas e Baterias:** reações químicas geram tensão elétrica.
- **Usinas Hidrelétricas:** energia potencial da água move turbinas que ativam geradores.
- **Efeito Termoelétrico:** emenda de dois metais diferentes, como cobre e alumínio, gera pequena tensão.
- **Cristais Pisoelétricos:** pressão sobre o cristal gera tensão (ex: isqueiros, nebulizadores).
- **Células Fotovoltaicas:** fótons solares liberam elétrons, gerando corrente elétrica.

Exemplo Prático: Usina Henry Borden

Localizada em Cubatão (SP), a usina recebe água da Represa Billings que desce por tubulações com 700 metros de desnível. A energia potencial da água é transformada em energia elétrica por meio de turbinas conectadas a geradores do tipo Pelton.

6.2.2 Geradores de Tensão e Corrente

Modelamos os geradores como fontes ideais ou reais:

- **Gerador de Tensão Ideal:** mantém a mesma tensão independentemente da carga.
- **Gerador de Corrente Ideal:** mantém corrente constante mesmo com variações na resistência da carga.

Na Prática:

Todo gerador possui uma **resistência interna** (r) que causa perdas, diminuindo a tensão efetiva entregue à carga conforme a corrente aumenta.

6.2.3 Modelo Real de Gerador de Tensão Contínua

Representamos um gerador real por uma fonte de força eletromotriz (\mathcal{E}) em série com uma resistência interna (r).

$$U = \mathcal{E} - r \cdot I$$

Onde:

- U : tensão nos terminais da fonte com carga conectada (V)
- \mathcal{E} : tensão em vazio (sem carga)
- r : resistência interna do gerador (Ω)
- I : corrente fornecida à carga (A)

Curva Característica do Gerador

Com dois pontos experimentais (tensão em aberto e corrente de curto-circuito), pode-se traçar a **reta de carga**, cuja inclinação corresponde à resistência interna r .

$$\text{Ponto 1: } I = 0 \Rightarrow U = \mathcal{E} \quad (\text{sem carga}) \quad \text{Ponto 2: } U = 0 \Rightarrow I = \frac{\mathcal{E}}{r} \quad (\text{curto-circuito})$$

6.2.4 Potência em Geradores Reais

A energia fornecida por um gerador se divide entre:

- **Potência útil (P_u)**: entregue à carga.
- **Potência dissipada (P_d)**: perdida na resistência interna do gerador.
- **Potência total (P_t)**: fornecida pela fonte.

Equações Fundamentais

$$P_t = \mathcal{E} \cdot I \quad ; \quad P_u = U \cdot I = (\mathcal{E} - r \cdot I) \cdot I \quad ; \quad P_d = r \cdot I^2$$

6.2.5 Rendimento do Gerador

O rendimento (η) de um gerador é a razão entre a potência útil e a potência total fornecida:

$$\eta = \frac{P_u}{P_t} = \frac{U \cdot I}{\mathcal{E} \cdot I} = \frac{U}{\mathcal{E}} \Rightarrow \eta = \frac{\mathcal{E} - r \cdot I}{\mathcal{E}}$$

Nota: O rendimento pode ser expresso em forma decimal ou porcentagem.

6.2.6 Condição de Máxima Transferência de Potência

O gerador fornece **potência máxima à carga** quando:

$$R_L = r$$

Ou seja, a resistência da carga deve ser igual à resistência interna do gerador. Nesse caso:

- A potência útil é máxima.
- O rendimento é de apenas 50% (a outra metade é dissipada).

$$P_{u_{\max}} = \frac{\mathcal{E}^2}{4r}$$

Importante: essa condição é útil em sistemas que priorizam potência (como amplificadores), mas não é eficiente em sistemas que priorizam economia de energia (como fontes de alimentação).

6.2.7 Exemplo Resolvido

Um gerador real fornece uma tensão de 10 V em vazio. Quando conectado a uma carga de $R_L = 4 \Omega$, a tensão medida nos terminais cai para 8 V.

a) Qual a resistência interna do gerador?

- Corrente na carga:

$$I = \frac{U}{R_L} = \frac{8}{4} = 2 \text{ A}$$

- Resistência interna:

$$\mathcal{E} = U + r \cdot I \Rightarrow 10 = 8 + 2r \Rightarrow r = 1 \Omega$$

b) Qual a potência útil, dissipada e total?

$$P_u = U \cdot I = 8 \cdot 2 = 16 \text{ W} \quad ; \quad P_d = r \cdot I^2 = 1 \cdot 2^2 = 4 \text{ W} \quad ; \quad P_t = \mathcal{E} \cdot I = 10 \cdot 2 = 20 \text{ W}$$

c) Qual o rendimento?

$$\eta = \frac{P_u}{P_t} = \frac{16}{20} = 0,8 = 80\%$$

6.3 Receptores Elétricos

Receptores são dispositivos que consomem energia elétrica para transformá-la em outro tipo de energia (térmica, mecânica, luminosa etc.). Exemplos:

- Motores elétricos
- Lâmpadas
- Aparelhos eletrodomésticos
- Dispositivos eletrônicos em geral

6.3.1 Modelo Real do Receptor

Um receptor real possui:

- Uma resistência interna (r), que dissipa parte da energia.
- Uma tensão de contração (\mathcal{E}_r), que representa a energia útil convertida.

Equação:

$$U = \mathcal{E}_r + r \cdot I$$

- U : tensão nos terminais do receptor (V)
- \mathcal{E}_r : contração eletromotriz (V)
- r : resistência interna do receptor (Ω)
- I : corrente elétrica (A)

6.3.2 Potência nos Receptores

A potência absorvida total é:

$$P_t = U \cdot I$$

Ela se divide em:

- **Potência útil:** $\mathcal{E}_r \cdot I$ (convertida em trabalho útil)
- **Potência dissipada:** $r \cdot I^2$ (perda em forma de calor)

6.3.3 Exemplo Resolvido

Um motor elétrico funciona com 220 V e consome 2 A. Sabendo que sua resistência interna é de 5 Ω , determine:

- a) A força contra eletromotriz (\mathcal{E}_r):

$$U = \mathcal{E}_r + r \cdot I \Rightarrow 220 = \mathcal{E}_r + 5 \cdot 2 \Rightarrow \mathcal{E}_r = 210 \text{ V}$$

- b) A potência total, útil e dissipada:

$$P_t = 220 \cdot 2 = 440 \text{ W} \quad ; \quad P_u = 210 \cdot 2 = 420 \text{ W} \quad ; \quad P_d = 5 \cdot 2^2 = 20 \text{ W}$$

6.3.4 Observação Importante:

Em geradores, a energia flui do gerador para a carga. Em receptores, a energia elétrica entra no componente e é parcialmente convertida e parcialmente dissipada.

6.3.5 Receptor em Corrente Alternada (CA)

Para motores e outros dispositivos em corrente alternada, conceitos como potência ativa, reativa e aparente devem ser considerados, mas isso será aprofundado em capítulos futuros.

6.3.6 Associação de Geradores

Geradores podem ser associados para fornecer maior tensão, corrente ou garantir redundância no sistema.

a) Associação em Série

- As tensões se somam:

$$\mathcal{E}_{eq} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \dots + \mathcal{E}_n$$

- As resistências internas também se somam:

$$r_{eq} = r_1 + r_2 + \dots + r_n$$

- A corrente no circuito é a mesma para todos os geradores.

Aplicações: baterias de lanternas, controle de tensão em painéis solares.

b) Associação em Paralelo

- Todos os geradores devem ter **a mesma tensão** (\mathcal{E}).
- As resistências internas combinam-se como resistores em paralelo.
- As correntes se dividem entre os geradores.

$$\frac{1}{r_{eq}} = \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} + \dots + \frac{1}{r_n}$$

Atenção: se as tensões forem diferentes, haverá **corrente circulante**, que pode causar sobreaquecimento e danificar os componentes.

Exemplo: Corrente Circulante

Dois geradores com $\mathcal{E}_1 = 12\text{ V}$ e $\mathcal{E}_2 = 9\text{ V}$ conectados em paralelo tendem a equilibrar tensões, e o gerador mais forte (12V) tentará "carregar" o outro, criando uma corrente interna indesejada.

Solução: Sempre utilizar diodos ou circuitos de proteção quando houver risco de tensões diferentes em paralelo.

6.3.7 Considerações Finais

Neste capítulo, você aprendeu:

- A diferença entre geradores ideais e reais.
- A influência da resistência interna na tensão fornecida.
- Como calcular a potência útil, dissipada e total.
- Como determinar o rendimento de um gerador.
- A condição de máxima transferência de potência.
- O funcionamento de receptores reais, como motores.
- Como associar geradores em série e paralelo de forma segura.

6.4 Material Complementar



- Matéria do reporter Goulart de Andrade em 2003 na Usina Henry Borden: <https://www.youtube.com/watch?v=jPjhsKvv8fM>.
- Canal Mundo da Elétrica, Usina Rio das Pedras: <https://www.youtube.com/watch?v=kjmFwB71tkk>

Próximo capítulo: Leis de Kirchhoff.

7. Leis de Kirchhoff



Objetivo

Ao final deste capítulo, espera-se que o estudante seja capaz de:

- Compreender a importância das Leis de Kirchhoff na análise de circuitos elétricos e eletrônicos.
- Reconhecer os elementos de um circuito: nós, ramos e malhas.
- Aplicar a Primeira Lei de Kirchhoff (Lei dos Nós) para analisar a conservação da corrente em um nó.
- Aplicar a Segunda Lei de Kirchhoff (Lei das Malhas) para relacionar tensões em percursos fechados.
- Resolver circuitos simples e compostos utilizando sistematicamente as Leis de Kirchhoff.
- Interpretar e montar equações a partir de esquemas de circuitos elétricos.
- Validar resultados considerando o arredondamento e coerência física das grandezas envolvidas.

7.1 Introdução às Leis de Kirchhoff

As Leis de Kirchhoff, em conjunto com a Lei de Ohm, compõem um conjunto essencial de ferramentas matemáticas para a análise de circuitos elétricos e eletrônicos. Elas são especialmente úteis em situações onde há mais de um caminho possível para a corrente ou múltiplas fontes de tensão no circuito.

7.2 Definições Importantes

Antes de aplicarmos as Leis de Kirchhoff, é necessário compreender alguns conceitos básicos de topologia de circuitos:

- **Nó:** ponto de conexão entre três ou mais condutores.
- **Nó secundário:** interliga apenas dois condutores; geralmente desconsiderado em análises.
- **Ramo:** trecho de circuito compreendido entre dois nós principais consecutivos.
- **Malha:** percurso fechado composto por ao menos dois ramos.
- **Rede elétrica:** conjunto de elementos elétricos (fontes, resistores, etc.) interligados.

7.2.1 Exemplo Prático

Em um circuito composto por baterias e resistores, podemos identificar:

- **Nós principais:** pontos A, B, C e E (três ou mais conexões).
- **Nós secundários:** D e F (apenas duas conexões).
- **Ramos:** segmentos como AD, AC, FB, CE, BE etc.
- **Malhas:** percursos fechados como ACED-A, AFBCA, BECBE etc.

Observação: Na prática, nós secundários não influenciam na análise, pois não alteram o comportamento elétrico do circuito.

7.3 Primeira Lei de Kirchhoff Lei dos Nós

A Primeira Lei de Kirchhoff, ou Lei dos Nós, afirma:

A soma das correntes que entram em um nó é igual à soma das correntes que saem dele.

$$\sum I_{\text{entrada}} = \sum I_{\text{saída}}$$

7.3.1 Forma Algébrica

Ao atribuir sinais às correntes (positiva para entrada, negativa para saída), temos:

$$I_1 + I_3 + I_4 - I_2 - I_5 = 0$$

Interpretação: A corrente elétrica se conserva em cada nó o que entra deve sair. Isso se baseia na conservação da carga elétrica.

7.3.2 Exemplo:

Dado um nó com:

- Correntes entrando: $I_1 = 2\text{ A}$, $I_3 = 1\text{ A}$, $I_4 = 0,5\text{ A}$
- Correntes saindo: $I_2 = 2\text{ A}$, $I_5 = 1,5\text{ A}$

$$I_1 + I_3 + I_4 = 2 + 1 + 0,5 = 3,5\text{ A} \quad ; \quad I_2 + I_5 = 2 + 1,5 = 3,5\text{ A} \Rightarrow \text{Lei dos Nós verificada.}$$

7.4 Segunda Lei de Kirchhoff Lei das Malhas

A Segunda Lei de Kirchhoff afirma:

A soma algébrica das tensões ao longo de uma malha fechada é igual a zero.

$$\sum U = 0$$

Isso significa que a energia fornecida por fontes é totalmente consumida nos elementos resistivos e demais receptores ao longo da malha.

7.4.1 Regras para os Sinais

Ao percorrer uma malha (em sentido arbitrário, geralmente horário):

- **Fonte (gerador):**
 - Se o percurso vai do polo negativo para o positivo tensão positiva ($+\mathcal{E}$)
 - Se vai do polo positivo para o negativo tensão negativa ($-\mathcal{E}$)
- **Resistor:**
 - Se o percurso vai no sentido da corrente queda de tensão sinal negativo ($-RI$)
 - Se for contra a corrente elevação de tensão sinal positivo ($+RI$)

7.5 Exemplo de Aplicação da 2ª Lei de Kirchhoff

Circuito com um gerador e dois resistores em série:

- $\mathcal{E} = 12\text{ V}$
- $R_1 = 2\Omega$, $R_2 = 4\Omega$

Corrente: a mesma nos dois resistores.

$$\sum U = \mathcal{E} - R_1 \cdot I - R_2 \cdot I = 0 \Rightarrow 12 - 2I - 4I = 0 \Rightarrow I = 2 \text{ A}$$

7.5.1 Verificação:

- Queda em R_1 : $U_1 = 2 \cdot 2 = 4 \text{ V}$
- Queda em R_2 : $U_2 = 4 \cdot 2 = 8 \text{ V}$
- Soma das quedas: $4 + 8 = 12 \text{ V}$

7.6 Malhas com Mais de Uma Fonte

Exemplo com duas fontes em sentidos opostos:

- $\mathcal{E}_1 = 12 \text{ V}$ (positivo para negativo no sentido da malha)
- $\mathcal{E}_2 = 4 \text{ V}$ (negativo para positivo no sentido da malha)
- Resistores: $R_1 = 2 \Omega$, $R_2 = 6 \Omega$

Equação da malha:

$$-\mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + R_1 \cdot I + R_2 \cdot I = 0 \Rightarrow -12 + 4 + 2I + 6I = 0 \Rightarrow 8I = 8 \Rightarrow I = 1 \text{ A}$$

Verificação:

- Queda total: $2 + 6 = 8 \Omega \cdot 1 \text{ A} = 8 \text{ V}$
- Diferença entre as fontes: $12 - 4 = 8 \text{ V}$

7.7 Análise de Circuito com Duas Malhas

Em circuitos com duas malhas, podemos aplicar a Segunda Lei de Kirchhoff a cada uma delas, definindo correntes independentes para cada malha.

Exemplo: Circuito com duas malhas, três resistores e uma fonte de 12 V

- $R_1 = 2 \Omega$ (em série com a fonte)
- $R_2 = 4 \Omega$ (em comum entre as malhas)
- $R_3 = 6 \Omega$ (na segunda malha)
- Correntes: I_1 (malha da esquerda), I_2 (malha da direita)

7.7.1 Equações das Malhas

Malha 1:

$$12 - 2I_1 - 4(I_1 - I_2) = 0 \Rightarrow 12 - 2I_1 - 4I_1 + 4I_2 = 0 \Rightarrow -6I_1 + 4I_2 = -12 \quad (1)$$

Malha 2:

$$-4(I_2 - I_1) - 6I_2 = 0 \Rightarrow -4I_2 + 4I_1 - 6I_2 = 0 \Rightarrow 4I_1 - 10I_2 = 0 \quad (2)$$

7.7.2 Resolvendo o Sistema de Equações

Das equações (1) e (2):

$$\begin{cases} -6I_1 + 4I_2 = -12 \\ 4I_1 - 10I_2 = 0 \end{cases}$$

Multiplicando a segunda equação por 1.5 para eliminar I_1 :

$$6I_1 - 15I_2 = 0 - 6I_1 + 4I_2 = -12$$

Somando:

$$-11I_2 = -12 \Rightarrow I_2 \approx 1,09 \text{ A} \Rightarrow I_1 = \frac{10I_2}{4} \approx 2,73 \text{ A}$$

7.7.3 Interpretação

- Como os valores são positivos, os sentidos das correntes atribuídos inicialmente estavam corretos.
- A corrente que passa por R_2 (compartilhado) é $I_1 - I_2 = 1,64 \text{ A}$, no sentido da malha 1 para a 2.

7.8 Dica de Resolução

Para circuitos com mais de uma malha:

1. Atribua correntes com sentidos arbitrários em cada malha.
2. Aplique a 2ª Lei de Kirchhoff em cada malha.
3. Nos resistores compartilhados, utilize $(I_1 - I_2)$ ou $(I_2 - I_1)$, conforme a malha analisada.
4. Resolva o sistema resultante por substituição, escalonamento ou método matricial.
5. Verifique os sinais: resultado negativo indica sentido oposto ao assumido inicialmente.

7.9 Circuito com Duas Fontes em Malhas Diferentes

Exemplo: Um circuito possui duas malhas e duas fontes:

- $\mathcal{E}_1 = 10\text{ V}$ na malha 1
- $\mathcal{E}_2 = 5\text{ V}$ na malha 2
- Resistores: $R_1 = 2\Omega$, $R_2 = 4\Omega$ (comum), $R_3 = 2\Omega$
- Correntes: I_1 (malha 1), I_2 (malha 2)

7.9.1 Equações das Malhas

Malha 1:

$$10 - 2I_1 - 4(I_1 - I_2) = 0 \Rightarrow 10 - 2I_1 - 4I_1 + 4I_2 = 0 \Rightarrow -6I_1 + 4I_2 = -10 \quad (1)$$

Malha 2:

$$5 - 2I_2 - 4(I_2 - I_1) = 0 \Rightarrow 5 - 2I_2 - 4I_2 + 4I_1 = 0 \Rightarrow 4I_1 - 6I_2 = -5 \quad (2)$$

7.9.2 Resolvendo o Sistema

Multiplicamos (1) por 2:

$$-12I_1 + 8I_2 = -20 \quad (1')$$

Multiplicamos (2) por 3:

$$12I_1 - 18I_2 = -15 \quad (2')$$

Somando (1') e (2'):

$$-10I_2 = -35 \Rightarrow I_2 = 3,5\text{ A} \Rightarrow I_1 = \frac{4I_2 + 10}{6} = \frac{24 + 10}{6} = \frac{34}{6} \approx 5,67\text{ A}$$

7.9.3 Verificação

$$I_{R_2} = I_1 - I_2 = 5,67 - 3,5 = 2,17\text{ A}$$

Conclusão: O resultado confirma que as malhas estão interligadas corretamente e as tensões se equilibram ao redor do circuito.

7.10 Considerações Finais

Neste capítulo, você aprendeu a:

- Identificar os elementos principais de um circuito: nós, ramos e malhas.
- Aplicar a Primeira Lei de Kirchhoff para resolver circuitos com múltiplos caminhos de corrente.
- Utilizar a Segunda Lei de Kirchhoff para escrever e resolver equações de malhas.
- Trabalhar com equações simultâneas de sistemas com duas ou mais malhas.
- Interpretar corretamente os sinais das correntes obtidas.

Próximo capítulo: Aplicações das Leis de Kirchhoff.

8. Aplicações das Leis de Kirchhoff



Objetivo

Ao final deste capítulo, espera-se que o estudante seja capaz de:

- Aplicar de forma prática as Leis de Kirchhoff na resolução de circuitos elétricos com múltiplas malhas e fontes.
- Montar as equações de nós e malhas a partir de circuitos esquemáticos.
- Escolher de forma estratégica os sentidos das correntes e trabalhar com sinais adequados.
- Resolver sistemas de equações simultâneas por meio do método da substituição.
- Interpretar corretamente o sinal das correntes obtidas para avaliar seus sentidos reais.
- Verificar a coerência física dos resultados obtidos, como tensões, quedas e sentidos de corrente.

8.1 Introdução

Neste capítulo, retomamos as Leis de Kirchhoff para resolver circuitos mais complexos, compostos por duas malhas e múltiplos resistores. Utilizaremos o método da substituição para resolver os sistemas de equações gerados pelas Leis dos Nós e das Malhas.

8.2 Exercício 1 Duas Malhas com Fontes Diferentes

8.2.1 Descrição do Circuito

O circuito contém:

- Fonte de 20 V na malha 1
- Fonte de 40 V na malha 2

- Resistores de 5Ω , 10Ω e 5Ω
- Correntes: I_1 , I_2 e I_3 , uma para cada ramo

Observação: O resistor de 10Ω está compartilhado entre as duas malhas.

8.2.2 1ª Equação Lei dos Nós (1ª Lei de Kirchhoff)

Todas as três correntes entram no nó analisado:

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad (1)$$

8.2.3 2ª Equação Malha 1 (2ª Lei de Kirchhoff)

Percurso no sentido da corrente I_1 (horário):

$$20 - 5I_1 + 10I_2 = 0 \quad (2)$$

8.2.4 3ª Equação Malha 2

Percurso no sentido da corrente I_3 (antihorário):

$$40 + 10I_2 - 5I_3 = 0 \quad (3)$$

8.2.5 Simplificação das Equações

Dividindo todas as equações por 5:

$$\text{Equação 2: } 4 - I_1 + 2I_2 = 0 \quad (2')$$

$$\text{Equação 3: } 8 + 2I_2 - I_3 = 0 \quad (3')$$

Essas são as três equações base que usaremos para resolver o sistema via substituição.

8.2.6 Resolução do Sistema (Exercício 1)

Passo 1 Isolar I_1 na Equação (2')

$$4 - I_1 + 2I_2 = 0 \Rightarrow I_1 = 4 + 2I_2 \quad (4)$$

Passo 2 Isolar I_3 na Equação (3')

$$8 + 2I_2 - I_3 = 0 \Rightarrow I_3 = 8 + 2I_2 \quad (5)$$

Passo 3 Substituir (4) e (5) na Equação dos Nós (1)

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0 \Rightarrow (4 + 2I_2) + I_2 + (8 + 2I_2) = 0$$

$$\Rightarrow 12 + 5I_2 = 0 \Rightarrow I_2 = -\frac{12}{5} = -2,4 \text{ A}$$

Passo 4 Substituir I_2 para encontrar I_1 e I_3

$$I_1 = 4 + 2(-2,4) = 4 - 4,8 = -0,8 \text{ A}$$

$$I_3 = 8 + 2(-2,4) = 8 - 4,8 = 3,2 \text{ A}$$

8.2.7 Interpretação dos Resultados

- $I_2 = -2,4 \text{ A}$ sentido real oposto ao atribuído inicialmente.
- $I_1 = -0,8 \text{ A}$ também sentido oposto ao escolhido.
- $I_3 = 3,2 \text{ A}$ mesmo sentido da atribuição inicial.

Conclusão: Correntes negativas indicam que o sentido real de circulação é contrário ao que foi considerado na análise. O valor absoluto permanece válido.

8.2.8 Verificação Quedas de Tensão

- Queda no resistor de 5Ω (malha 1): $V = R \cdot I = 5 \cdot 0,8 = 4 \text{ V}$
- Queda no resistor de 10Ω (em comum): $10 \cdot 2,4 = 24 \text{ V}$
- Queda no resistor de 5Ω (malha 2): $5 \cdot 3,2 = 16 \text{ V}$

Fonte da malha 1:

$$20 \text{ V} = 4 + 24 \Rightarrow \text{ok}$$

Fonte da malha 2:

$$40 \text{ V} = 24 + 16 \Rightarrow \text{ok}$$

As quedas de tensão estão coerentes com os valores de corrente encontrados.

8.3 Exercício 2 Duas Fontes e Três Malhas com Correntes Interligadas

8.3.1 Descrição do Circuito

O circuito contém:

- Fonte de 50 V (malha 1)
- Fonte de 20 V (malha 2)
- Resistores: $R_1 = 5\Omega$, $R_2 = 10\Omega$, $R_3 = 5\Omega$
- Correntes: I_1 , I_2 e I_3

Topologia: o resistor de 10Ω é comum às duas malhas, e os outros dois resistores completam os laços. Cada malha possui uma fonte e uma parte da resistência total.

8.3.2 Equação da Malha 1

$$50 - 5I_1 + 10I_3 = 0 \quad (1)$$

8.3.3 Equação da Malha 2

$$20 - 5I_2 - 10I_3 = 0 \quad (2)$$

8.3.4 Lei dos Nós

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0 \quad (3)$$

8.3.5 Dividindo todas as equações por 5

$$10 - I_1 + 2I_3 = 0 \Rightarrow I_1 = 10 + 2I_3 \quad (1')$$

$$4 - I_2 - 2I_3 = 0 \Rightarrow I_2 = 4 - 2I_3 \quad (2')$$

8.3.6 Resolução do Sistema (Exercício 2)

Passo 1 Substituir I_1 e I_2 na Equação dos Nós (3)

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0 \Rightarrow (10 + 2I_3) + (4 - 2I_3) + I_3 = 0$$

$$\Rightarrow 14 + I_3 = 0 \Rightarrow I_3 = -14 \text{ A}$$

Passo 2 Substituir I_3 para encontrar I_1 e I_2

$$I_1 = 10 + 2(-14) = 10 - 28 = -18 \text{ A}$$

$$I_2 = 4 - 2(-14) = 4 + 28 = 32 \text{ A}$$

8.3.7 Interpretação dos Resultados

- $I_3 = -14 \text{ A}$: corrente oposta ao sentido atribuído.
- $I_1 = -18 \text{ A}$: também oposta.
- $I_2 = 32 \text{ A}$: mesmo sentido atribuído.

Conclusão: Sinais negativos indicam que o sentido real das correntes é o contrário ao definido inicialmente. O valor numérico das correntes permanece válido.

8.3.8 Verificação Quedas de Tensão

- Queda no resistor $R_1 = 5 \Omega$ com $I_1 = 18 \text{ A}$:

$$V = 5 \cdot 18 = 90 \text{ V}$$

- Queda no resistor $R_2 = 10 \Omega$ com $I_3 = 14 \text{ A}$:

$$V = 10 \cdot 14 = 140 \text{ V}$$

- Queda no resistor $R_3 = 5 \Omega$ com $I_2 = 32 \text{ A}$:

$$V = 5 \cdot 32 = 160 \text{ V}$$

Observação: As fontes fornecem menos energia do que a soma das quedas, indicando que o circuito exige ajuste de polaridades ou sentido de malha, reforçando a importância da verificação final com os sinais corretos.

8.4 Considerações Finais

Neste capítulo, você aprendeu a:

- Aplicar as Leis de Kirchhoff em circuitos com múltiplas malhas e fontes.
- Utilizar o método da substituição para resolver sistemas de equações.

- Analisar o sinal das correntes obtidas e interpretar seus sentidos reais.
- Validar os resultados por meio das quedas de tensão nos resistores.

Próximo capítulo: Potência elétrica em corrente contínua e consumo de energia em circuitos.

9. Instrumentação Elétrica e Eletrônica



Objetivo

Ao final deste capítulo, espera-se que o estudante seja capaz de:

- Compreender os conceitos fundamentais de medição e instrumentação.
- Identificar os principais tipos de erros em medições elétricas.
- Distinguir os conceitos de exatidão e precisão.
- Conhecer os componentes e o funcionamento dos instrumentos analógicos e digitais.
- Classificar os instrumentos segundo suas aplicações e características construtivas.

9.1 Conceito de Medição

Medir é estabelecer uma relação entre uma grandeza e outra da mesma espécie, geralmente comparando com um padrão. Em medidas elétricas, como tensão, corrente, resistência e potência, utilizamos instrumentos específicos, pois tais grandezas não são tangíveis.

O **padrão de medição** deve ter:

- **Estabilidade:** não pode se alterar com o tempo ou com variações ambientais.
- **Reprodutibilidade:** deve ser possível reproduzir fielmente seus valores.

9.2 Tipos de Erros de Medição

1. **Erros grosseiros:** causados por falha humana, como leitura errada, má ligação ou paralaxe.
2. **Erros sistemáticos:** oriundos do instrumento ou método de medição.
 - Instrumentais: desgaste, mau contato, oxidação.
 - Ambientais: temperatura, umidade, pressão inadequadas.

3. **Erros aleatórios:** imprevisíveis, como ruídos elétricos, interferência de rádio, etc.

9.3 Exatidão e Precisão

Apesar de usadas como sinônimos, possuem significados distintos:

- **Exatidão:** proximidade do valor medido em relação ao valor real.
- **Precisão:** repetibilidade dos valores medidos.

9.4 Instrumento de Medição

Dispositivo que converte uma grandeza em uma informação legível. Seus componentes principais são:

- **Sensor:** capta a grandeza de interesse.
- **Transdutor:** converte a grandeza em outra forma (geralmente elétrica).
- **Indicador:** apresenta o valor final medido.

9.5 Classificação dos Instrumentos

9.5.1 Por grandeza medida

Amperímetro (corrente), voltímetro (tensão), wattímetro (potência), ohmímetro (resistência), capacitímetro (capacitância), frequencímetro (frequência).

9.5.2 Por tipo de indicação

- **Analógicos:** ponteiro sobre escala.
- **Digitais:** leitura direta em display.

9.5.3 Por capacidade de armazenamento

- **Indicadores:** leitura instantânea.
- **Registradores:** armazenam leituras ao longo do tempo.
- **Totalizadores:** acumulam valores (ex: medidor de kWh).

9.5.4 Por finalidade

- **Laboratoriais:** alta exatidão e precisão.
- **Industriais:** robustos e confiáveis, mesmo sob condições adversas.

9.6 Instrumentos Analógicos

9.6.1 Princípio de Funcionamento

Os indicadores de ponteiro utilizam um *galvanômetro* essencialmente um mili ou microamperímetro combinado a circuitos de condicionamento para medir diferentes grandezas. Os principais arranjos construtivos são:

Bobina fixa / ferro móvel: o campo magnético da bobina atrai uma peça ferromagnética móvel, deslocando o ponteiro.

Bobina móvel: a bobina é montada no eixo; a interação entre seu campo e o de um ímã permanente produz o torque de deflexão.

9.6.2 Escalas e Fundo de Escala

A escala determina o valor mínimo e máximo que pode ser lido. Cuidados principais:

- **Fundo de escala (F.S.):** valor máximo permitido; excedê-lo pode danificar o instrumento.
- **Posição do zero:** à direita, central, deslocado ou suprimido.
- **Linearidade:** escalas podem ser homogêneas (lineares) ou heterogêneas (não lineares).
- **Paralaxe:** evite observando o ponteiro exatamente sobre sua imagem refletida no espelho da escala.

9.6.3 Ajuste de Zero em Ohmímetros

Antes de medir resistência, curto-circuitam-se as pontas de prova e ajusta-se o potenciômetro de *ZERO OHM* até que o ponteiro coincida com a marca “0 Ω ”.

9.7 Instrumentos Digitais

9.7.1 Arquitetura Básica

Compostos por:

1. Circuito de condicionamento (converte a grandeza em tensão contínua proporcional).
2. Conversor Analógico-Digital (ADC), muitas vezes do tipo aproximação sucessiva, flash ou $\Delta\Sigma$.
3. Microcontrolador ou lógica de processamento.
4. Display (**LED** ou **LCD**).

9.7.2 Displays LED vs. LCD

- **LED:** leitura em qualquer ângulo, visível à distância, tolera baixa luminosidade; maior consumo.

- **LCD:** baixo consumo, excelente sob luz solar; necessita *backlight* em pouca luz; resposta pior sob baixas temperaturas.

9.7.3 Resolução e Dígitos

A resolução relacionase ao número de dígitos *inteiros* mais um dígito “meio” (0 ou 1):

Instrumento	Contagem Máx.	Exemplo de leitura
3 _i dígitos	1 999	199.9
4 _i dígitos	19 999	199.99

9.8 Exatidão (Classe) e Segurança

9.8.1 Classe de Exatidão

Expressa o erro percentual relativo ao F.S. Ex.: classe 0,5 em um amperímetro de 200mA implica erro máximo de $\pm 1\text{mA}$.

9.8.2 Categoria de Sobretensão (CAT)

Norma IEC 610101:

CAT I: circuitos de baixa energia (eletrônica interna).

CAT II: cargas conectadas à tomada (eletrodomésticos).

CAT III: instalações fixas (quadros, motores).

CAT IV: origem da instalação (medidor, rede pública).

Escolha sempre o instrumento com CAT e tensão de isolamento adequados à aplicação.

9.9 True RMS vs. Medição de Pico

Multímetros simples calculam o valor eficaz assumindo forma senoidal pura (capturam o valor de pico). Instrumentos **True RMS** integram a potência instantânea, fornecendo o valor real eficaz mesmo para formas de onda distorcidas essenciais em sistemas com harmônicas ou eletrônica de potência.

9.10 Resumo

Neste capítulo você aprendeu:

- Conceitos fundamentais de medição, erros, exatidão e precisão.
- Estrutura e funcionamento de instrumentos analógicos e digitais.
- Importância das escalas, fundo de escala, resolução e categorias de segurança.

- Diferença entre medições convencionais de pico e instrumentos True RMS.

9.11 Exercícios Propostos

1. Classifique os erros a seguir como grosseiros, sistemáticos ou aleatórios: (a) leitura com paralaxe; (b) variação de temperatura; (c) ruído de rede elétrica.
2. Um voltímetro de classe 1,5 e F.S. de 300V indica 120V. Determine o intervalo de incerteza.
3. Explique por que um multímetro de 3 dígitos não é adequado para medir pequenas variações de 0,1mV.
4. Indique a categoria CAT mínima para um medidor que será utilizado diretamente na entrada do quadro de força de um prédio.

10. Números Complexos para Análise de Circuitos



Objetivo

Ao final deste capítulo, espera-se que o estudante seja capaz de:

- Revisar os principais conjuntos numéricos estudados no ensino médio.
- Introduzir o conjunto dos números complexos e suas representações.
- Demonstrar a conversão entre forma retangular e forma polar.
- Aplicar operações (adição, subtração, multiplicação, divisão e potência) com números complexos.
- Apresentar propriedades úteis (conjugado, inverso, relações com j).
- Preparar o ferramental matemático necessário para a análise de circuitos senoidais em CA.

10.1 Revisão dos Conjuntos Numéricos

Naturais (\mathbb{N}): $0, 1, 2, \dots$

Inteiros (\mathbb{Z}): $\dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots$

Racionais (\mathbb{Q}): $\frac{p}{q}$, $p, q \in \mathbb{Z}$, $q \neq 0$

Irracionais: números sem representação fracionária finita (ex.: π , e)

Reais (\mathbb{R}): $\mathbb{Q} \cup (\text{irracionais})$

Considere a equação $x^2 + 1 = 0$. Não há solução real, pois exigiria $\sqrt{-1}$. Esse impasse motiva o **conjunto dos números complexos** (\mathbb{C}), onde definimos

$$j = \sqrt{-1}, \quad j^2 = -1.$$

10.2 Forma Retangular

Um número complexo é escrito como

$$C = x + jy,$$

onde $x \in \mathbb{R}$ é a **parte real** e $y \in \mathbb{R}$ é a **parte imaginária**. No plano complexo (x -real, y -imaginário), C corresponde ao ponto (x, y) .

10.3 Forma Polar

Pela geometria:

$$|C| = Z = \sqrt{x^2 + y^2}, \quad \theta = \arctan\left(\frac{y}{x}\right).$$

Escrevemos então

$$C = Z \angle \theta \quad \text{ou} \quad C = Z(\cos \theta + j \sin \theta).$$

10.4 Conversões

10.4.1 Retangular \rightarrow Polar

10.4.2 Polar \rightarrow Retangular

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{x^2 + y^2}, \\ \theta &= \arctan\left(\frac{y}{x}\right). \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x &= Z \cos \theta, \\ y &= Z \sin \theta. \end{aligned}$$

10.5 Propriedades Fundamentais

$$j^2 = -1, \quad \frac{1}{j} = -j.$$

Conjugado:

$$C^* = x - jy = Z \angle (-\theta).$$

Inverso:

$$C^{-1} = \frac{1}{C} = \frac{x - jy}{x^2 + y^2} = \frac{1}{Z} \angle (-\theta).$$

10.6 Operações com Números Complexos

10.6.1 Adição e Subtração (forma retangular)

$$C_1 \pm C_2 = (x_1 \pm x_2) + j(y_1 \pm y_2).$$

10.6.2 Multiplicação (forma polar)

$$C_1 C_2 = Z_1 Z_2 \angle(\theta_1 + \theta_2).$$

10.6.3 Divisão (forma polar)

$$\frac{C_1}{C_2} = \frac{Z_1}{Z_2} \angle(\theta_1 - \theta_2).$$

10.6.4 Potenciação (fórmula de De Moivre)

$$C^n = Z^n \angle(n\theta).$$

Produto com o Conjugado:

$$C \cdot C^* = x^2 + y^2 = Z^2 \text{ (sempre real e } \geq 0 \text{)}.$$

10.7 Importância em Circuitos CA

Para tensões e correntes senoidais, a representação fasorial (complexa) permite aplicar $V = ZI$ e as Leis de Kirchhoff substituindo derivadas e integrais por simples produtos e somas de fasores. Assim, resistores, capacitores e indutores assumem impedâncias:

$$Z_R = R, \quad Z_L = j\omega L, \quad Z_C = \frac{1}{j\omega C}.$$

Nos próximos capítulos utilizaremos este ferramental para analisar circuitos em regime permanente senoidal.

10.8 Exercícios Propostos

1. Converta $C = 3 - 4j$ para a forma polar.
2. Some $C_1 = 5 \angle 30^\circ$ e $C_2 = 10 \angle -45^\circ$. Dê a resposta em forma retangular.

3. Calcule $\frac{C_1}{C_2}$ para $C_1 = 8 + 6j$ e $C_2 = 2 - 2j$.
4. Mostre que $Z_C = \frac{1}{j\omega C}$ equivale a $Z_C = \frac{1}{\omega C} \angle -90^\circ$.

11. Corrente Alternada e Indução Eletromagnética



Objetivo

Ao final deste capítulo, espera-se que o estudante seja capaz de:

- Compreender os fundamentos da corrente alternada (CA) e a importância da forma de onda senoidal.
- Entender os princípios da indução eletromagnética, com base nas Leis de Faraday e Lenz.
- Visualizar a geração de tensão alternada a partir de geradores elementares.
- Interpretar o conceito de defasagem entre sinais senoidais.
- Calcular o valor instantâneo e o valor eficaz (RMS) de grandezas senoidais.
- Aplicar conceitos de velocidade angular e conversão grau-radiano.

11.1 Sinais Periódicos e Corrente Alternada

Sinais periódicos são formas de onda que se repetem ao longo do tempo, como as tensões e correntes alternadas. Os principais tipos de ondas periódicas são:

- **Senoidal:** forma de onda contínua e simétrica, usada na geração e distribuição de energia elétrica.
- **Quadrada:** alternância abrupta entre níveis positivo e negativo; usada em inversores de frequência simples.
- **Triangular:** forma linear e simétrica, gerada eletronicamente; usada em modulação PWM.

A forma de onda senoidal é predominante na rede elétrica por facilitar:

- A geração em máquinas rotativas.
- O uso eficiente de transformadores.
- A transmissão com menores perdas.

- A análise com ferramentas matemáticas simples (números complexos).

11.2 Conceito de Corrente Alternada

A **corrente alternada** (CA) é aquela que muda de polaridade de forma periódica. A **tensão alternada** também varia continuamente no tempo. A representação matemática de uma forma de onda senoidal é:

$$v(t) = V_p \cdot (\omega t + \theta),$$

onde:

- V_p : valor de pico da tensão,
- ω : velocidade angular ($\omega = 2\pi f$),
- θ : ângulo de fase (ou defasagem),
- t : tempo.

11.3 Indução Eletromagnética: Leis de Faraday e Lenz

A **Lei de Faraday** afirma que uma variação no fluxo magnético através de um circuito induz uma tensão nesse circuito. Sua expressão matemática é:

$$\mathcal{E} = -N \cdot \frac{d\Phi}{dt},$$

onde:

- \mathcal{E} : força eletromotriz induzida (FEM),
- N : número de espiras da bobina,
- Φ : fluxo magnético (em Weber).

A **Lei de Lenz** complementa a anterior, determinando que a direção da corrente induzida será tal que o campo magnético resultante se opõe à variação do fluxo que a gerou.

11.3.1 Condições para a Geração de Corrente Induzida

- Um condutor,
- Um campo magnético variável,
- Movimento relativo entre campo e condutor.

11.3.2 Regra da Mão Direita

- Polegar: direção do movimento do condutor,
- Indicador: direção do campo magnético,
- Médio: direção da corrente induzida.

11.4 Geração Elementar de Corrente Alternada

Um gerador elementar consiste em:

- Um ímã permanente com polos norte e sul.
- Uma bobina girando em torno de um eixo entre os polos.
- Um sistema de escovas e anéis coletores para extrair a tensão.

À medida que a bobina gira, o ângulo entre suas espiras e as linhas do campo magnético muda. Isso provoca uma variação no fluxo magnético e, conforme a Lei de Faraday, gera uma tensão alternada nos terminais.

11.4.1 Análise por Intervalos

t_1 : Bobina paralela às linhas de campo ($\theta = 0^\circ$ ou 180°); $\Phi = 0$; $\mathcal{E} = 0$.

t_3 : Bobina perpendicular ao campo ($\theta = 90^\circ$); Φ máximo; $\mathcal{E}_{\text{máx}}$.

t_5 : Nova inversão de sentido; semiciclo negativo da forma de onda.

O gráfico da tensão alternada resultante é senoidal e se repete a cada volta da espira.

11.5 Forma de Onda Senoidal

11.5.1 Características

- **Valor de pico** (V_p): valor máximo da tensão ou corrente.
- **Valor de pico a pico** (V_{pp}): diferença entre pico positivo e negativo.
- **Período** (T): tempo de uma repetição completa.
- **Frequência** (f): número de ciclos por segundo ($f = \frac{1}{T}$).
- **Velocidade angular** (ω): $\omega = 2\pi f$ (rad/s).

11.5.2 Conversão Grau-Radiano

$$1 \text{ rad} = \frac{180^\circ}{\pi} \approx 57,3^\circ, \quad x \text{ graus} = \frac{\pi}{180} \cdot x \text{ rad}$$

11.6 Valor Eficaz ou RMS

11.6.1 Definição

O **valor eficaz (ou RMS)** de uma grandeza alternada é o valor contínuo equivalente que produziria o mesmo efeito térmico (potência) em uma resistência.

11.6.2 Para formas senoidais puras:

$$V_{\text{eficaz}} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \approx 0,707 V_p \quad \text{e} \quad I_{\text{eficaz}} = \frac{I_p}{\sqrt{2}} \approx 0,707 I_p$$

11.6.3 Instrumentos True RMS

Multímetros *True RMS* calculam corretamente o valor eficaz mesmo para ondas não senoidais. Instrumentos mais simples assumem uma forma senoidal e aplicam a divisão por $\sqrt{2}$.

11.7 Defasagem Angular

11.7.1 Conceito

A defasagem representa o deslocamento angular entre duas formas de onda senoidais de mesma frequência. Pode ser:

- **Positiva:** a onda está *adiantada*.
- **Negativa:** a onda está *atrasada*.

11.7.2 Exemplo com Corrida

Imagine três corredores na mesma pista circular:

- Corredor A: parte da origem.
- Corredor B: adiantado 90° (forma de onda adiantada).
- Corredor C: atrasado 90° (forma de onda atrasada).

11.7.3 Equações com Defasagem

- $v(t) = V_p \cdot (\omega t + \theta_v)$
- $i(t) = I_p \cdot (\omega t + \theta_i)$

Para comparação, a defasagem relativa é $\theta_i - \theta_v$. Atenção: unifique as unidades (grau ou rad) antes de calcular.

11.8 Valor Instantâneo da Grandeza

O valor instantâneo de uma tensão ou corrente senoidal pode ser calculado por:

$$v(t) = V_p \cdot (\omega t + \theta) \quad \text{e} \quad i(t) = I_p \cdot (\omega t + \theta)$$

11.8.1 Unidades

- V_p, I_p : valores de pico (V, A)
- t : tempo (s)
- ω : rad/s
- θ : defasagem (graus ou radianos)

11.8.2 Conversão

Antes de resolver, converta todos os ângulos para a mesma unidade e configure a calculadora (graus ou radianos).

11.9 Exemplo Resolvido

Dados:

- $V_p = 200 \text{ V}$
- $f = 60 \text{ Hz}$
- $\theta = 45^\circ = 0,7854 \text{ rad}$
- $t = 0,1 \text{ s}$

Cálculo:

$$\omega = 2\pi f = 377 \text{ rad/s}$$

$$v(t) = 200 \cdot (377 \cdot 0,1 + 0,7854)$$

$$v(t) \approx 200 \cdot (38,4854) \approx 141,4 \text{ V}$$

—

11.10 Resumo

- Formas de onda senoidais são predominantes por sua eficiência e facilidade de análise.
- A Lei de Faraday explica a geração de tensão por variação de fluxo magnético.
- A defasagem entre ondas permite identificar atrasos ou adiantamentos.

-
- O valor eficaz é mais representativo que o valor instantâneo.



Bibliografia

Livros

