

ELETRICIDADE BÁSICA

PARA CURSOS TÉCNICOS

Com princípios de sustentabilidade na geração,
eficiência energética e conservação de energia.

+ de **130** exercícios propostos

José Artur Alves Dias
Álvaro de Medeiros Maciel

ELETRICIDADE BÁSICA PARA CURSOS TÉCNICOS

Com princípios de sustentabilidade na geração,
eficiência energética e conservação de energia.

José Artur Alves Dias *D. Sc.*

Álvaro de Medeiros Maciel *D. Sc.*

PRESIDENTE DA REPÚBLICA

Jair Messias Bolsonaro

MINISTRO DA EDUCAÇÃO

Ricardo Vélez Rodríguez

SECRETÁRIO DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA

Alexandro Ferreira de Souza

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA

REITOR

Cícero Nicácio do Nascimento Lopes

PRÓ-REITORA DE ENSINO

Mary Roberta Meira Marinho

PRÓ-REITORA DE PESQUISA, INOVAÇÃO E PÓS-GRADUAÇÃO

Silvana Luciene do Nascimento Cunha Costa

PRÓ-REITORA DE EXTENSÃO E CULTURA

Tânia Maria de Andrade

PRÓ-REITOR DE ASSUNTOS ESTUDANTIS

Manoel Pereira de Macedo Neto

PRÓ-REITOR DE ADMINISTRAÇÃO E FINANÇAS

Marcos Vicente dos Santos

EDITORA IFPB

DIRETOR EXECUTIVO

Carlos Danilo Miranda Regis

CAPA

Marcela Leite

REVISÃO TEXTUAL

Joselí Maria da Silva

Copyright © José Artur Alves Dias e Álvaro de Medeiros Maciel. Todos os direitos reservados.

Proibida a venda As informações contidas no livro são de inteira responsabilidade dos seus autores.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação - CIP
Biblioteca Nilo Peçanha - IFPB, *campus* João Pessoa

D541e Dias, José Artur Alves.
Eletricidade básica para cursos técnicos / José Artur Alves Dias, Álvaro de Medeiros
Maciel. – João Pessoa : IFPB, 2019.
432 p. : il.

PDF

ISBN: 978-85-5449-019-5

1. Engenharia elétrica. 2. Eletricidade básica - cursos técnicos. I. Maciel, Álvaro de
Medeiros. II. Título.

CDU 621.3

Lucrecia Camilo de Lima
Bibliotecária
CRB 15/132

*Só a educação é instrumento de geração de riqueza.
Só a educação é ferramenta de distribuição de oportunidades.
Só a educação é instrumento de libertação de um povo.*

Os Autores.

Agradecimentos

Agradecimento a Deus e aos nossos familiares.

Agradecimento especial à Unidade Acadêmica III do IFPB, pelo estímulo.

Agradecimento aos alunos, que nos deram o prazer de participar da construção de suas vidas profissionais.

Agradecimento à Editora IFPB, nas pessoas do Prof. Danilo e da Profa. Joseli.

Agradecimento a todos que, direta ou indiretamente, contribuem para um mundo mais feliz.

Prefácio

Como se fosse mágica! No mundo de hoje, cada vez mais tecnológico, a eletricidade encontra-se numa posição de destaque. Muitas vezes se confunde tecnologia com aplicações em eletricidade e magnetismo, mesmo sendo as ciências tecnológicas muito mais abrangentes. Nas residências, no trabalho, nos hospitais, no lazer e onde quer que vamos, encontramos aplicações da eletricidade e do magnetismo, tornando nosso viver mais eficiente. A eletricidade e o magnetismo fazem parte da vida de todas as pessoas, mesmo que estas não tenham noção de sua definição nem de todo o processo que vai da geração até nossas casas. No simples ato de sacar dinheiro nos caixas eletrônicos, em que se apertam botões e toca-se em telas sensíveis, passa despercebido, para a grande maioria das pessoas, que, por trás deste ato, há “um relacionamento dos indivíduos com os fenômenos elétricos”. Este relacionamento quase mágico da eletricidade e magnetismo com as pessoas não é de hoje. Antes de se tornarem disciplinas científicas, os fenômenos elétricos e magnéticos eram utilizados para entretenimento – por ilusionistas – e também para causar medo em sociedades primitivas. Deuses eram associados a relâmpagos e trovões. Quando esses fenômenos foram passíveis de serem repetidos dentro dos laboratórios é que nasceram a eletricidade e o magnetismo como ciências, e é nesse instante que a magia vira oportunidade. Oportunidade de utilizar tais fenômenos para resolver problemas humanos e gerar riqueza.

Este livro traz o estudo da eletricidade e do magnetismo sobre duas bases importantes: multidisciplinaridade e sustentabilidade. Dentro do possível, informações sobre química e história são pontuadas no estudo dos fenômenos elétricos e magnéticos, mostrando que esses conhecimentos são interligados com outras ciências. Esta visão multidisciplinar é muito importante para o mundo do trabalho. Qualquer projeto, por mais simples que seja, exige um viés multidisciplinar. Para se criar desde um projeto elétrico predial até um projeto de um veículo automotor, é necessária uma visão multidisciplinar. Um determinado conhecimento técnico exige, atualmente, atenção a outras áreas de conhecimentos que se tangenciam e permitem uma visão mais profunda dos problemas do cotidiano. Inculcar esse padrão de comportamento aos técnicos é fundamental para a formação de mão de obra altamente qualificada. Outro viés deste livro é a sustentabilidade, ou noção do impacto, no ambiente, das principais fontes primárias de energia elétrica e quanto este impacto compromete a qualidade de vida desta e das futuras gerações. Além disto, o livro traz à tona a sustentabilidade, em nível de consumidor final da energia elétrica – em outras palavras, eficiência energética e conservação de energia elétrica. Ideias de uma geração e consumo de energia elétrica mais eficientes e comprometidos com futuro são fundamentais para a formação técnica de alto desempenho.

O livro é voltado para disciplinas de eletricidade em cursos de nível técnico, sejam da modalidade integrada ou subsequente ao ensino médio, mais especificamente cursos que têm como base teórica a eletricidade e o magnetismo, como, por exemplo, Eletrotécnica, Eletrônica, Telecomunicação, Equipamentos Médico-Hospitalares, entre outros. Muito embora o livro seja voltado para uma categoria de cursos técnicos, este também pode ser

utilizado por técnicos egressos que tenham como objetivo atualização de conhecimentos ou como leitura complementar orientada pelo professor, principalmente em cursos técnicos que tangenciam conhecimentos de eletricidade e magnetismo, como o curso técnico em mecânica, por exemplo.

Uma grande atenção se dá às grandezas elétricas e a seus métodos de medição. O futuro técnico, quer esteja trabalhando no projeto, em sua execução ou na manutenção de sistemas elétricos, sempre se confrontará com as grandezas elétricas. Ter a correta noção da ordem de grandeza é fundamental para um trabalho eficiente e, sobretudo, sem riscos de acidentes com danos a pessoas e/ou equipamentos.

Os autores esperam que esta obra agregue muito à formação do técnico e à prática do professor bem como seja de profundo valor ao país.

José Artur Alves Dias *D. Sc.*
Álvaro de Medeiros Maciel *D. Sc.*

João Pessoa, Setembro de 2018.

Sumário

1 Eletrostática	21
1.1 – Configuração de campo elétrico devido a várias cargas	23
1.2 – Um pouco de história	24
1.3 – Potencial elétrico	26
1.4 – Rigidez dielétrica	28
1.5 – Do raio e para-raio	29
1.6 – Método do espelhamento de cargas elétricas	32
1.7 – Gerador de Van de Graaff	33
1.8 – Eletricidade e a estrutura atômica	34
1.9 – Da jarra de Leiden ao capacitor	36
1.10 – Efeitos indesejáveis da eletrostática	40
1.11 – Aplicações industriais da eletrostática	41
Exercícios propostos	44
Referências	47
2 Grandezas e suas medições	48
2.1 – Unidades de grandezas e seus submúltiplos	49
2.2 – Voltagem ou Tensão elétrica	50
2.2.1 – Fontes de tensão	50
2.2.2 – A bateria elétrica	51
2.2.3 – Fontes de tensão fotovoltaicas e termovoltáicas	54
2.2.4 – Como medir tensão elétrica em 7 passos	55
2.3 – Corrente elétrica	57
2.3.1 – Como medir corrente elétrica em 7 passos	58
2.4 – Corrente contínua ou alternada? Qual a melhor?	59
2.5 – Resistência elétrica	60
2.5.1 – Teste de continuidade	63
2.5.2 – Medição de isolamento	63
2.5.3 – Resistores para circuitos eletrônicos	66
2.5.4 – Variação da resistência com a temperatura	68
2.5.5 – Resistências variáveis – potenciômetros e reostatos	69
2.5.6 – Resistências não lineares	70

2.6 – Potência elétrica ativa	71
2.6.1 – Demanda elétrica, Potência instalada e Potência média	73
2.7 – Potência elétrica reativa	75
2.8 – Fator de potência	76
2.9 – Energia elétrica	77
2.10 – Capacitores	79
2.11 – Grandezas não elétricas importantes	80
2.11.1 – Temperatura	80
2.11.2 – Espessura (micrômetro e paquímetro)	84
2.12 – Padrão de simbologia e esquemas eletroeletrônicos	85
2.13 – Associação de resistores – aplicação dos conceitos de potência ativa	87
Exercícios propostos	90
Referências	95

3 Elementos de magnetismo **97**

3.1 – Um pouco de história	99
3.2 – Ímãs e eletroímãs	99
3.3 – Grandezas magnéticas	101
3.4 – Domínios magnéticos	103
3.5 – Curvas de magnetização e permeabilidade magnética	103
3.6 – Características dos ímãs permanentes	106
3.7 – Força magnética atuando em um condutor com corrente elétrica e em cargas elétricas	107
3.8 – Leis do magnetismo	110
3.8.1 – Lei de Faraday	110
3.8.2 – Lei de Ampère	112
3.9 – Campo magnético ao redor de um condutor com corrente elétrica	113
3.10 – Campo magnético numa bobina com núcleo toroidal	114
3.11 – Indutância	115
3.11.1 – Determinação da indutância numa bobina de núcleo toroidal	116
3.11.2 – Indutância aproximada de uma bobina linear	117
3.12 – Força magnetomotriz e relutância magnética	119
3.13 – Motor elétrico – aplicações da atração e repulsão magnéticas	121
3.14 – Algumas aplicações comerciais do magnetismo	122
3.14.1 – Transformadores elétricos	122
3.14.2 – Válvulas solenoides	123

3.14.3 – Máquina de imagem por ressonância magnética	125
3.14.4 – Sensores indutivos	125
3.14.5 – Sensores indutivos para detecção de tráfego de veículos	127
3.14.6 – Outras aplicações	130
Exercícios propostos	133
Referências	137
4 Medidas Elétricas	139
4.1 – Instrumentos de medição	139
4.2 – Princípios de funcionamento de instrumentos de medição analógica	141
4.2.1 – Ímã permanente e bobina móvel	141
4.2.2 – Ferro móvel	143
4.2.3 – Eletrodinâmicos	144
4.2.4 – Lâminas vibráteis	145
4.2.5 – Instrumento de medição digital	146
4.2.6 – Instrumentos TRUE RMS	147
4.3 – Erros de medição	148
4.4 – Erros relativos e absolutos	150
4.5 – Médias como medida de tendência	151
4.6 – Medidas de dispersão	152
4.7 – Precisão <i>versus</i> exatidão	154
Referências	156
5 Circuitos elétricos de corrente contínua	157
5.1 – Leis de Ohm e de Kirchhoff	157
5.2 – Divisor de corrente em circuitos de corrente contínua	162
5.3 – Divisor de tensão em circuitos de corrente contínua	164
5.4 – Análise de circuitos pela lei das malhas	170
5.4.1 – Matrizes e cálculo de determinantes	174
5.4.2 – Sistemas de equações lineares e matrizes	175
5.4.3 – Regra de Cramer para solução de sistemas de equações lineares	176
5.5 – Análise de circuitos pelo método das tensões nodais	181
5.6 – Métodos de simplificação de circuitos elétricos	185
5.6.1 – Teorema de Thèvenin	185
5.6.2 – Teorema de Norton	187

Exercícios propostos	189
Referências	200

6 Circuitos elétricos de corrente alternada **201**

6.1 – Simbologias das fontes em corrente alternada	203
6.2 – Grandezas em corrente alternada em elementos de circuitos e relações de fase	203
6.3 – Lei de Ohm em circuitos de corrente alternada e conceito de impedância	205
6.3.1 – Impedância	205
6.3.2 – Lei de Ohm aplicada a resistências em circuitos de corrente alternada .	207
6.3.3 – Lei de Ohm aplicada a indutores em circuitos de corrente alternada	207
6.3.4 – Lei de Ohm aplicada a capacitores em circuitos de corrente alternada ..	208
6.4 – Fasores	208
6.4.1 – Multiplicação de fasores	210
6.4.2 – Divisão de fasores	210
6.4.3 – Soma de fasores	210
6.4.4 – Subtração de fasores	211
6.5 – Leis de Kirchhoff usando fasores	212
6.5.1 – Leis de Kirchhoff para as tensões	212
6.5.2 – Leis de Kirchhoff para as correntes	212
6.6 – Associação de impedâncias	214
6.6.1 – Associação de impedâncias em série	214
6.6.2 – Associação de impedâncias em paralelo	215
6.6.3 – Associação de impedâncias mistas	216
6.7 – Representação fasorial	217
6.7.1 – Representação fasorial entre tensões e correntes	218
6.8 – Potência em circuitos de corrente alternada	221
6.8.1 – Potência instantânea em circuitos de corrente alternada	222
6.8.2 – Potência aparente, ativa e reativa	225
6.8.3 – Potência expressa em variável complexa	226
6.9 – Análise de circuitos trifásicos em corrente alternada	227
6.9.1 – Sistemas trifásicos equilibrados	228
6.9.2 – Grandezas de fase e de linha	230
6.9.3 – Cargas ligadas em Y e Δ	232
6.9.4 – Transformação de impedâncias Y e Δ	234
6.9.5 – Circuito monofásico equivalente	236

6.9.6 – Potências em sistemas trifásicos	240
6.9.7 – Medição de potência média em circuitos trifásicos utilizando o método dos dois wattímetros	243
6.10 – Introdução aos sistemas elétricos de potências	245
Exercícios propostos	248
Referências	245
7 Sistemas elétricos de corrente alternada trifásicos e monofásicos	255
7.1 – Sistemas elétricos trifásicos	257
7.2 – A importância do aterramento no sistema elétrico	263
7.3 – O padrão elétrico brasileiro para tomadas	265
7.4 – Cargas monofásicas, trifásicas	266
7.5 – Condutores elétricos	267
7.6 – Dispositivos de proteção	270
7.7 – Dispositivos de comandos – chaves eletromagnéticas e chaves de estado sólido	272
7.8 – Interruptores	274
7.9 – Introdução aos esquemas de projetos elétricos prediais	276
7.10 – Geração concentrada <i>versus</i> geração distribuída	280
7.11 – Considerações sobre segurança em sistemas elétricos de baixa tensão ...	280
Exercícios propostos	283
Referências	284
8 Introdução às cargas elétricas domésticas	286
8.1 – Lâmpadas elétricas	286
8.1.1 – Lâmpadas incandescentes – a incandescência sem fusão	286
8.1.2 – Lâmpadas de descarga	287
8.1.3 – Lâmpadas a LED	292
8.2 – Ferro de passar	293
8.3 – Chuveiro elétrico	294
8.4 – Condicionador de ar	295
8.5 – Sistema de resfriamento nos bebedouros elétricos residenciais	300
Referências	303

9 Máquinas elétricas rotativas	304
9.1 – Classificação das máquinas rotativas	304
9.2 – Conceitos preliminares	305
9.2.1 – Conceitos de mecânica aplicados às máquinas elétricas	308
9.2.1.1 – Posição angular	308
9.2.1.2 – Velocidade angular	309
9.2.1.3 – Conjugado mecânico	310
9.2.1.4 – Perdas mecânicas (perdas rotacionais)	311
9.3 – Partes construtivas das máquinas elétricas rotativas e seus materiais condutores e isolantes	311
9.3.1 – O condutor das bobinas	312
9.3.2 – Isolantes	313
9.3.3 – Verniz eletro isolante	314
9.3.4 – Soldas	315
9.4 – Máquinas de corrente contínua	316
9.4.1 – Bobinas do rotor	317
9.4.2 – Comutadores mecânicos – na máquina funcionando como gerador	318
9.4.3 – Comutadores mecânicos – na máquina funcionando como motor	320
9.5 – Máquinas de indução	322
9.5.1 – O campo girante e princípios de funcionamento	322
9.5.2 – Rotor de gaiola de esquilo e rotor bobinado	326
9.5.3 – O escorregamento	326
9.5.4 – Esquemas de enrolamento dos motores de indução	328
9.5.5 – Placas de identificação das máquinas de indução	329
9.5.6 – Motor de indução monofásico	332
9.5.6.1 – Motor com capacitor na partida	332
9.5.6.2 – Motor com capacitor permanente	334
9.5.6.3 – Motor sem capacitor (<i>Split-Phase</i>)	334
9.6 – Máquinas síncronas	335
9.6.1 – Classificação das máquinas síncronas	335
9.6.1.1 – Máquina síncrona de rotor cilíndrico	336
9.6.1.2 – Máquina síncrona de rotor de polo saliente	337
9.6.1.3 – Máquina síncrona de rotor de ímã permanente	338
Referências	340

10 Qualidade de energia – conceitos básicos	341
10.1 – Afundamento de tensão	341
10.2 – Interrupções de curta duração	342
10.3 – Interrupções de longa duração	343
10.4 – Elevação de tensão de curta duração	344
10.5 – Distorção harmônica	344
10.6 – Picos de tensão esparsos (<i>voltage spikes</i>)	345
10.7 – Flutuação de tensão ou corrente	346
10.8 – Ruídos de tensão ou corrente	346
10.9 – Desequilíbrios de tensão ou corrente	347
10.10 – Componentes CC (Offset) em sinais CA	348
10.11 – Inter harmônicos	349
10.12 – Fator de potência	350
10.13 – Componentes harmônicas – causas e efeitos	350
10.14 – Normas dedicadas à qualidade de energia	358
10.15 – Soluções dedicadas à qualidade de energia	359
10.15.1 – Soluções com elementos discretos (circuitos passivos)	360
10.15.1.1 – Bancos de capacitores para correção do fator de potência	360
10.15.1.2 – Instalação de reatores de dissintonia e filtros sintonizados	362
10.15.2 – Soluções com elementos de estado sólidos (circuitos ativos)	363
10.15.2.1 – Filtros ativos de potência em paralelo	363
Referências	366
11 Aplicações dos circuitos elétricos de corrente contínua	367
11.1 – Introdução aos circuitos elétricos de corrente contínua automotivo	367
11.1.1 – Sistema de iluminação	368
11.1.2 – Sistema de partida do veículo	372
11.1.3 – Sistema de controle da injeção eletrônica e ignição	373
11.1.4 – Sistema de arrefecimento do motor	377
11.1.5 – Sistema de carregamento de baterias	379
11.2 – Introdução a sistemas elétricos de corrente contínua para segurança patrimonial	380
Referências	385

12 Fontes primárias de geração de energia elétrica e sustentabilidade	386
12.1 – Fontes não renováveis	287
12.1.1 – Petróleo e seus derivados	287
12.1.2 – Energia nuclear	391
12.1.3 – Carvão mineral	393
12.2 – Fontes renováveis	394
12.2.1 – Hidreletricidade	395
12.2.2 – Energia eólica	397
12.2.3 – Energia solar	401
12.2.4 – Biomassas	409
12.2.5 – Biodiesel	413
12.2.6 – Energia das marés – Maré motriz	414
12.3 – Célula de combustível de hidrogênio – impacto ambiental zero	415
12.4 – Eficiência energética e conservação de energia	417
Exercícios Propostos	419
Referências	420
Anexo 1 – Símbolos elétricos utilizados no escopo deste livro	422
Anexo 2 – Tabela de fio de cobre esmaltado	424
Anexo 3 – Ferramentas utilizadas em manutenção de sistemas elétricos	426
Anexo 4 – Esquema planificado motor monofásico de indução	428
Anexo 5 – Esquema planificado motor trifásico de indução – 1	429
Anexo 6 – Esquema planificado motor trifásico de indução – 2	430
SOBRE OS AUTORES	431

Introdução

Se há uma verdade dentro da academia é que os paradigmas do processo de ensino e aprendizagem não são estáticos. Tal processo é dinâmico e sofreu mudanças enormes nas últimas décadas. A internet, por exemplo, teve um impacto enorme sobre o ambiente desse processo, fazendo com que surjam novas facilidades mas também novas dificuldades. Não são, porém, só as relações de ensino e aprendizagem que estão em constante mudança, a própria ciência tecnológica está em constante transformação. Por exemplo, as variações climáticas acirraram a discussão da geração de energia sustentável nos últimos anos, provocando a criação de novas tecnologias de geração energética de baixo impacto ambiental. A preocupação com a sustentabilidade fez surgir também a preocupação com um consumo de energia mais eficiente por parte dos consumidores domésticos e industriais. Essas mudanças influenciam toda dinâmica da ciência tecnológica e os seus diversos atores: pesquisadores, indústria, comércio, professores e alunos. Além do mais, a dinâmica complexa da ciência tecnológica faz com que, cada vez mais, os acadêmicos não se vejam mais como coadjuvantes, ou seja, participantes de um processo sobre o qual só repassam conhecimentos desconexos do mundo. Quem não já ouviu ou leu as notícias de jornais do tipo “aluno descobre um novo equipamento capaz de...”. Este é o aluno de hoje! Ele não quer somente entender a lei de Ohm, ele quer projetar um aquecedor. Ele não quer somente entender a lei de Faraday, mas quer construir um gerador. É neste ambiente, de constante transformação, que se encontram os desafios para professores e educadores ligados ao ensino de ciência tecnológica. Como levar ao aluno o ensino de eletricidade e magnetismo básicos, de caráter muito abstrato, e ao mesmo tempo dar vazão à sua criatividade e ao seu ímpeto de construir com as próprias mãos? Como criar uma geração de técnicos que produza bens que solucionem problemas humanos, que gerem empregos, que gerem riquezas, que transformem a sociedade em que vivem? Essas são as perguntas que tentam conduzir este livro.

A prática traz a eficiência! Os exercícios, tanto de sala de aula quanto de casa, são importantes para os autores e para os educandos, pois ajudam na sedimentação do conhecimento. Além disso, auxiliam na formação de estratégias cognitivas de solução de problemas relativos aos assuntos enfocados. Por tais motivos, ao final da maioria das seções, há uma lista de exercícios de classe, que ajudam os professores na fixação do conhecimento, por parte dos alunos, em sala de aula. Ao final de todo capítulo, há listas de exercícios de casa, que os professores podem utilizar na íntegra ou parcialmente para desenvolver seus próprios exercícios. As discussões em grupo são muito importantes e fazem parte de uma categoria de exercícios que está muito presente no livro. Essas discussões abertas permitem aos alunos não só procurarem conexões dos conhecimentos com a sua realidade como também vislumbrar soluções que mudem essa realidade.

O livro possui três grandes norteadores que o conduzem aos seus objetivos:

I – Multidisciplinaridade

Apesar de a especialização dominar a formação técnica, todo projeto de sistema possui elementos de várias disciplinas. Seja projeto elétrico, mecânico, ou um produto a ser fabricado, o técnico trabalhará executando ou mantendo tais projetos operando de forma eficaz. Assim, o futuro técnico irá encontrar ambientes com características multidisciplinares. A eletricidade se integra à física, à química, à matemática, à história e a outras disciplinas. O

livro tem este viés por entender ser, a percepção de multidisciplinaridade, uma característica importante para a formação de um técnico de alta qualificação.

II – Sustentabilidade

A sustentabilidade é outro pilar importante discutido e apresentado neste livro, visto que o elemento principal de seu estudo é a energia. Como esta energia elétrica foi gerada? Qual o impacto ambiental de um sistema de geração? As respostas a tais perguntas são importantes para o futuro técnico. Sustentabilidade está relacionada ao direito à qualidade de vida da geração atual e das futuras. Formar um técnico com essa consciência é um dos objetivos do livro e, sem dúvida, uma questão de responsabilidade das instituições de ensino.

III – Ancoragem no cotidiano

Dentro do possível, os conhecimentos trabalhados são ancorados em produtos e práticas do dia a dia dos técnicos – por exemplo, a relação do magnetismo com um alto-falante, com um relé, relação dos circuitos CC com circuitos elétricos automotivos e outras. Essa ligação dos conhecimentos trabalhados com seu cotidiano mostra que eletricidade e magnetismo não são conhecimentos desvinculados do nosso dia a dia, cada vez mais tecnológico.

O livro segue uma sequência didática e os conceitos são construídos ao longo de doze capítulos. É recomendável seguir a sequência dos capítulos, com todo respeito à autonomia dos professores, pois são eles, juntamente com os alunos, os componentes principais do processo de ensino e aprendizagem.

O primeiro capítulo é dedicado à eletrostática. Os conceitos de carga elétrica e campo elétrico são construídos nesse capítulo. A história é seu elemento principal, pois foi por meio da eletrostática que o homem teve seu primeiro contato com a eletricidade.

O segundo capítulo aborda grandezas e instrumentos de medição. As grandezas ligadas à eletricidade, bem como os instrumentos e procedimentos de medição, são importantíssimas para a prática dos futuros técnicos. Entender e ter noção do dimensionamento das grandezas elétricas tornam sua prática mais eficiente. Ler uma placa de identificação de uma máquina elétrica, ler um manual técnico, ler um projeto elétrico e outras ações praticadas nos sistemas de produção podem ser um exercício doloroso e vazio para os técnicos que não tenham noção das grandezas elétricas. Os procedimentos de medição são muito presentes na execução e manutenção de projetos elétricos, sejam prediais, sejam industriais, portanto, é necessário apresentá-los de forma didática, como nos propusemos a fazer neste capítulo. Algumas grandezas não elétricas são explicadas por serem de extrema importância para a prática da execução e manutenção dos sistemas elétricos, como por exemplo, temperatura e espessura.

O terceiro capítulo enfatiza a introdução ao magnetismo, cuja história é abordada buscando-se mostrar sua importância para o desenvolvimento tecnológico. O estudo das leis de Faraday e de Ampère são fundamentais para o entendimento dos circuitos magnéticos e dos processos de conversão eletromecânicos de energia. Vários exemplos de aplicações do magnetismo são abordados nesse capítulo.

O quarto capítulo é dedicado a medidas elétricas. É realizado o estudo dos diversos tipos de medidores, desde os mais antigos até os mais atuais. Definições de erros, médias e medidas de dispersão são as bases para todo o processo de medição e são enfocadas nesse capítulo.

No Capítulo 5, estudamos os circuitos em corrente contínua e suas topologias. As leis de Kirchhoff para as correntes e tensões e os teoremas de Thévenin e Norton são aqui abordados, conhecimentos fundamentais no desenvolvimento das estratégias cognitivas para

resolução dos circuitos. A modelagem de circuitos em correntes de malhas e tensões de nós são abordados de uma forma simples, sempre a partir de uma ancoragem em problemas concretos.

No sexto capítulo, tratamos dos circuitos de corrente alternada em regime permanente. As noções de reatância e impedâncias assim como as estratégias cognitivas para resolução de circuitos de corrente alternada em regime permanente, utilizando-se as ferramentas da representação fasorial, também são nesse capítulo apresentadas.

Noções de sistemas elétricos em corrente alternada monofásico e trifásico são tratadas no sétimo capítulo. Os componentes do nosso sistema elétrico, desde a geração até os consumidores finais, são explanados e tratados da forma mais elementar possível. Conceitos importantes são abordados, de forma introdutória, a exemplo de aterramentos, dispositivos de proteção, condutores e interruptores. Tais conceitos são abordados de forma atual e com linguagem simples e acessível. Este capítulo é uma excelente introdução às disciplinas de projetos elétricos, instalações elétricas e manutenção elétrica.

No oitavo capítulo, é realizada uma introdução às cargas elétricas domésticas mais comuns, abordando-se, de forma atual, seu princípio de funcionamento e principais características. Também são estudados nessa parte conceitos como lâmpadas a LED, lâmpadas de descarga eletrônica, condicionadores de ar, chuveiros elétricos e outras cargas residenciais.

O nono capítulo é dedicado ao estudo introdutório das máquinas elétricas rotativas. São abordados neste capítulo o princípio de funcionamento e as partes constitutivas das máquinas elétricas mais utilizadas atualmente: as máquinas de indução trifásica e monofásica e as máquinas síncronas. As máquinas de corrente contínua são descritas por servirem de base para o estudo de outras, além de existirem ainda exemplares dentro dos processos produtivos e estarem presentes em algumas máquinas ferramentas. Fotos das partes construtivas de máquinas reais, que operam dentro de processos produtivos, são utilizadas como um recurso para aproximar o leitor da realidade.

No décimo capítulo é salientada a qualidade de energia. Os autores acreditam ser de fundamental importância o estudo da qualidade de energia dos sistemas elétricos de corrente alternada, de forma introdutória, por dois motivos: são problemas que aumentam com o passar do tempo e são complementos ao estudo dos sistemas elétricos CA, desenvolvido no Capítulo 7. A qualidade de energia está ligada à eficiência do sistema elétrico. Os principais problemas que contribuem para reduzir a eficiência do sistema elétrico CA são descritos nas suas causas e efeitos. Além da descrição de tais problemas, são também enfatizadas as tecnologias para sua redução.

O capítulo décimo primeiro traz dois campos de aplicação da eletricidade em corrente contínua: nos veículos automotores e nos sistemas de segurança patrimonial. No primeiro, são apresentados os conceitos de automação e seus componentes (sensores, atuadores e computador). São descritos os principais sistemas físicos que constituem os atuais veículos a combustão. Sistemas de iluminação e sinalização, sistemas de arrefecimento do motor, sistemas de injeção eletrônica e outros são descritos de forma introdutória. Já os sistemas de segurança patrimonial são sistemas de alarmes que visam à proteção de áreas físicas contra violações criminosas. Esses dois exemplos permitem ao leitor a ligação dos conhecimentos trabalhados ao cotidiano, dando, assim, uma visão menos abstrata do conhecimento da eletricidade e magnetismo.

A sustentabilidade é tratada no capítulo décimo segundo, no qual são discutidas as diversas fontes primárias de obtenção de energia elétrica, tanto não renováveis quanto renováveis, e seus impactos no meio ambiente. Não só a geração de energia é tratada neste

capítulo; sua utilização consciente, atitudes para sua conservação e estudos sobre eficiência energética estão também aqui presentes. Sustentabilidade trata do respeito ao direito à qualidade de vida desta e das futuras gerações. O impacto ambiental da geração e da utilização de energia elétrica não pode comprometer as condições de vida. Desenvolver a cultura da sustentabilidade é, portanto, contribuir para a formação de pessoas mais conscientes desses problemas, e, conseqüentemente, para um futuro mais comprometido com a vida no planeta.

Todos os tópicos abordados neste livro não necessariamente compõem o programa das disciplinas de eletricidade básica dos cursos técnicos. Esses tópicos são, entretanto, elementos introdutórios para as futuras disciplinas que compõem os cursos de nível técnico. Além do mais, alguns aspectos abordados, como sustentabilidade, eficiência energética, conservação de energia e a própria história do desenvolvimento da eletricidade, trazem uma contribuição mais sólida à formação do futuro técnico, pois perpassam de forma transversal os conhecimentos contidos nos programas convencionais.

O sistema métrico padrão do livro é o SI (Sistema Internacional de Unidades), porém algumas unidades em CGS (Centímetro-Grama-Segundo), ainda em uso, são trazidos à tona como enriquecimento didático.

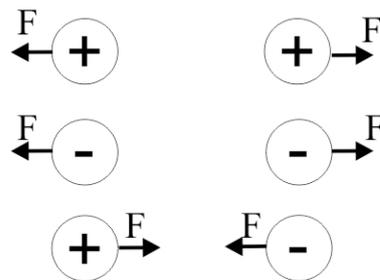
Este livro aborda a eletricidade e o magnetismo, dando uma profunda atenção às leis que regem essas ciências e aos homens que construíram tais ciências ao longo do tempo. O livro mostra ao aluno que aquilo que ele está estudando é uma criação humana, construída por pessoas como ele.

Os autores esperam que este livro ajude a construir uma base sólida para os estudantes e seja uma contribuição significativa para a prática dos professores.

1 Eletrostática

A Eletrostática estuda os fenômenos relativos às cargas elétricas estáticas; em contrapartida, a eletrodinâmica é o estudo das cargas elétricas em movimento. As cargas elétricas podem ser positivas (+) ou negativas (-), uma anulando o efeito da outra. Esta noção de cargas elétricas duais foi observada por Alessandro Volta, no final do século XVIII. Se existe um equilíbrio entre as negativas e positivas, o efeito dessas cargas é nulo. Na realidade, hoje se sabe que essas cargas elétricas são resultado da interação entre prótons e elétrons em nível atômico. Por convenção, o elétron é uma carga negativa e o próton é uma carga positiva. Alguns materiais possuem a capacidade de compartilhar elétrons, perder e ganhar elétrons, se tornando eletricamente positivos ou negativos. A experiência mais comum para observar este fenômeno é friccionar um bastão de vidro em uma flanela de seda. A flanela torna o vidro carregado eletricamente, permitindo atrair pedaços de papel.

Figura 1.1 – As forças em cargas elétricas entre as cargas



A primeira observação que se faz em estudo com eletricidade é que as cargas elétricas produzem força. De fato, cargas elétricas iguais se repelem e cargas diferentes se atraem, como mostrado na Figura 1.1. No sistema SI, as cargas elétricas possuem a dimensão de coulomb. A carga elétrica elementar, ou seja, de um elétron ou de um próton, é aproximadamente $e = 1,6021765 \times 10^{-19} \text{C}$. Dessa forma, precisa-se de $0,624151 \times 10^{19}$ de elétrons ou prótons para se ter 1 coulomb.

A possibilidade de um bastão eletrizado atrair pedaços de papéis implica força de atração, ou presença de um campo, associado a uma área no espaço, em que se pode verificar esses fenômenos de atração e repulsão, como um campo semelhante ao campo gravitacional em que as coisas são atraídas para o solo. Daí nasceu a noção de campo elétrico, que é uma região do espaço onde é possível observar a ação de força elétrica. Campo elétrico é um campo vetorial. Em cada ponto do espaço existe um vetor associado a, com módulo e sentido. O módulo do campo se torna mais fraco à medida que se afasta das cargas que o originaram. O módulo do campo elétrico, numa carga puntiforme, numa distância d , é dado por (1.2) – seu aspecto vetorial é mostrado na Figura 1.2. A unidade de campo elétrico no sistema SI (Sistema Internacional) é o *newton/coulomb* ou *volts/m*.

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon d^2} \quad (1.1)$$

A constante ϵ é a permissividade do meio.

No vácuo, a permissividade é $\epsilon_0 = 8,85418781 \times 10^{-12} \text{C}^2 \text{N}^{-1} \text{m}^{-2}$.

CARGA ELÉTRICA

Unidade de medida	➡	coulomb (C)
Submúltiplos usuais	➡	milicoulomb (mC), microcoulomb (μC)
Relações	➡	$1 \text{ C} = 10^3 \text{ mC} = 10^6 \mu\text{C}$

É comum utilizar a permissividade do meio em relação à do vácuo, como mostrado em (1.2). Dessa forma a permissividade relativa mostra quantas vezes a permissividade do meio é maior que a do vácuo. A Tabela 1.1 mostra a permissividade relativa de alguns materiais dielétricos.

$$\varepsilon = \varepsilon_r \varepsilon_0 \quad (1.2)$$

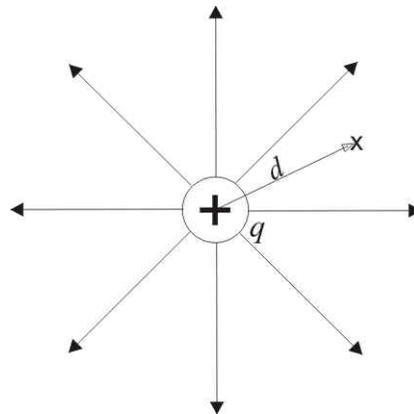
Tabela 1.1 – Permissividade relativa de alguns materiais

Material	Permissividade relativa ε_r
Ar	1,0006
Vidro	3,5 a 7
Papel	3,85
Mica	4,5
Diamante	5,5 a 10
Grafite	10 a 15
Água a 20 °C	80
Água a 100 °C	55,3
Água a 200 °C	34,5

A força elétrica de uma carga q num ponto onde o campo é E pode ser expressa por (1.3). Esta é a representação matemática da lei de Coulomb. Esta lei prega que “a força entre duas cargas é proporcional ao valor das duas cargas e inversamente proporcional ao quadrado da distância entre as duas”. Charles Augustin Coulomb (1736-1804) era um cientista francês e sua lei foi publicada em 1785. É interessante sua comparação com a força gravitacional. A massa está para a carga e o campo elétrico está para o campo gravitacional. O campo elétrico é criado pelas cargas elétricas e o campo gravitacional é criado pelas massas dos corpos. A constante eletrostática é comparável à constante gravitacional.

Utilizam-se as linhas de campo para mapear um campo vetorial no espaço. Por exemplo, as linhas de campo saem de uma carga positiva, como é mostrado na Figura 1.2. As linhas de campo chegam numa carga negativa.

Figura 1.2 – Campo elétrico numa carga puntiforme

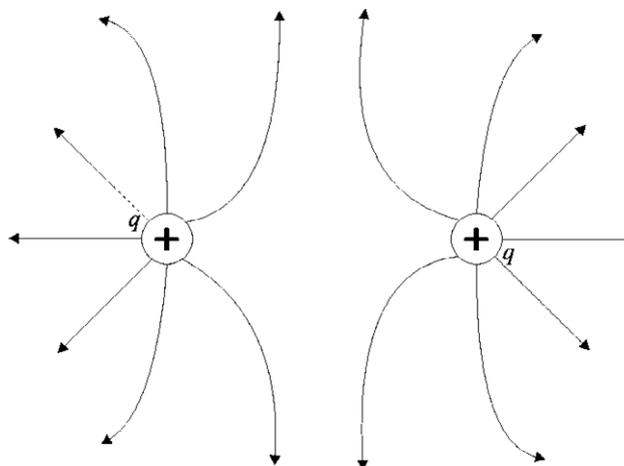


$$F = Eq = \frac{Qq}{4\pi\epsilon d^2} \quad (1.3)$$

1.1 Configuração de campo elétrico devido a várias cargas

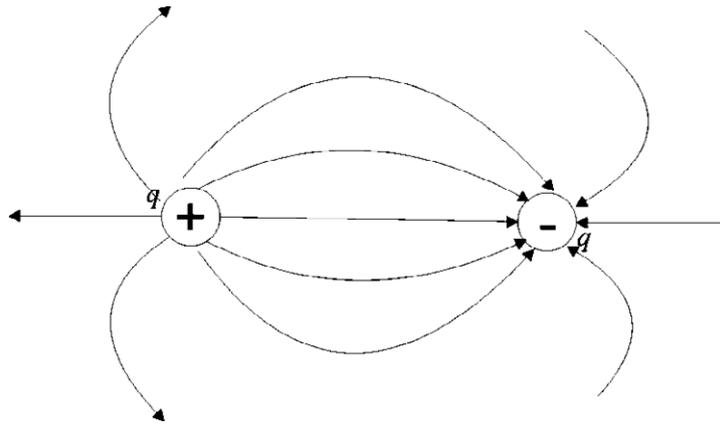
O campo elétrico é uma grandeza vetorial como já foi mencionado. O campo, num ponto do espaço, devido à presença de várias cargas, é a resultante vetorial dos campos originados por essas cargas. Na Figura 1.3, é mostrada a configuração das linhas de campo de duas cargas positivas. Observe que o campo elétrico, num ponto central x , equidistante das cargas, é nulo.

Figura 1.3 – Configuração do campo elétrico de duas cargas de mesma polaridade positiva



Na Figura 1.4, é mostrada a configuração das linhas de campo de duas cargas de polaridades opostas. Observe a concentração maior de linhas de campo na região central. Se abandonássemos uma carga positiva entre as duas cargas e o meio permitisse sua movimentação, a carga seria repelida pela positiva e atraída pela negativa, movimentando-se de um ponto ao outro. Em outras palavras, existe uma capacidade intrínseca de movimentação das cargas elétricas nessa região do espaço, uma capacidade de realização de trabalho na movimentação dessas cargas. Existe um potencial elétrico disponível entre dois pontos.

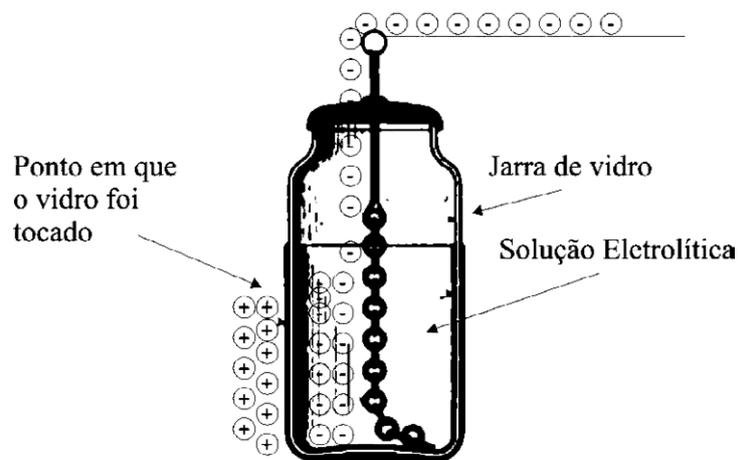
Figura 1.4 – Configuração do campo elétrico de duas cargas de polaridades opostas



1.2 Um pouco de história

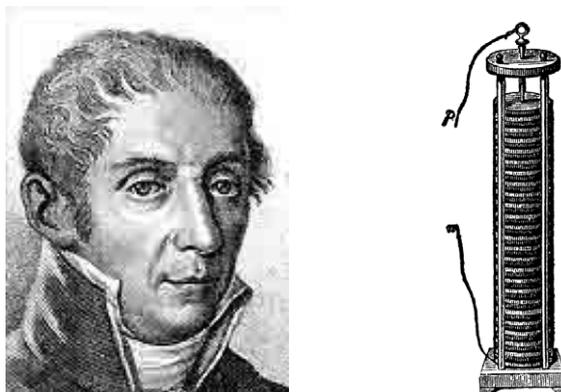
A primeira máquina destinada a gerar eletricidade estática é atribuída a Francis Hauksbee por volta de 1705. Hauksbee era o chefe de demonstração da real sociedade de Londres na época de Isaac Newton. O próprio Hauksbee não entendeu muito bem o comportamento das cargas elétricas. Foi o holandês Pieter van Musschenbroek, especificamente da cidade de Leiden na Holanda, que trabalhou na possibilidade de acumular cargas elétricas. Musschenbroek, utilizando a máquina de Hauksbee, inseriu um terminal eletrizado num fluido dentro de uma garrafa de vidro, conforme mostra a Figura 1.5. Esse procedimento não garantia, contudo, o acúmulo de cargas, mesmo que tentasse utilizar outros materiais além da água. Um pequeno acidente, porém, mudou tudo. Musschenbroek tentou acumular cargas segurando a garrafa de vidro. Sua mão passou a fornecer as cargas de polaridade positiva e, dentro da garrafa, as de polaridade negativa, providas, por sua vez, pela máquina de Hauksbee. Quando Musschenbroek tocou nos terminais da garrafa, recebeu um choque tão forte que escreveu no seu diário: “foi uma experiência muito dolorosa que aconselho a ninguém repetir...”. Musschenbroek a chamou de jarra de Leiden em homenagem a sua cidade. A jarra de Leiden é a precursora do moderno capacitor. Sua jarra era capaz de acumular cargas elétricas por horas e até por dias, exatamente como os capacitores atuais.

Figura 1.5 – Experimento de Musschenbroek



O que viria pela frente mudaria totalmente o conceito de eletrostática. Tudo isto acontecia no século XVIII, período em que ocorreu o movimento do Iluminismo. Esse movimento pregava a razão em detrimento das superstições e dos mitos. Antes a teologia exercia muita influência sobre os primeiros cientistas que observaram e tentaram dominar a eletricidade. Foi o Iluminismo que começou a contestar esta influência, remetendo tais fenômenos à categoria de fenômenos naturais passíveis de serem dominados pelo homem. Dois cientistas se destacaram nesta época: Luigi Aloise Galvani, anatomista de Bolonha, na Itália, e Alessandro Volta, mostrado na Figura 1.6, cientista da cidade de Pávia que, na época, fazia parte do Império Austríaco. A rivalidade entre ambos partia muito do ambiente em que cada um vivia. As cidades de Bolonha e Pávia eram cidades diferentes culturalmente. Enquanto Bolonha era mais conservadora, religiosa, Pávia tinha muito mais influência iluminista. Os dois cientistas eram também muito diferentes nas suas visões de mundo. O experimento que gerou toda polêmica era quanto aos músculos de um sapo que se retraía ao ser tocado com metais – zinco e cobre ao mesmo tempo. Galvani defendia a eletricidade animal, defendia também que todo corpo possuía uma eletricidade intrínseca, uma espécie de alma, que era capaz de se manifestar ao ser tocada por metais. Volta defendia que a eletricidade era um fenômeno natural e que sua origem não necessariamente estaria nos corpos biológicos. Para Volta, a perna do sapo se contraía pela ação da eletricidade externa, que circulava pelos nervos. Tal eletricidade externa era transportada pelos metais. O golpe mortal na teoria da eletricidade animal foi a criação, por Volta, da primeira pilha elétrica. Volta intercalou vários conjuntos de placas de cobre e de zinco e, no meio, papel embebido em solução eletrolítica, como, por exemplo, água e sal. Com isto somava o efeito de várias células geradoras de potencial elétrico. A pilha elétrica era um aparato eletroquímico sem a presença de um corpo orgânico. Era um sistema capaz de gerar um potencial elétrico a partir de reação química. Sem dúvida que a desmistificação da eletricidade por Volta foi um dos episódios mais marcantes da ciência. A pilha elétrica foi além de uma grande descoberta, ela marca uma separação entre a ciência e a teologia. A descoberta da pilha elétrica aponta para a necessidade de o cientista observar com imparcialidade os fenômenos naturais. Em homenagem a Alessandro Volta, a unidade de potencial elétrico leva seu nome, o volt.

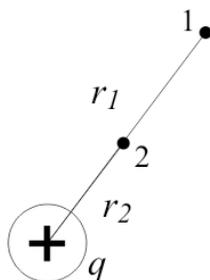
Figura 1.6 – Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta (1745-1827) e sua pilha



1.3 Potencial elétrico

O potencial elétrico entre dois pontos no interior de um campo elétrico está relacionado à quantidade de energia necessária para movimentar uma carga elétrica de um ponto a outro. A definição do potencial elétrico entre dois pontos é a quantidade de energia, por unidade de carga, para transportar a carga entre esses dois pontos. A unidade é *joules/coulomb* ou *volts*. Assim, 1,0 *volt* de potencial entre dois pontos é quando se necessita de 1,0 *joule* para transportar uma carga de 1 *coulomb* entre esses dois pontos. O potencial elétrico possui característica escalar, ao contrário do campo elétrico que é um ente vetorial. Existe a definição do potencial de um ponto em relação a uma referência no infinito. Este potencial está relacionado à energia necessária para movimentar uma carga do infinito até este ponto. O potencial de um ponto j devido a uma carga puntiforme q , a uma distância r_j , em relação ao infinito é expresso por (1.4). Na Figura 1.7, o potencial no ponto 2 é maior que no ponto 1, ou seja, $v_2 > v_1$. É de se esperar que uma carga positiva abandonada no ponto 2 esteja sujeita a uma força de repulsão maior do que se fosse abandonada no ponto 1. As cargas positivas tendem a ir de um potencial maior para um menor, e as cargas negativas, de um potencial menor para um maior.

$$v_j = \frac{q}{4\pi\epsilon r_j} \quad (1.4)$$

Figura 1.7 – Dois pontos a distâncias r_1 e r_2 de uma carga puntiforme

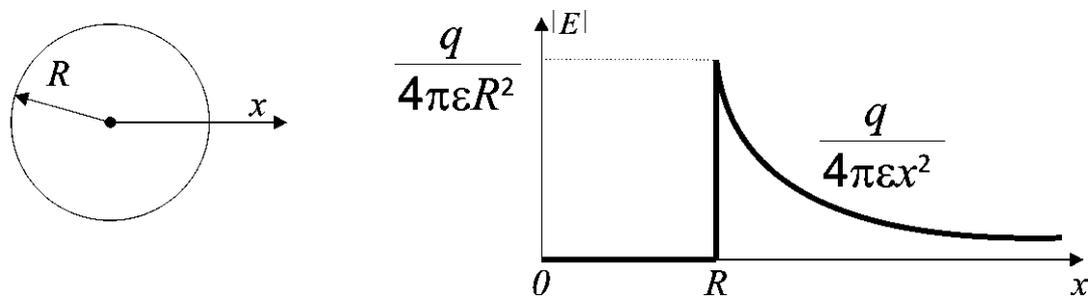
POTENCIAL ELÉTRICO

Unidade de medida	→	volt (V)
Submúltiplos usuais	→	kilovolt (kV) milivolt (mV) microvolt (μV)
Relações	→	$1 \text{ C} = 10^{-3} \text{ kV} = 10^3 \text{ mV} = 10^6 \mu\text{V}$

As cargas elétricas se deslocam em relação a dois potenciais diferentes, dependendo do meio. Se o meio conduz as cargas, o meio é chamado de condutor. Se o meio não conduz as cargas, o meio é chamado de isolante. O meio influencia o próprio potencial, a partir da sua permissividade, e influencia a movimentação das cargas.

Uma das importantes características do campo elétrico é a de ser nulo dentro de uma superfície fechada condutora, com cargas elétricas. Numa superfície fechada condutora, as cargas da superfície se repelirão de tal forma que o conjunto das cargas ocupará o máximo dessa superfície. Qualquer ponto no interior da superfície possuirá um campo elétrico resultante nulo, devido ao efeito das várias cargas. Dessa forma, se não houver cargas no interior da superfície fechada condutora, o campo elétrico no seu interior é nulo. Isto é um caso particular da lei de Gauss, que afirma que **“o fluxo das linhas de campo elétrico numa superfície fechada é proporcional à carga líquida no seu interior”**. O comportamento do campo elétrico para uma esfera condutora de raio R , com uma carga q na sua superfície, ao longo de uma reta distante do centro da esfera, pode ser vista na Figura 1.8.

Figura 1.8 – Comportamento do campo elétrico dentro de uma esfera condutora



Se o campo elétrico é constante dentro da esfera, isso implica que todos os pontos dentro da esfera estão no mesmo potencial, iguais ao da superfície. Essa é uma importante característica associada à lei de Gauss. Esse princípio é utilizado para proteger componentes eletrônicos sensíveis ao deslocamento de cargas elétricas. É sempre bom lembrar que, quando se compram componentes eletrônicos, o saco plástico revestido de metal envolvendo esses componentes oferece uma proteção eletrostática. O mesmo efeito é encontrado na gaiola de Faraday, proposto por Michael Faraday (1791-1867) por volta de 1836. A gaiola de Faraday é constituída de um invólucro metálico em que, seja qual for a presença de cargas elétricas na superfície ou fora dela, dentro do invólucro o campo elétrico é sempre nulo; em outras palavras, o potencial dentro da esfera é constante, não havendo, assim, movimentação de cargas no interior.

Johann Carl Friedrich Gauss (1777-1855)

Cientista alemão e um dos mais influentes, com muitas contribuições na astronomia, geometria, álgebra, estatística. É conhecido pela passagem de uma pergunta que seu professor lhe fez aos dez anos de idade: “Qual a soma de todos os números de 0 a 100?” O menino Gauss respondeu quase instantaneamente: “5050”. Que menino danado! Tinha descoberto a progressão aritmética!



1.4 Rigidez dielétrica

Já vimos que os materiais podem ser condutores ou não condutores de cargas elétricas. Isso é uma característica intrínseca do material. Isolantes, condutores e semicondutores serão abordados com mais detalhe no Capítulo 2.

Os materiais isolantes possuem a característica de dificultar o deslocamento de cargas elétricas. O material plástico, por exemplo, com o qual são fabricados os cabos dos alicates, destinados à manutenção elétrica, possui características isolantes que impedem que o usuário experimente choque, em caso de contato com as partes metálicas da ferramenta. Os materiais isolantes, no entanto, possuem um limite para desempenhar essa característica. Esse limite é conhecido por rigidez dielétrica. **Rigidez dielétrica é o máximo valor de campo elétrico que preserva as características isolantes do material.** Acima desse valor, o material se torna condutor. Esse fenômeno é conhecido por efeito avalanche. O campo elétrico se torna tão forte que acelera os elétrons livres, provenientes de radiações naturais ou artificiais no planeta. Esses elétrons livres acelerados colidem com as moléculas do material, liberando mais elétrons, criando um efeito avalanche, ou seja, tornando o material condutor subitamente. A rigidez dielétrica é uma importante característica do material e, de certa forma, dita a qualidade do isolante.

Um importante exemplo é o fluido isolante dos transformadores de distribuição comercial. Esse fluido se torna impuro à medida que envelhece, perdendo suas características isolantes. O teste de rigidez dielétrica do fluido é realizado para determinar um parâmetro quantitativo que aponte para a qualidade da isolação. Esse teste submete uma amostra do fluido a uma diferença de potencial crescente até a quebra da rigidez. À medida que o tempo de utilização do transformador aumenta, a rigidez dielétrica do fluido diminui, devido principalmente à presença de impurezas. Outro exemplo de quebra de rigidez dielétrica é o raio. No caso o ar é o isolante que possui suas características de isolação reduzidas abruptamente, dando origem a uma corrente muito alta, fluindo entre as nuvens ou entre a nuvem e a terra (ver Figura 1.9).

Figura 1.9 – Raio de uma nuvem para a terra



1.5 Do raio ao para-raio

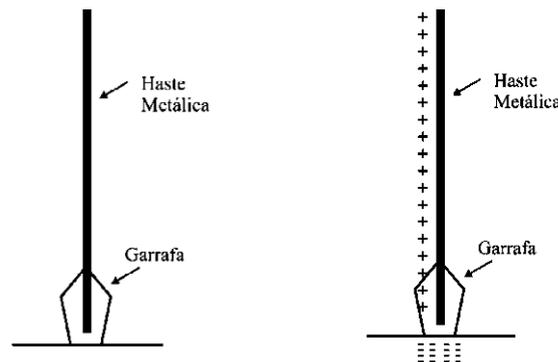
O raio e trovão sempre foram fenômenos ligados aos deuses. Na mitologia grega, Zeus aparece frequentemente com um raio nas mãos. Na mitologia nórdica, Thor é o deus do trovão. Em religiões africanas existem deuses que comandam raios e trovões. Essas interpretações desses fenômenos naturais revelam como o raio e trovão são associados aos deuses por causarem medo. De fato raios matam pessoas e animais, além de causarem falhas no sistema elétrico e de comunicação. O Brasil é um país com um número de descargas atmosféricas muito grande e, conseqüentemente, também o é a quantidade de acidentes fatais envolvendo raios. Mais de 100 mortes por ano foram constatadas no país nos últimos anos.

A desmistificação do raio e do trovão começa e termina com Benjamin Franklin. A jarra de Leiden ainda não tinha sido explicada por completo. Franklin foi o primeiro a propor a interpretação das cargas positivas e negativas para resolver o caso da jarra de Leiden, com a famosa comparação com uma conta bancária que pode estar com saldo negativo ou positivo. Acreditava que na natureza havia a mesma quantidade de cargas positivas e negativas. As duas anulavam o efeito uma da outra. Dessa forma, a base da eletrostática foi proposta por Franklin. O choque que se experimentava da jarra de Leiden era fruto do movimento das cargas elétricas pelo corpo, fluindo da terra, no intuito de anular o excesso de cargas na jarra. A faísca também era o movimento de cargas no espaço.

Benjamin Franklin propôs uma série de experiências que não foram totalmente realizadas. Entre elas a famosa pipa que voava durante uma tempestade. Foi em 1752, no entanto, na cidade de Marly Le Ville, que George Louis Leclerc realizou uma experiência, proposta por Franklin, que mudaria o rumo da compreensão humana sobre os raios e trovões. Na época, todos os franceses admiravam Franklin por sua postura política contra a coroa britânica, e George Louis Leclerc era um desses admiradores. Uma haste metálica de 12 metros de altura foi introduzida numa garrafa de vinho vazia, e posta ao ar livre, esperando uma tempestade com seus raios. A garrafa de vinho vazia era uma jarra de Leiden com o ar como dielétrico. A garrafa foi examinada após uma grande tempestade. Para a surpresa de todos, existiam cargas elétricas na haste. Tais cargas provocaram um choque num dos participantes do experimento quando este tocou a referida garrafa. A conclusão de que as

cargas da haste vieram das nuvens da tempestade e que eram cargas elétricas iguais àquelas criadas pelo homem na jarra de Leiden foi muito importante para ciência. O mesmo fenômeno atribuído aos deuses podia ser reproduzido em laboratório pelo homem. Na Figura 1.10 é mostrado o experimento antes e depois da tempestade. Esta deve ter sido a configuração de cargas depois da tempestade: uma pequena quantidade de cargas na terra era atraída pelas cargas da haste, mas não se anulavam devido à isolação do vidro e do ar.

Figura 1.10 – Experimento de George Louis Leclerc antes e depois da tempestade



O raio é uma quebra da rigidez dielétrica do espaço, fazendo com que as cargas negativas da parte de baixo das nuvens escoem subitamente para a terra. O processo de desequilíbrio das cargas elétricas acontece devido à movimentação das partículas de gelo, neve e água no interior das nuvens. A parte de baixo da nuvem tende a ficar carregada negativamente, enquanto a parte de cima carregada positivamente. O comportamento das cargas elétricas em meio a nuvens carregadas e seu efeito atrativo sobre as cargas elétricas na terra é mostrado na Figura 1.11. Tal comportamento pode ser entendido pelo método do espelhamento, abordado a seguir. Pode-se concluir que, quanto mais próxima a estrutura estiver das nuvens, maior o perigo de essa estrutura ser atingida por um raio. Assim, não é uma boa ideia ir para baixo de uma árvore em caso de tempestade.

O para-raio é um equipamento utilizado para proteger construções e pessoas contra descargas atmosféricas. A proposta de Benjamin Franklin era de uma haste não metálica com um captor com várias pontas metálicas na extremidade. Tal captor era ligado à terra através de um condutor. Tal proposta ainda é o para-raio mais eficiente e seguro. Seu esquema de ligação pode ser visto na Figura 1.12.

Existe a variante de para-raio que utiliza material radioativo surgido na segunda década do século XX. Na constituição física do para-raio radioativo, existe uma pequena quantidade de material radioativo no captor na extremidade de uma haste. Esse material radioativo ioniza o ar ao redor do captor que aumenta a probabilidade de captação de raio. O Amerício 241 é muito utilizado nos para-raios radioativos. No começo da década de 1960, o cientista alemão Muller Hillebrand provou, entretanto, que a presença desses materiais radioativos não adiciona nada em relação ao para-raio de Franklin, ou seja, os dois possuem a mesma eficiência. Desta forma, pela simplicidade, pelo baixo custo, segurança e eficiência, o para-raio de Franklin ainda é o mais popular.

Outra forma de proteção contra descargas atmosféricas é o anel equipotencial que deve ser ligado ao captor do para-raio, visto na Figura 1.13. Essa proteção é composta por uma malha que circula a extremidade de todos os andares da estrutura da construção civil,

formando uma gaiola de proteção contra as descargas e dividindo a corrente proveniente de uma descarga. Essa malha é aterrada em vários pontos. O objetivo desse tipo de malha é criar uma quase gaiola de Faraday de proteção. Teoricamente, o interior de um veículo, que possui uma estrutura metálica, oferece uma proteção de quase gaiola de Faraday contra os raios. A norma brasileira que trata de Sistemas de Proteção Contra Descargas Atmosféricas (SPDA) é a NBR-5419.

Figura 1.11 – Comportamento das cargas em meio a nuvens carregadas

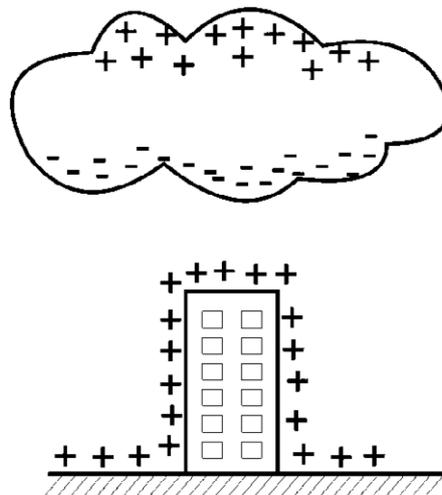


Figura 1.12 – Captor para-raio de Franklin de 4 pontas e esquema de ligação

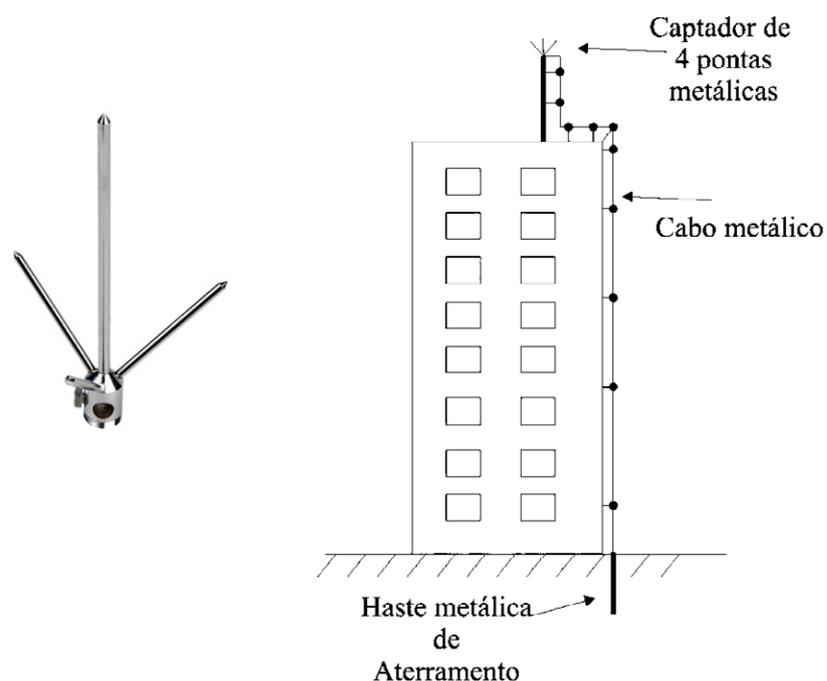
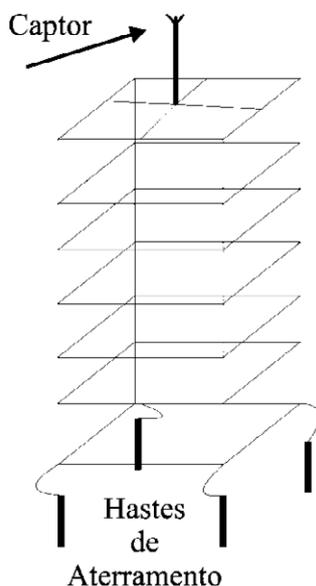


Figura 1.13 – Estrutura equipotencial para prédios de construção civil



Benjamim Franklin (1706-1790)

Cientista americano que se destacava não só pela ciência mas pelo pensamento democrático e libertário em relação ao julgo britânico. Nessa época os Estados Unidos ainda eram uma colônia britânica. A independência se deu em 1783, com assinatura do tratado de Paris. Franklin acreditava que o conhecimento científico era uma das coisas mais democráticas, pois estava à disposição da compreensão de todos e, ao mesmo tempo, libertava das interpretações míticas. Benjamim Franklin influenciou muito o pensamento americano. Em sua homenagem, a nota de 100 dólares americanos traz sua imagem.

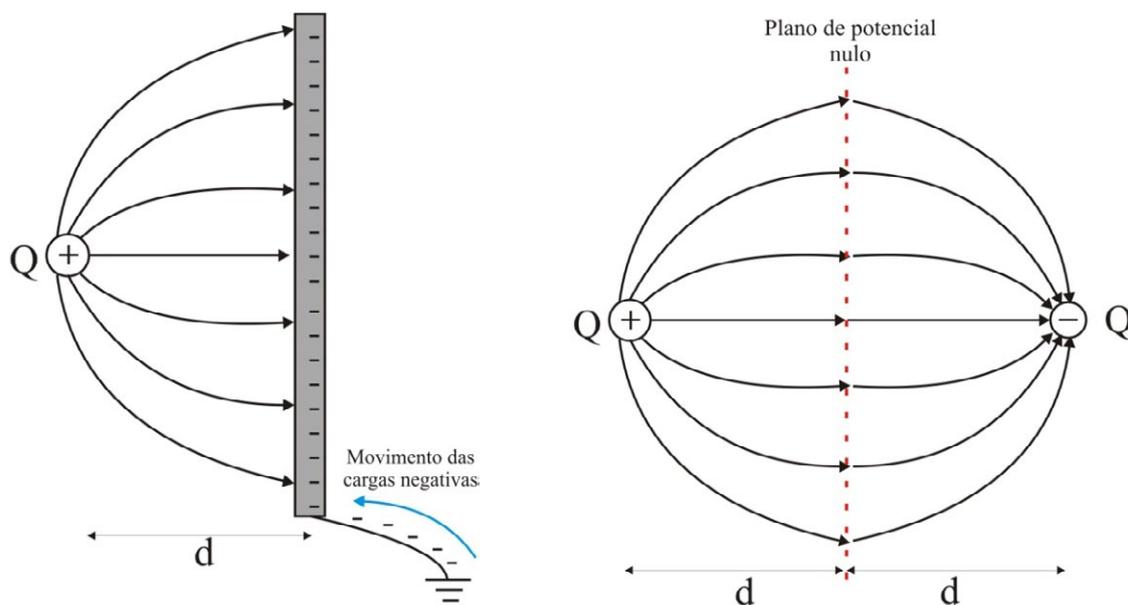


1.6 Método do espelhamento de cargas elétricas

Alguns problemas em eletrostática podem ser simplificados pelo método de espelhamento de cargas. O método de espelhamento de cargas consiste em substituir partes físicas do sistema por cargas elétricas sem alteração das características eletrostáticas do mesmo sistema. Um dos problemas clássicos que podem ser simplificados é o da carga elétrica próxima a um plano infinito condutor e aterrado, mostrado na Figura 1.14 (a). Essa configuração pode ser simplificada, sem perder suas características, pela configuração apresentada na Figura 1.14 (b); em outras palavras, por uma carga de mesma intensidade e de sinal contrário, posicionada de forma equidistante em relação ao plano. O plano de potencial

nulo é a mesma para os dois casos e representa a linha de simetria entre as duas cargas, no modelo simplificado. O plano de potencial nulo pode ser entendido pela expressão (1.4), em que tal plano é equidistante das duas cargas de sinais opostos, ou seja, dois potenciais de sinais opostos que se anulam no mesmo ponto. Quanto às forças presentes, o problema mostra que existe uma força de atração da carga positiva pelo plano aterrado, como se fosse uma força de atração de duas cargas iguais de sinais contrários, vista na configuração simplificada.

Figura 1.14 – (a) Configuração original; (b) Configuração simplificada



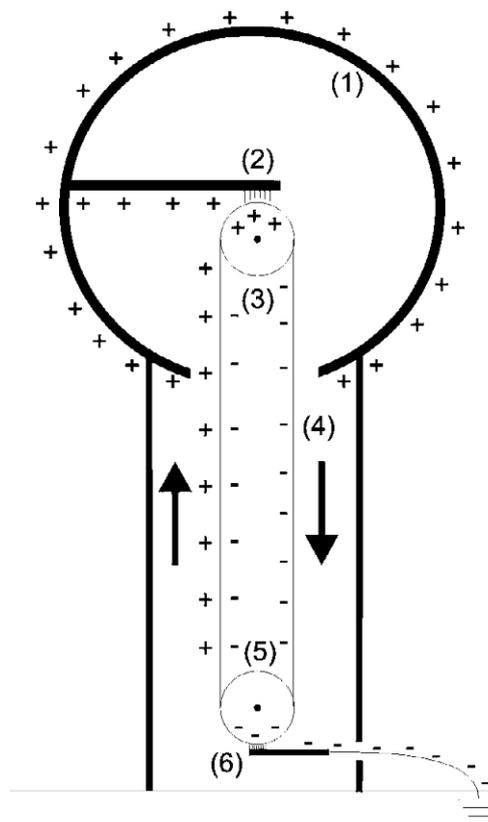
E se fossem várias cargas? Se há uma nuvem de cargas perto de um plano condutor e aterrado, haverá uma nuvem de cargas opostas espelhadas que promovem a atração para o plano. Este princípio da atração de uma carga por um plano condutor e aterrado é fundamental para entendimento do comportamento do raio proveniente de uma descarga atmosférica bem como na tecnologia de pintura por pulverização eletrostática.

1.7 Gerador de Van de Graaff

O gerador de Van de Graaff foi proposto pelo engenheiro americano Robert Jemisson van de Graaff (1901-1967) na segunda metade do século XX. O gerador é basicamente um separador de cargas elétricas, mostrado na Figura 1.15. É formado de uma esfera metálica (1), uma haste coletora metálica com uma escova na ponta (2), uma roldana de acrílico ou vidro (3), uma cinta (4), uma roldana metálica (5) e o coletor metálico com escova na ponta (6). À medida que a cinta gira, por ação de um motor, as cargas positivas se concentram na roldana superior e as negativas na roldana metálica. As duas roldanas devem estar isoladas. As escovas dos coletores são aproximadas. Devido à presença do campo elétrico nas proximidades das roldanas, o ar se torna ionizado, fazendo com que as cargas fluam pelos

coletores. Na esfera metálica (1), as cargas positivas se distribuem uniformemente na superfície. O coletor da roldana metálica leva as cargas contrárias para a terra ou para outra esfera metálica. Com isso é possível obter milhares de volts na esfera metálica. Observe que, no interior da esfera, o campo elétrico não é totalmente nulo, pois existem cargas elétricas em seu interior. Dessa forma, a haste metálica coletora (2), que está ligada à superfície externa, faz com que as cargas positivas no interior da esfera, as quais estão sob um potencial elétrico em relação à superfície, se desloquem para aquela superfície externa.

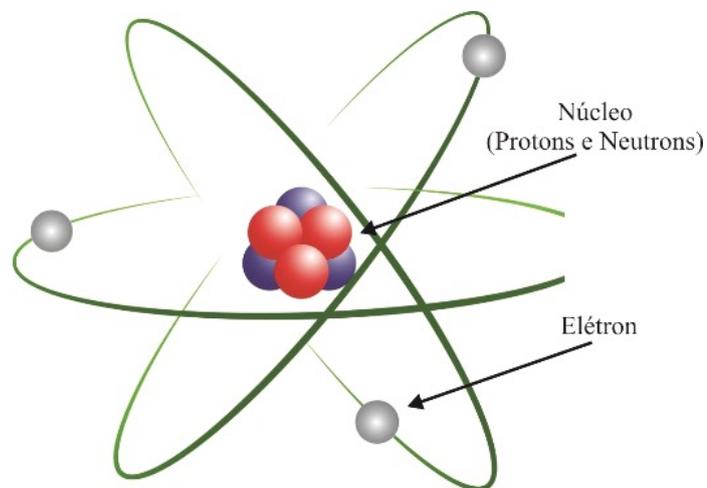
Figura 1.15 – Gerador de Van de Graaff



1.8 Eletricidade e a estrutura atômica

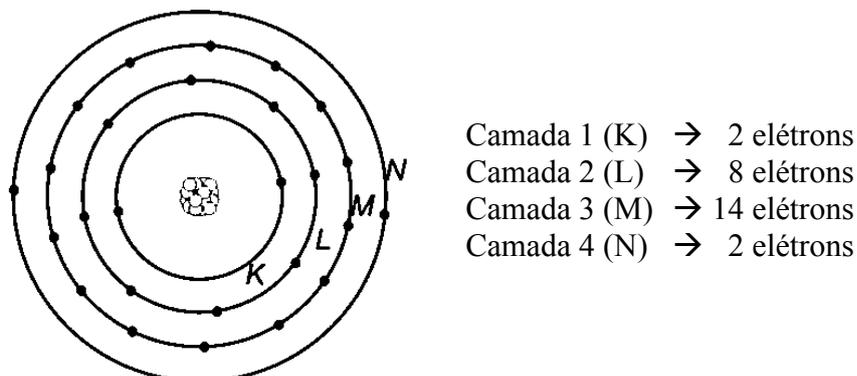
A energia elétrica é uma das formas de energia que podem ser utilizadas para diversos fins, como iluminar, aquecer, movimentar. Além disso, a energia elétrica pode ser armazenada, permitindo sua utilização no instante em que se deseja. O átomo, elemento que forma a matéria, e pode ser visto, no seu modelo simplificado, na Figura 1.16, possui partículas que têm características eletrostáticas diferentes. Tais partículas são conhecidas por elétrons, prótons e nêutrons. Os prótons e nêutrons se agrupam, formando o núcleo do átomo. Os elétrons estão dispersos numa nuvem ao redor do núcleo do átomo.

Figura 1.16 – Modelo de Átomo



Por convenção, os elétrons possuem carga elétrica negativa, os prótons carga positiva e os nêutrons carga neutra. Cargas elétricas diferentes se atraem e iguais se repelem, como já foi discutido. Daí, a atração entre prótons e elétrons. Vimos também que as forças de atração dependem da distância entre as cargas. Dessa forma, elétrons mais próximos ao núcleo são atraídos com força maior que elétrons a uma distância maior do núcleo. Existem elétrons presos mais intensamente ao núcleo, como existem elétrons presos de forma mais fraca ao núcleo. Por exemplo, vemos na Figura 1.17 a estrutura simplificada de um átomo de ferro que possui 26 elétrons, 26 prótons e 26 nêutrons. Observe que os elétrons da última camada, camada *N*, estão atraídos pelo núcleo de forma mais fraca que os elétrons da camada *K* que estão mais próximos. Esses elétrons, que estão ligados ao núcleo de forma mais fraca, é que são responsáveis pela condução das cargas elétricas. Tais elétrons se movimentam de um para outro átomo, ou seja, se movimentam como uma nuvem de elétrons num condutor de ferro. Por isso que, ao tocar com metal numa estrutura carregada, as cargas irão fluir pelo metal até nosso corpo, que também é condutor. Se algum ponto do nosso corpo permitir a continuidade do fluxo de cargas elétricas, com certeza iremos sentir choque elétrico. O choque elétrico é a excitação dos nervos pela passagem das cargas elétricas.

Figura 1.17 – Modelo simplificado de um átomo de ferro



Percebe-se que a estrutura atômica, que é composta de um determinado material, dita se o material oferece mais ou menos resistência à movimentação das cargas elétricas. Essa resistência à movimentação das cargas pelos materiais será estudada com mais detalhe no próximo capítulo. Em todo caso, tanto na eletrostática quanto na eletrodinâmica, os elétrons desempenham o papel mais importante. Um corpo carregado positivamente é aquele que perdeu elétrons. Um corpo carregado negativamente é aquele que ganhou elétrons.

1.9 Da jarra de Leiden ao capacitor

Como foi mencionado, o holandês Pieter van Musschenbroek, por volta de 1745, conseguiu acumular cargas elétricas utilizando água, que é um isolante. A água pura possui uma resistência grande à passagem da corrente elétrica, sendo ideal para manter separadas as cargas positivas das negativas. A jarra de Leiden podia acumular cargas elétricas durante dias. Na realidade, Musschenbroek havia descoberto o capacitor. O capacitor é um componente utilizado em muitas aplicações em eletricidade. Ele acumula energia em um campo elétrico proveniente da separação das cargas positivas e negativas. A manutenção da separação dessas cargas ocorre devido ao isolante (dielétrico) que pode ser constituído de muitos líquidos de base aquosa. Este isolante impede que as cargas se anulem. O capacitor, além de acumular cargas elétricas, oferece muita dificuldade a variações súbitas de tensão elétrica. Onde se quer que a tensão elétrica permaneça constante, sem variações rápidas, se empregam capacitores. Os circuitos eletrônicos estão repletos de capacitores que são utilizados para reduzir essas variações súbitas de tensão.

O capacitor, mostrado de forma simplificada na Figura 1.18 (a), é constituído por duas placas condutoras, entre as quais se encontra um material dielétrico (isolante). Na experiência de Musschenbroek, o dielétrico era água. Os capacitores, quando energizados, acumulam energia elétrica com a separação das cargas elétricas, como mostrado na Figura 1.18 (b). Se os terminais de um capacitor carregado forem encostados, haverá uma movimentação súbita das cargas no intuito de anular umas às outras. Nesse caso a energia que foi acumulada será dissipada rapidamente. Jamais se deve tocar os terminais ou encostar tais terminais em capacitores de grande porte. A movimentação das cargas elétricas pode se dar pelo corpo, causando choques. Centelhas podem se formar, causando queimaduras. Tais centelhas são provenientes da súbita quebra da rigidez dielétrica do ar.

Existem diversos tipos de capacitores com diferentes dielétricos. Os Capacitores de tântalo, polipropileno, cerâmica e eletrolítico são os mais comuns. Destaque para o Capacitor eletrolítico, mostrado na Figura 1.19, que tem seu dielétrico Al_2O_3 (óxido de alumínio) formado por uma reação eletrolítica. Para a reação eletrolítica ocorrer, é necessária a correta polarização, uma vez que esses capacitores já possuem, de forma definida, o terminal positivo e o terminal negativo, que devem ser respeitados na sua ligação. A ligação desses capacitores nos terminais errados acarretará um aquecimento muito alto do eletrólito e a criação de muito gás hidrogênio no seu interior, podendo, por sua vez, acarretar explosão dos capacitores. Tais capacitores possuem uma maior densidade de energia por volume que seus concorrentes, sendo, portanto, uma opção de menor custo. Tais capacitores acumulam cerca de 2 J/cm^3 , densidade baixa em comparação a uma bateria comercial. O capacitor, por enquanto, não possui a função de uma bateria, sendo utilizado para carga e descarga rápidas de pouca

energia. É provável que, no futuro, se desenvolvam supercapacitores com capacidade de acumulação de energia muito maior que os capacitores atuais.

Figura 1.18 – (a) Partes construtivas do capacitor; (b) Capacitor carregado

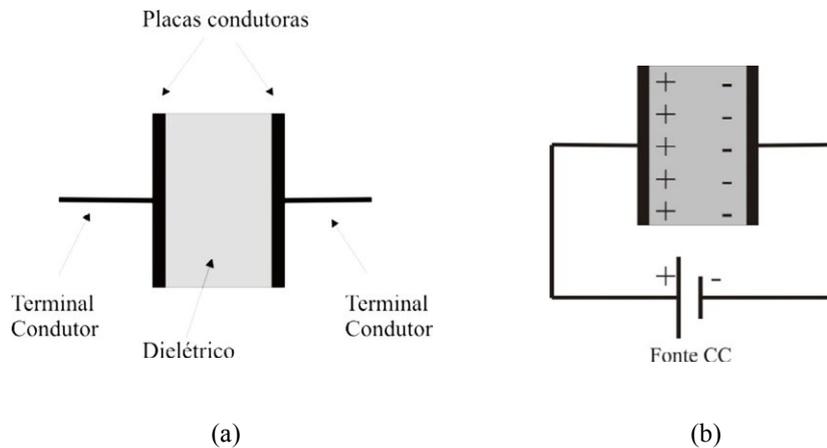
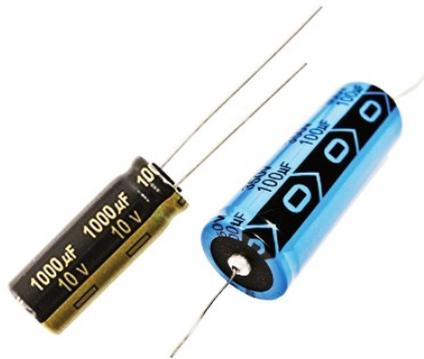


Figura 1.19 – Capacitor eletrolítico



Capacitância é a grandeza que mede a capacidade de armazenar cargas elétricas no interior do campo elétrico. A capacitância depende do dielétrico e das características geométricas do capacitor.

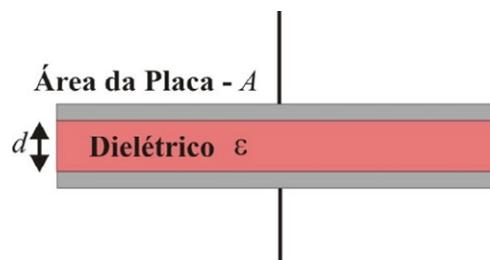
CAPACITÂNCIA

Unidade de medida	→	farad (F)
Submúltiplos usuais	→	milifarad (mF), microfarad (μF), picofarad (pF)
Relações	→	$1 \text{ F} = 10^3 \text{ mF} = 10^6 \mu\text{F} = 10^{12} \text{ pF}$

A estrutura mais simples para um capacitor é a mostrada na Figura 1.20, abaixo: um capacitor com placas condutoras quadradas com área A , distanciadas linearmente de d , com

dielétrico entre elas. A capacitância desse capacitor elementar é dada por (1.5). Observe que a permissividade do material são valores muito pequenos, de tal forma que, para conseguir valores de capacitância na ordem de 1 F, são necessárias áreas muito grandes com distâncias muito pequenas entre as placas. Capacitores eletrolíticos, por exemplo, possuem valores comerciais máximos por volta de 150 mF, para tensão de operação de 63 V. À medida que se aumenta a tensão de operação do capacitor, aumenta-se a quantidade de carga armazenada, sendo necessário mais volume, como mostrado na expressão (1.6). Podemos exemplificar esse fenômeno da seguinte forma: um capacitor eletrolítico de 2200 μF , para operação numa tensão de 400 V, possui um volume por volta de 6930 mm^3 . Já um capacitor eletrolítico de 2200 μF , para operação numa tensão de 100 V, possui um volume por volta de 1872 mm^3 .

Figura 1.20 – Capacitor elementar formado de duas placas quadradas e um dielétrico



$$C = \epsilon \frac{A}{d} \quad (1.5)$$

$$Q = CV \quad (1.6)$$

A imagem do capacitor da Figura 1.20 é um recurso didático utilizado na literatura técnica para explicar sua estrutura, já que, comercialmente, não há capacitor nesse formato. Nesse caso, as linhas de campo elétrico se distribuem de forma muito complexa principalmente nas bordas, como é mostrado na Figura 1.21, somente em duas dimensões. Essas configurações de campo elétrico, como efeito franja (*Fringing*), tornam complexa também a determinação das capacitâncias. Essas configurações distorcidas de campo não são, entretanto, totalmente indesejadas. Na Figura 1.22, por exemplo, vê-se que uma das placas do capacitor é aterrada; vê-se, ainda, um corpo, também aterrado, se aproximando do capacitor. O contato do corpo com as linhas de campo, que compõem as franjas da adjacência do capacitor, alteram essas linhas, alterando sua capacitância original. Esse é um fenômeno chamado acoplamento capacitivo entre o capacitor original e o corpo e é utilizado nos sensores capacitivos para medir aproximação de corpos, nível de água em reservatórios, nível de grãos em silos e até em interface homem-máquina (*Touch screen* capacitivo).

Figura 1.21 – Distribuição das linhas de campo

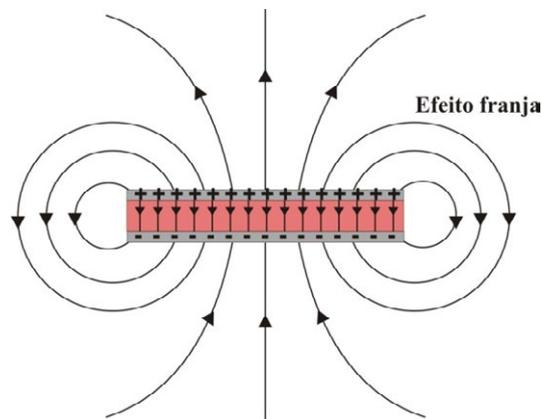
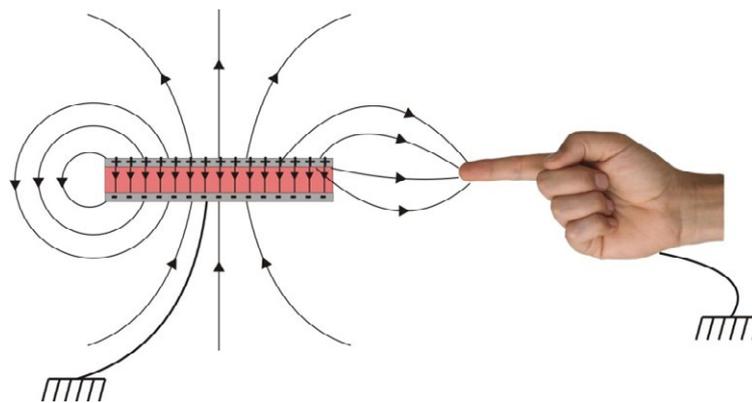
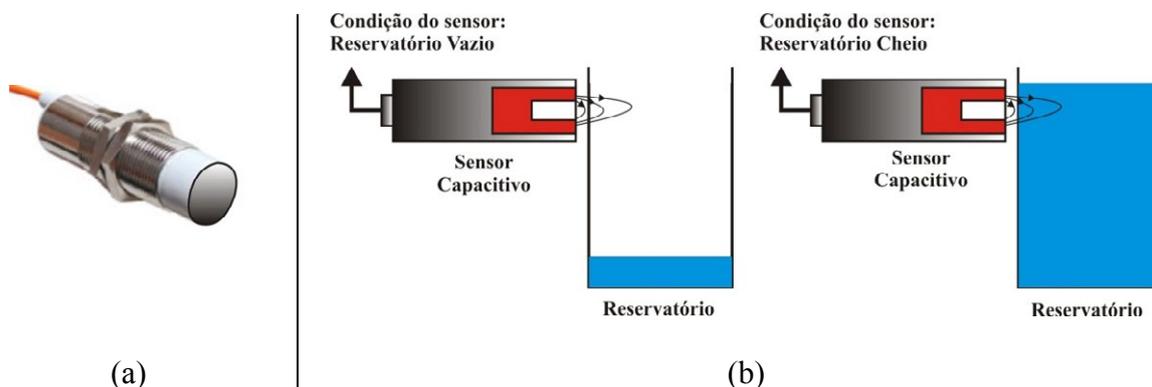


Figura 1.22 – Configuração instantânea de campo interagindo com o corpo



Na Figura 1.23, é mostrado um sensor capacitivo comercial bem como sua utilização para detectar o nível de líquidos e grãos (farinha, sementes e outros). Quando o reservatório está vazio, o capacitor do sensor possui uma certa capacitância. Quando o líquido entra em contato com suas linhas de campo elétrico, sua capacitância se altera. Esta alteração é identificada por um sistema de controle. Este sistema de controle decide, por exemplo, desligar a bomba que estava enchendo o reservatório. Este sistema é comandado, na maioria dos casos, por CLPs (Controladores Lógicos Programáveis), que são computadores dedicados ao controle dos processos industriais. Sensores capacitivos estão muito presentes dentro dos processos industriais pois, além de serem precisos, não necessitam entrar em contato com os líquidos e grãos.

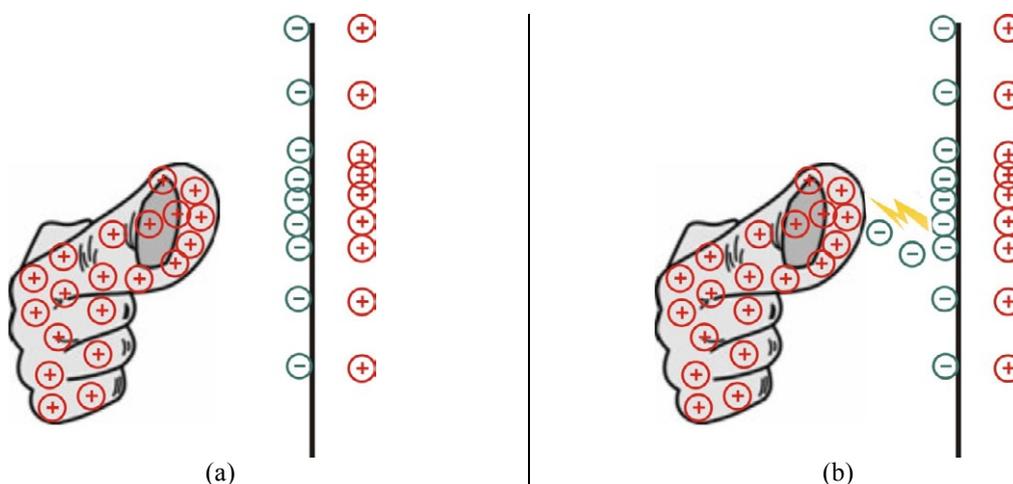
Figura 1.23 – (a) Sensor capacitivo; (b) Detecção de nível de líquidos (sem contato com o líquido)



1.10 Efeitos indesejáveis da eletrostática

Alguns movimentos com presença de atrito podem carregar corpos com cargas elétricas negativas ou positivas. Ao se esfregar uma flanela no corpo de uma caneta, por exemplo, esta última se energiza com cargas positivas, sendo capaz de atrair pequenos pedaços de papel. O simples ato de andar sobre alguns materiais pode carregar eletricamente nossos corpos. Ao andar sobre alguns tapetes ou carpetes, é comum pessoas se carregarem com cargas elétricas positivas. A energização estará sendo causada pelo atrito entre os pés e o tapete. Uma pessoa carregada eletricamente, ao se aproximar de uma estrutura condutora, induzirá nessa estrutura cargas de polaridade oposta, como mostra a Figura 1.24 (a). Ao tocar a estrutura, haverá um movimento súbito das cargas ali acumuladas, a fim de as anular em seu corpo. Essas cargas em movimento se assemelham a choques elétricos, os quais podem causar efeitos desagradáveis nas pessoas. Às vezes, antes de haver o contato físico da mão energizada com a estrutura, acontece a quebra da rigidez dielétrica do ar, com aparecimento súbito de uma centelha, visto na Figura 1.24 (b), semelhante a um raio em pequena escala.

Figura 1.24 – (a) Mão carregada se aproximando de uma estrutura condutora; (b) Quebra da rigidez dielétrica – centelha entre a mão e a estrutura



Outro exemplo de eletrização são os veículos quando se movem e se atritam com o vento. Esse atrito energiza, com cargas positivas, a carcaça do veículo. Descargas súbitas podem se dar entre a carcaça do veículo e uma estrutura condutora, ou entre carcaça e pessoas. O risco desses descarregamentos eletrostáticos súbitos está relacionado à presença de materiais inflamáveis. Em postos de combustíveis, no procedimento de abastecimento, acontece o maior risco de incêndios originados por cargas eletrostáticas.

Pentear os cabelos é outro exemplo de eletrização eletrostática. Pentear com alguns pentes de plásticos implica atritar o pente com os cabelos. Esse atrito faz com que o pente se energize eletrostaticamente e seja capaz de atrair pequenos pedaços de papel.

A umidade do ar influencia significativamente o carregamento eletrostático dos corpos. Quanto maior a quantidade de partículas de água suspensas no ar menor a eletrização de corpos, pois tais corpos se tornam mais úmidos, facilitando a descarga a terra. Esses efeitos eletrostáticos se evidenciam mais em regiões onde a umidade relativa do ar é baixa.

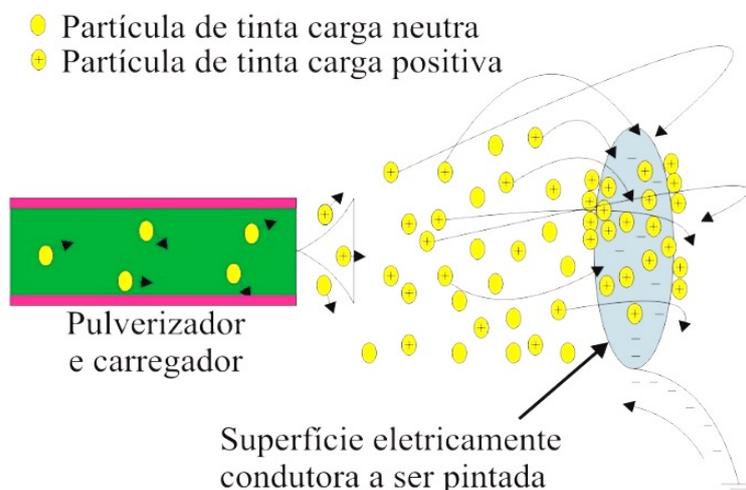
1.11 Aplicações industriais da eletrostática

A pintura eletrostática é uma das aplicações da eletrostática. Esse tipo de pintura utiliza várias estratégias para realizar a pulverização da tinta e seu carregamento eletrostático. O carregamento pode ser por alta tensão, utilizando efeito Corona, ou pode ser por atrito. Seja qual for a estratégia tecnológica, o objetivo é carregar (positivamente ou negativamente) as partículas de tinta e as pulverizar. Tais partículas são atraídas pela superfície condutora que, por sua vez, é aterrada. Cargas elétricas de sentido contrário ao da tinta sobem pelo aterramento para o material a ser pintado. Dessa forma, há atração das partículas de tinta pela superfície.

Na Figura 1.25, apresentamos um esquema simplificado da pintura eletrostática. A nuvem de partículas de tinta carregadas induz uma nuvem de cargas opostas, no objeto a ser pintado. Esse comportamento pode ser entendido pelo método do espelhamento. Dessa forma, há a atração da nuvem de tinta pelo plano, como se fossem duas nuvens de cargas opostas se atraindo. Ao contrário da pintura spray convencional, em que as partículas de tinta se chocam com a superfície a ser pintada, na pintura eletrostática as partículas são atraídas pela superfície. Esta tecnologia de pintura possui uma série de vantagens, entre as quais se destacam:

- Ausência de dupla camada de tinta, evitando seu desperdício.
- Camada uniforme, ou seja, a área a ser pintada é toda preenchida.
- Possibilidade de pintura de estruturas complexas, em que a pintura com spray comum é inacessível. As partículas envolvem completamente a superfície.

Figura 1.25 – Esquema simplificado da pintura eletrostática



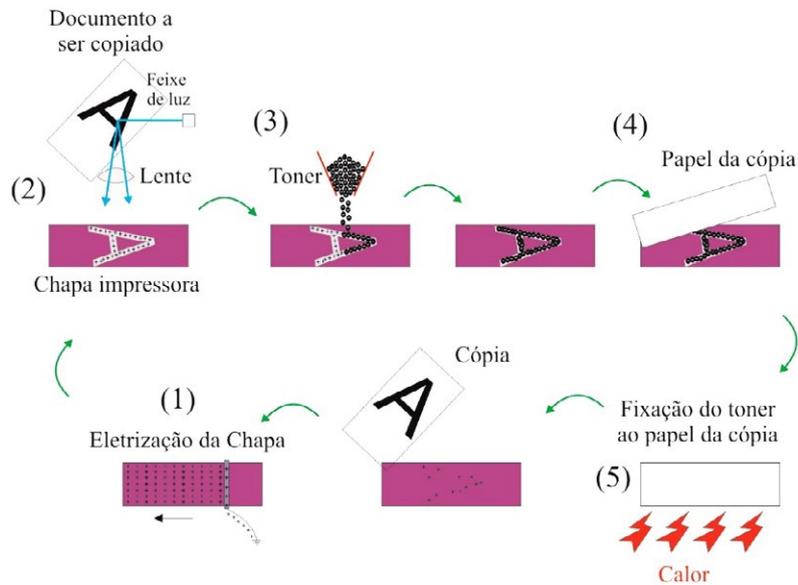
Outra grande aplicação da eletrostática é no processo eletrostático de cópias de documentos, também conhecido por xerografia, que foi desenvolvido pelo cientista americano Chester Carlson (1906-1968), por volta de 1938. Um produto comercializável, no entanto, somente foi introduzido no mercado em 1959 – a Xerox 914. Com apenas um toque, era possível copiar documentos de forma rápida e eficiente. Este foi um produto revolucionário para a época e abriu as portas para o bilionário mercado de copiadoras. O processo xerográfico era seco e baseado em cargas elétricas estáticas. A Figura 1.26 mostra o processo simplificado. Nesta figura, o cilindro de impressão é substituído por uma chapa, para tornar o processo mais didático. Segue sua descrição:

- (1) O cilindro, carregado positivamente, é formado por um filme de material fotocondutor à base de elementos semicondutores como silício ou germânio. Se a luz é incidida sobre este material, este se torna condutor. Assim, elétrons livres neutralizam as cargas do cilindro.
- (2) A imagem do documento que se quer copiar é iluminada e refletida no cilindro carregado. Nas partes brancas do documento, é refletida a luz, enquanto as partes que contêm caracteres não são refletidas. A luz, por sua vez, que incide no cilindro faz com que o material que compõe o filme se torne condutor e neutralize as cargas elétricas positivas. Desta forma, somente permanece carregado o reflexo dos caracteres no cilindro.
- (3) Um pó plástico negro, chamado *toner*, é atraído pelas cargas positivas do cilindro.
- (4) e (5) Uma folha de papel em branco é posta em contato com o cilindro, fazendo com que o toner se integre ao papel pela ação de alta temperatura.

Várias cópias de um mesmo documento podem ser realizadas, além de ampliação e redução, pelo efeito da lente que leva a luz refletida até o cilindro. O princípio da imagem eletrostática é utilizado nas copiadoras até nossos dias. As impressoras *laser* atuais utilizam também este princípio, da imagem eletrostática, num processo muito parecido com o xerográfico proposto por Chester Carlson, em 1938.

Nesses dois exemplos percebemos que os princípios teóricos estudados em eletrostática não estão desvinculados do nosso dia a dia. Estão muito próximos de nós, no funcionamento de vários produtos do nosso cotidiano.

Figura 1.26 – Processo xerográfico tradicional simplificado



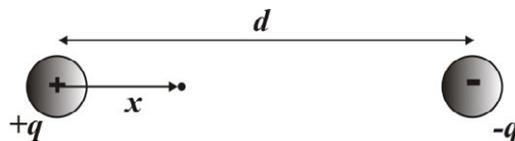
PRÁTICAS NA SALA DE AULA

- Carregue o corpo de uma caneta esferográfica esfregando-a com um pedaço de tecido qualquer. Em seguida tente atrair, com a caneta, pequenos pedaços de papel.
- Esboce as linhas de campo de uma configuração de três cargas elétricas iguais ocupando os vértices de um triângulo equilátero.
- Esboce as linhas de campo de uma configuração de três cargas elétricas (duas iguais e uma diferente) ocupando os vértices de um triângulo equilátero.
- Discuta, em grupo, o campo elétrico no centro de um anel metálico carregado.
- Pesquise na internet e construa um gerador de Van de Graaff de pequeno porte.
- Determine a carga armazenada num capacitor de 100 μF para tensão de operação de 250 V.
- Responda à pergunta: Para um capacitor de placas quadradas, com $d = 0,01 \text{ mm}$, com água como dielétrico, qual a área necessária para se ter uma capacitância de 100 μF ?

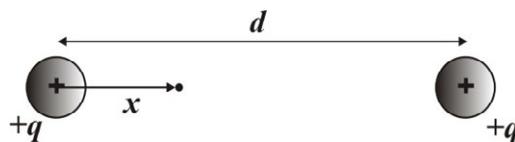
Exercícios propostos

- 1.1 Tente eletrizar um pente de plástico, penteando seu próprio cabelo, e tente atrair alguns pequenos pedaços de papel. Depois descarregue o pente no seu corpo.
- 1.2 Determine o módulo do campo elétrico de uma esfera metálica de raio 10 cm, carregada com uma carga de $q = 10 \mu\text{C}$, no vácuo, nos seguintes pontos:
- Na casca da esfera;
 - a uma distância de 12 cm;
 - a uma distância de 20 cm.
- 1.3 Determine o módulo do campo elétrico (no ponto equidistante) entre duas esferas metálicas idênticas de raio 10 cm, carregadas com uma carga de $q = 10 \mu\text{C}$, no vácuo.
- 1.4 Determine o potencial elétrico de uma esfera metálica de raio 10 cm, carregada com uma carga de $q = 10 \mu\text{C}$, no vácuo, entre dois pontos a 12 cm e 15 cm.
- 1.5 Qual a quantidade de carga negativa necessária para submetermos uma esfera metálica de raio 10 cm no vácuo, um potencial de 10000 V? Quantos elétrons seriam necessários?
- 1.6 Sejam duas cargas pontuais. Determine a expressão do módulo do campo elétrico resultante em função de x e d nos casos 1 e 2. Esboce o gráfico deste módulo com x variando de 0 a d em ambos os casos.

Caso 1

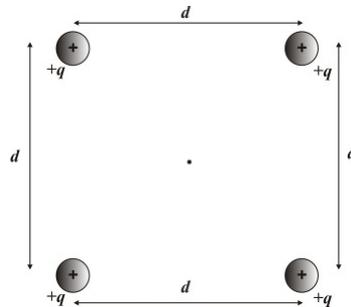


Caso 2

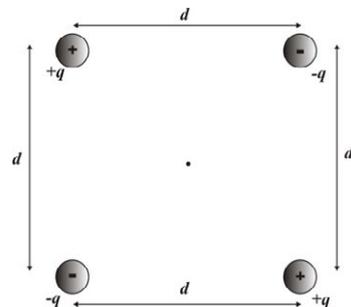


- 1.7 Seja o arranjo de quatro cargas pontuais a seguir. Esboce o campo elétrico contribuído por cada carga, com ajuda de uma régua, no ponto central do arranjo.

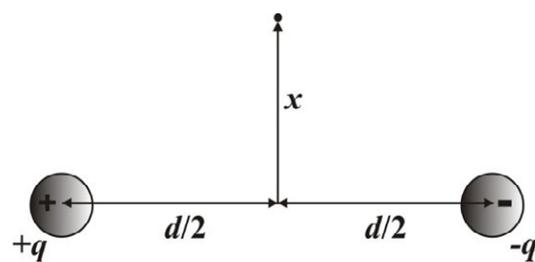
Caso 1



Caso 2

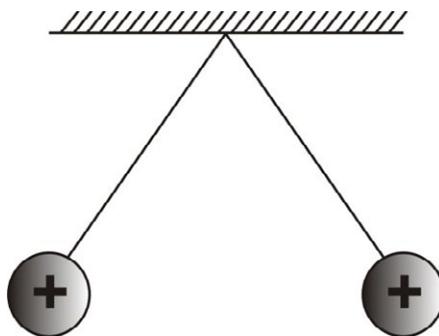


- 1.8 Determine a expressão do módulo do campo elétrico resultante num ponto a uma distância x do centro entre duas cargas diferentes. Considere as cargas pontuais. Esboce o gráfico.



- 1.9 Determine o potencial elétrico em relação ao infinito numa esfera metálica carregada com uma carga q e de raio r num ponto a uma distância x do seu centro.

1.10 Esboce as forças submetidas nas duas esferas carregadas da figura a seguir.



1.11 Responda: Como o movimento Iluminismo influenciou o desenvolvimento da eletricidade no século XVIII?

1.12 Esboce o sistema de proteção contra descargas atmosféricas prediais (para-raio de Franklin), enumerando suas diversas partes bem como seu funcionamento.

1.13 Esboce o fluxo de cargas elétricas pelo corpo humano ao se tocar com uma mão na jarra de Leiden carregada e se:

- a) a outra mão tocar na terra.
- b) os pés descalços tocarem na terra.
- c) se a pessoa estiver em cima de uma estrutura isolante.

1.14 Pesquise como o *Touch screen* capacitivo funciona.

1.15 Pesquise o princípio de funcionamento do theremin.

Projeto

Pesquise e elabore um gerador de Van de Graaff rudimentar com lata de refrigerante ou bola de isopor revestida de papel laminado.

Pesquisa e discussão em grupo

O Brasil possui uma das maiores incidências de raios do mundo, o que o faz também um dos países que apresentam maiores índices em acidentes com raios envolvendo pessoas. Pesquise e discuta em grupo a incidência dos raios dentro do Brasil. Quais os estados mais atingidos?

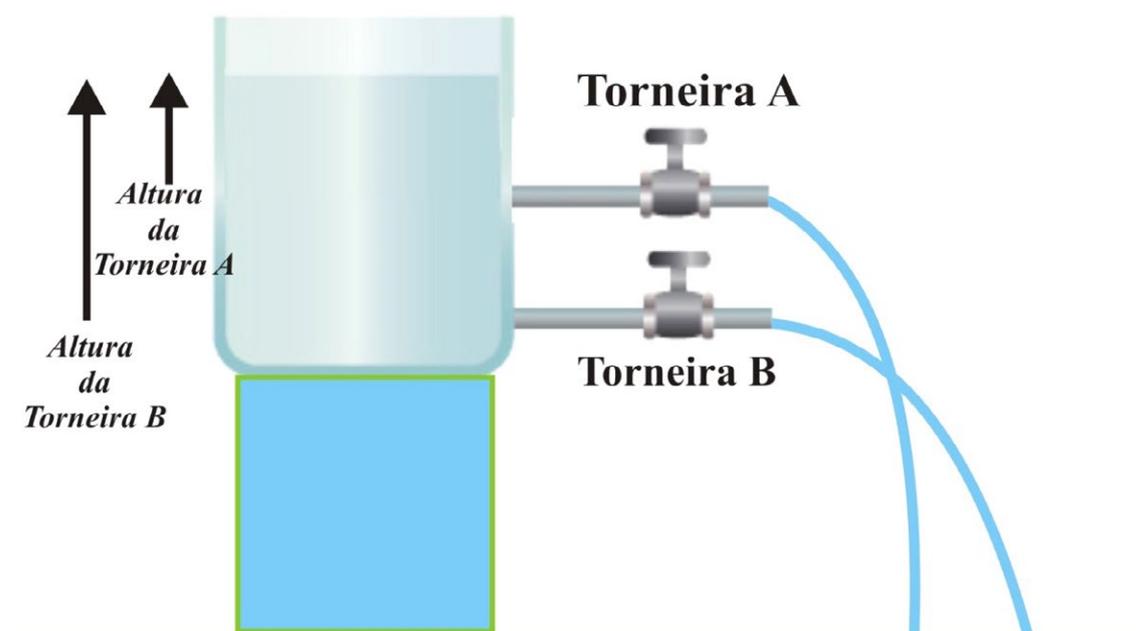
REFERÊNCIAS

- AEROVOX – Capacitors. Disponível em: <<http://www.aerovox.com>>. Acesso em: dez. 2017.
- BOHR atomic model. In: **Encyclopaedia Britannica**. Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/Bohr-atomic-model>>. Acesso em: abr. 2018.
- COTRIM, Ademaro A. M. B. **Instalações elétricas**. São Paulo: Makron books, 1992.
- JONASSEN, Niels. **Electrostatics**. New York: Springer Science, 2002.
- LIGHTNING. **National Geographic**. Disponível em: <<https://www.nationalgeographic.com/environment/natural-disasters/lightning/>>. Acesso em: set. 2017.
- MENDES, P. J. **Fundamentos de Eletrotécnica**. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2012.
- NOTAROS, Branislav M. **Eletromagnetismo**. São Paulo: Pearson, 2012.
- PÄHTZ, T.; HERRMANN, H. J.; SHINBROT, T. Why do particle clouds generate electric charges? **Nature Physics**, v. 6, p. 364-368, abr. 2010.
- TATE, Karl. Infographic: How Lightning Works. **Live Science**, 26 set. 2012. Disponível em: <<https://www.livescience.com/34246-infographic-how-lightning-works.html>>. Acesso em: set. 2017.
- TEXAS INSTRUMENTS INC. **FDC1004: Basics of Capacitive Sensing and Applications**. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/an/snoa927/snoa927.pdf>>. Acesso em: set. 2017.
- THE Physics Classroom. Disponível em: <<http://www.physicsclassroom.com/class/estatics>>. Acesso em: jul. 2017.
- XEROX. **Chester Carlson and xerography**. Disponível em: <<https://www.xerox.com/en-us/innovation/chester-carlson-xerography>>. Acesso em: mar. 2018.

2 Grandezas e suas medições

Os elétrons possuem carga elétrica negativa, e os prótons carga positiva. Esta convenção já foi abordada no estudo da eletrostática. A utilização da energia elétrica está muito relacionada à movimentação das cargas elétricas. Para haver movimentação das cargas elétricas de um ponto a outro, é necessário um potencial elétrico entre esses dois pontos. Imagine um reservatório cheio de água, conforme exposto na Figura 2.1. Se abrirmos a torneira, a água fluirá, do que se conclui que a torneira tem o potencial de fluir água com uma determinada vazão, dependendo do nível de água no reservatório. Esse potencial está relacionado com a altura da coluna de água em relação à torneira. Quanto maior a altura da coluna de água, maior a vazão de água fluindo pela torneira. Observando-se a localização das torneiras A e B, pode-se dizer que a torneira B possui um potencial de vazão maior que a torneira A.

Figura 2.1 – Reservatório de água com duas torneiras de duas alturas



A energia elétrica é semelhante à energia potencial do reservatório de água. A diferença é que, quando utilizamos a energia elétrica, fluem cargas elétricas pelo condutor (fio ou cabo elétrico). Pelo fio, fluem elétrons livres que vão servir para iluminar, aquecer, mover motores, além de servir a outras finalidades. Dessa forma, encontramos uma comparação muito boa para entendermos energia elétrica:

Fontes elétricas	➡	Reservatório de água
Elétrons livres	➡	Água
Potencial elétrico	➡	Nível de água dentro do reservatório
Condutores	➡	Tubulação

O potencial elétrico é uma reserva de energia a nossa disposição. Essa energia não foi criada nem vai ser destruída. Ela foi gerada por algum método e vai ser transformada em trabalho, em luz, em calor, ou seja, transformada em outras formas de energia. No Capítulo 12 serão explanados vários métodos de geração de energia elétrica.

Quem lida com energia elétrica encontra diversas grandezas necessárias para um trabalho eficiente. Tais grandezas devem ser compreendidas, pois são, constantemente, objeto de manipulação. É nessas grandezas que se baseiam muitas tomadas de decisões. São elencadas a seguir algumas decisões importantes baseadas em grandezas elétricas:

- Decisão se um condutor está bem dimensionado para uma determinada carga;
- Decisão se uma bateria de um carro está descarregada;
- Decisão se um motor está sobrecarregado;
- Decisão se houve aumento de consumo de energia elétrica numa residência.

Assim, conhecer as grandezas elétricas é importante, pois o técnico poderá se deparar com situações que exijam tal conhecimento para tomar as providências necessárias ou opinar para que outro profissional o faça. As grandezas elétricas possuem um significado, uma unidade, um instrumento e um procedimento destinados à sua medição. São esses elementos que serão discutidos neste capítulo.

2.1 Unidades de grandezas e seus submúltiplos

Algumas grandezas já foram estudadas no capítulo anterior. Todas as grandezas possuem unidades de medidas padronizadas internacionalmente, ou no sistema CGS (centímetro, grama, segundo) ou no sistema mais utilizado, o SI (Sistema Internacional). Este livro sempre traz unidades ligadas ao sistema SI, por ser o mais utilizado.

As unidades de medidas, em muitos casos, aparecem representadas de forma muito grande ou muito pequena, sendo necessária a utilização de submúltiplos. Por exemplo, nos sistemas elétricos de transmissão de energia, é comum voltagens na faixa de 230.000 V ou até 500.000 V. Desta forma, neste ambiente, é mais prático utilizar o kV (unidade de 1000 volts), expressando 230 kV ou 500 kV. Na Tabela 2.1 temos os principais submúltiplos e sua relação com a unidade básica.

Tabela 2.1 – Principais submúltiplos utilizados em eletricidade e magnetismo

Pico (p)	Nano (n)	Micro (μ)	Mili (m)	Unidade básica	Quilo (k)	Mega (M)	Giga (G)	Tera (T)
10^{-12}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}		10^3	10^6	10^9	10^{12}
←					→			
Para expressar a unidade nesses submúltiplos, multiplica-se a unidade básica pelos fatores acima.					Para expressar a unidade nesses submúltiplos, divide-se a unidade básica pelos fatores acima.			

2.2 Voltagem ou Tensão elétrica

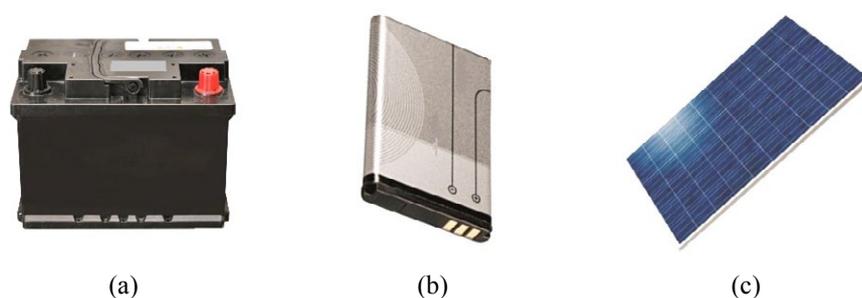
A voltagem ou tensão elétrica mede o potencial de energia à disposição do usuário. Você se lembra do nível de água no reservatório? Se o nível é alto, o jato de água na torneira será forte; se o nível de água for baixo, o jato de água será fraco. Observe que não há necessidade de utilização da energia para se ter um potencial elétrico. Esse potencial elétrico é medido sempre em relação a dois pontos. No nosso reservatório de água, a saída da torneira possui um potencial em relação à altura do nível de água do reservatório. Qual o maior potencial, o da torneira A ou o da B?

Unidade de medida	➡	Volts (V)
Submúltiplos usuais	➡	kilovolts (kV), milivolts (mV)
Instrumentos de medição	➡	voltímetro
Relações	➡	$1 \text{ V} = 10^{-3} \text{ kV} = 10^3 \text{ mV} = 10^6 \mu\text{V}$

2.2.1 Fontes de tensão

As fontes de tensão podem ser de dois tipos: contínuas ou alternadas. A fonte de tensão contínua possui o valor médio não nulo. As cargas elétricas fluem de forma contínua de um potencial maior para outro menor. Os terminais de uma fonte de tensão contínua são terminal + (**positivo**) e – (**negativo**). Exemplos de fontes de tensão contínua são encontrados na Figura 2.2.

Figura 2.2 – (a) Bateria de carro (12 V); (b) Bateria de celular (3,7 V); (c) Painel Fotovoltaico (0-24 V)



Nas fontes de tensão alternada, as cargas vibram periodicamente. O que se propaga é uma onda. Imagine uma corrente esticada entre dois pontos. Ao se bater numa extremidade, uma onda percorrerá a corrente; no entanto, os elos da corrente só vibram em torno de um ponto. Nesse caso, o que se propaga é a energia. Os terminais de uma fonte de corrente alternada são **Fase** e **Neutro**. O sistema elétrico residencial, ou seja, presente nas nossas casas, é de corrente alternada. A frequência da tensão no nosso sistema elétrico é de 60 Hz (60 ciclos por segundo). Um exemplo de fonte de tensão alternada é a tomada residencial, visto na Figura 2.3.

Figura 2.3 – Tomada elétrica residencial



2.2.2 A Bateria elétrica

A bateria elétrica teve como precursora a pilha de Volta. Como já foi mencionada, a pilha de Volta foi uma revolução, pois, pela primeira vez na história, podia-se construir uma fonte de energia a partir de um procedimento físico-químico – em outras palavras, conseguir energia elétrica a partir de reações químicas. A energia elétrica deixou o terreno da especulação e do entretenimento para a possibilidade de exploração objetiva. A bateria pode ser entendida como um conjunto de pilhas, que consiste, simplificada, em dois terminais imersos numa solução. Existem vários tipos de bateria, diferindo-se entre si pela constituição dos terminais e solução.

A bateria de chumbo-ácido é uma das mais populares, constituída de terminais de chumbo e solução de ácido sulfúrico. São as baterias que ajudam a ignição inicial (partida) dos veículos. É bom frisar, contudo, que, mesmo sendo um elemento constituinte das baterias presentes nos veículos, o chumbo é um material tóxico que pode causar problemas ao sistema nervoso, rins e outros órgãos. O descarte deste tipo de bateria deve ser adequado, para evitar a contaminação dos lençóis freáticos.

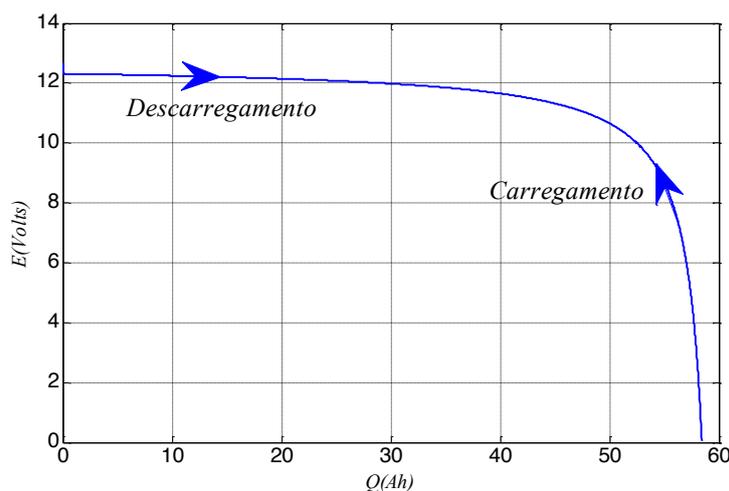
As baterias de níquel cádmio (Ni-Cd) são muito utilizadas em bateria de pequenos equipamentos, celulares, brinquedos e outros. Uma característica interessante desse tipo de bateria é a quantidade de carregamento, frequentemente mais de 1000. O Cádmio, no entanto, é muito tóxico ao organismo, causando problemas em vários órgãos e podendo levar ao câncer. Há algum tempo, despendem-se esforços para trocar essas baterias por níquel hidreto metálico (Ni-MH), que são menos prejudiciais à saúde.

Destaque para as baterias de íon-lítio (Li-ion), que possuem maior capacidade de acumulação de energia, com mesmo volume que a Ni-Cd e a Ni-MH. Estas baterias estão sendo muito empregadas em tração de veículos elétricos.

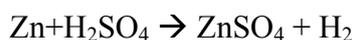
A Figura 2.4 mostra a característica típica de descarregamento e carregamento de uma bateria nova, em função da sua carga, para uma bateria de chumbo ácido de 12 V e 60 Ah. Observa-se que a bateria é uma fonte de tensão controlada. A tensão vai caindo à medida que a carga é suprida para um equipamento elétrico. Num determinado ponto, a tensão elétrica cai rapidamente. Nesta condição, a bateria está descarregada, necessitando de carregamento. O carregamento da bateria segue a mesma característica de forma inversa.

O nível percentual de carga da bateria é conhecido como estado da carga (SOC – *State of Charge*). A determinação do estado da carga da bateria não é uma tarefa trivial. Existem vários métodos publicados na literatura técnica. A tensão da bateria pode ser utilizada, *grosso modo*, para se obter o SOC. De posse da característica de carga e descarga e tabelas de correção fornecidas por alguns fabricantes, é possível, a partir da tensão, se obter o SOC de forma mais precisa.

Figura 2.4 – Característica de carga e descarga de uma bateria de chumbo ácido nova de 60 Ah e 12 V

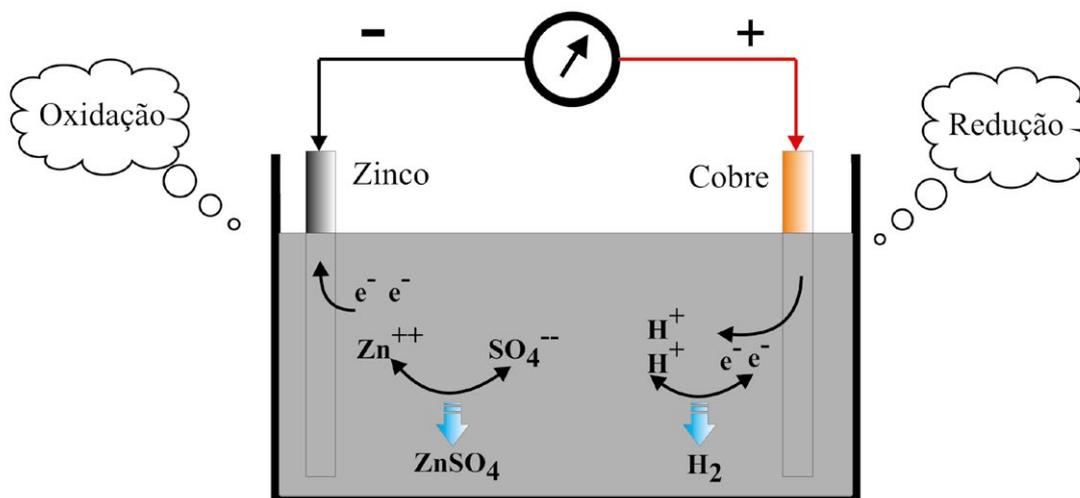


Uma pilha simples pode ser elaborada por uma placa de zinco e uma de cobre, imersas em solução de ácido sulfúrico H_2SO_4 (eletrólito) diluída em água, conforme mostra a Figura 2.5. O zinco está associado à oxidação – criação de íons de zinco Zn^{2+} . Este íon entra na solução que passa a ter um excesso de cargas positivas nas imediações da placa. Com isso, enquanto a placa de zinco ganha elétrons, a de cobre os perde, passando a ter excesso de cargas negativas nas proximidades dessa placa de cobre. Entra em cena o eletrólito. Do lado do zinco, há formação de sulfato de zinco $ZnSO_4$, e, do lado do cobre, há formação de gás hidrogênio H_2 , aproveitando os elétrons liberados pela placa de cobre. Há, literalmente, a quebra do eletrólito e, conseqüentemente, movimentação de íons na solução. O eletrólito é uma categoria de substâncias que são capazes de se dividir em duas cargas (positiva e negativa) quando dissolvidas em meio aquoso. A equação química envolvida no processo pode ser vista a seguir.



O ácido sulfúrico desempenha o papel de condutor, a partir da quebra da molécula em SO_4^- e H^{++} . Dessa forma, a placa de zinco será o potencial negativo (-), pois está ganhando elétrons, e a placa de cobre será o potencial positivo (+), pois está perdendo elétrons. Obviamente que esta energia proveniente das reações químicas não é eterna. Haverá um momento em que a quantidade de sulfato de zinco será alta na solução, equilibrando as reações e não havendo movimentação de cargas na solução. Uma medida para aumentar o potencial elétrico da bateria é aumentar a quantidade de ácido sulfúrico na solução.

Figura 2.5 – Pilha simples utilizando placas de cobre e zinco e ácido sulfúrico



PRÁTICAS NA SALA DE AULA

Muitos alimentos possuem eletrólitos no seu interior, por exemplo: limão, laranja, batata e outros. Aproveite essa propriedade para elaborar uma pilha com uma batata, utilizando os seguintes materiais:

1. Fio de cobre sem a capa de esmalte.
2. Uma caneta.
3. Um prego ou parafuso galvanizado.
4. Um led de baixa corrente.

Procedimento:

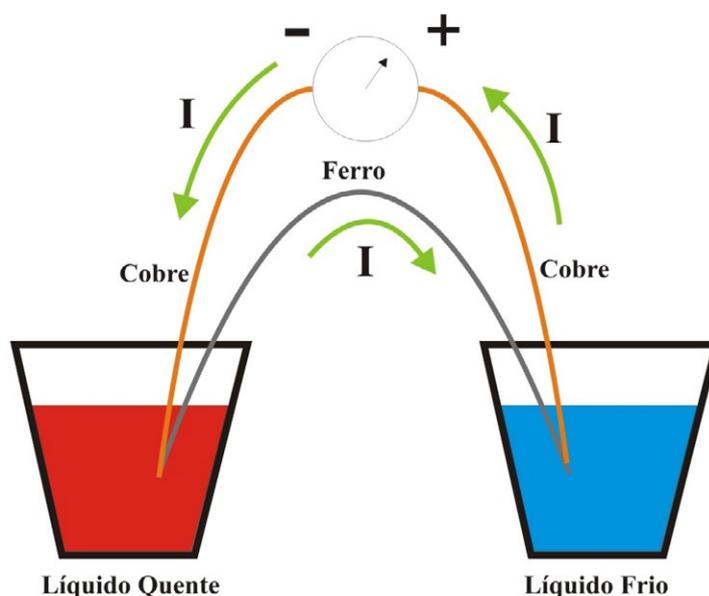
Enrole o fio de cobre na caneta, próximo a sua ponta. Insira-o num lado da batata deixando uma pequena parte, como terminal, para fora. Do outro lado, introduza o prego ou parafuso galvanizado.

- Utilize um voltímetro digital para medir a tensão entre os terminais do fio de cobre e do prego ou parafuso.
- Elabore uma tabela com tempo e tensão entre os terminais.
- Ligue um led de baixa corrente nos terminais. Quanto tempo o led permanecerá ligado?

2.2.3 Fontes de tensão fotovoltaica e termovoltáica

Duas grandes categorias de fonte de tensão são as fontes provenientes da geração fotovoltaica e da termovoltáica. As fontes fotovoltaicas são aquelas que convertem luz em eletricidade diretamente. Esta conversão atingiu um grande potencial de geração de energia pelo seu avanço tecnológico e por seu baixo impacto ambiental. Dada sua grande importância na sustentabilidade, as fontes de tensão fotovoltaicas serão discutidas de forma mais aprofundada no Capítulo 12. Já as fontes termovoltáicas são aquelas que convertem calor em eletricidade diretamente. Tal fenômeno já tinha sido observado pelo cientista alemão Thomas Johann Seebeck (1770-1831), por volta de 1820. Tal fenômeno de conversão leva seu nome até hoje – efeito Seebeck. Algumas junções de materiais diferentes, submetidas a temperaturas diferentes, criam um potencial elétrico contínuo. Por exemplo, na Figura 2.6, é mostrado um exemplo muito popular realizado com a junção de dois condutores – ferro e cobre. As duas junções são submetidas a temperaturas diferentes, resultando numa diferença de potencial elétrico nos seus terminais. O efeito Seebeck converte a diferença do calor contido na água quente e fria em energia elétrica. O efeito Seebeck foi de grande importância para o desenvolvimento de sensores de temperatura baseados em termopar. Sensores do tipo termopar serão discutidos na Seção 2.11, espaço em que apresentaremos também uma ampla gama de sensores de temperatura.

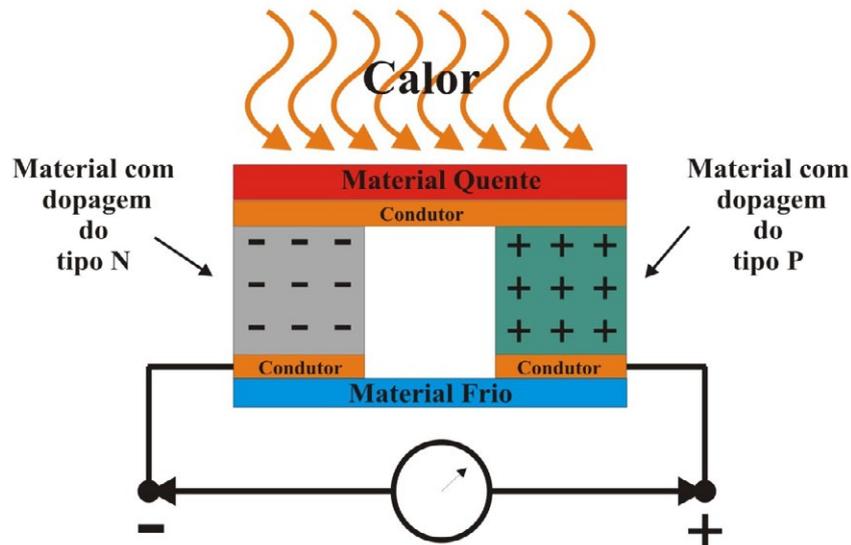
Figura 2.6 – Experimento para observação do efeito Seebeck



O efeito Seebeck admite a reversibilidade, ou seja, é possível, a partir de uma fonte de tensão, criar diferenças de temperatura. A diferença de temperatura pode ser utilizada para aquecer ou para resfriar. Esse fenômeno foi estudado pelo cientista francês Jean Charles Athanase Peltier (1785-1845), por isto o efeito reverso do Seebeck é conhecido por efeito Peltier. Devido a sua popularidade na aplicação em resfriamento de água, o efeito Peltier será discutido mais atentamente nas tecnologias de resfriamento aplicadas em bebedouros, no Capítulo 8.

A dopagem de materiais, que é um procedimento que visa inserir impurezas na estrutura molecular dos materiais, com o intuito de variar suas características eletrostáticas, aumentou a eficiência dos dois efeitos, difundindo suas aplicações. É possível comprar células Peltier com potência de centenas de watts a um custo muito baixo. Na Figura 2.7, é mostrado um esquema simplificado do efeito Seebeck com materiais dopados.

Figura 2.7 – Esquema simplificado de uma célula de efeito Seebeck



2.2.4 Como medir tensão elétrica em 7 passos

Uma medição de tensão eficiente segue necessariamente os seguintes passos:

1º passo Ter noção da ordem de grandeza da tensão a ser medida e se esta tensão é contínua ou alternada.

A ordem de grandeza é ditada pela fonte de tensão. Se a fonte é uma bateria automotiva, espera-se tensão menor ou igual a 12 V (contínua). Se a fonte de tensão é uma tomada elétrica ou um barramento de cobre de um quadro elétrico, espera-se tensão da ordem de 220 V ou 110 V (alternada), dependendo do sistema disponível da concessionária.

2º passo Verificar se o voltímetro é destinado à medição de tensão contínua ou alternada.

3º passo Verificar se a escala do voltímetro é apropriada para a ordem de grandeza a ser medida.

O fundo da escala faz toda diferença no processo de medição. Por exemplo, se a ordem de grandeza é na faixa de 12 V, um fundo de escala de 100 V é

mais apropriado que um fundo de escala de 10 V ou 1000 V. Devem-se escolher fundos de escalas que não sejam menores que a ordem de grandeza, nem muito distantes desta.

4º passo **Verificar se o nível de isolamento do voltímetro é adequado à ordem de grandeza a ser medida.**

Todo instrumento possui um nível de tensão máximo que permite sua utilização. Chama-se tensão de isolamento do instrumento. Por exemplo, um voltímetro com tensão de isolamento de 1000 V não pode ser utilizado para realizar medidas de tensão superiores a este valor. A definição da tensão de isolamento é abordada no capítulo relativo a Medidas Elétricas.

5º passo **Verificar se os pinos dos cabos das pontas de prova estão inseridos nos bornes adequados do instrumento.**

Geralmente esses bornes estão indicados com + (positivo) e – (negativo) para tensão contínua, ou Vca e GND se o instrumento for destinado à tensão alternada. A inserção de pinos das pontas de provas nos bornes errados, principalmente na leitura de tensão, pode resultar em danos ao instrumento de medição.

6º passo **Encostar somente as pontas de provas nos dois pontos em que se quer medir a tensão.**

ATENÇÃO! Tensões acima de 80 V tornam-se perigosas para o organismo humano, portanto todo cuidado deve ser tomado para não se tocar nas partes metálicas energizadas.

7º passo **Ler o resultado.**

PRÁTICAS NA SALA DE AULA

- Utilize um voltímetro digital e analógico, para medir a tensão de uma bateria de carro, a tensão da tomada residencial e a tensão de uma bateria de celular.
- Escreva os cuidados para se efetuar uma medição de tensão segura e eficiente.

2.3 Corrente elétrica

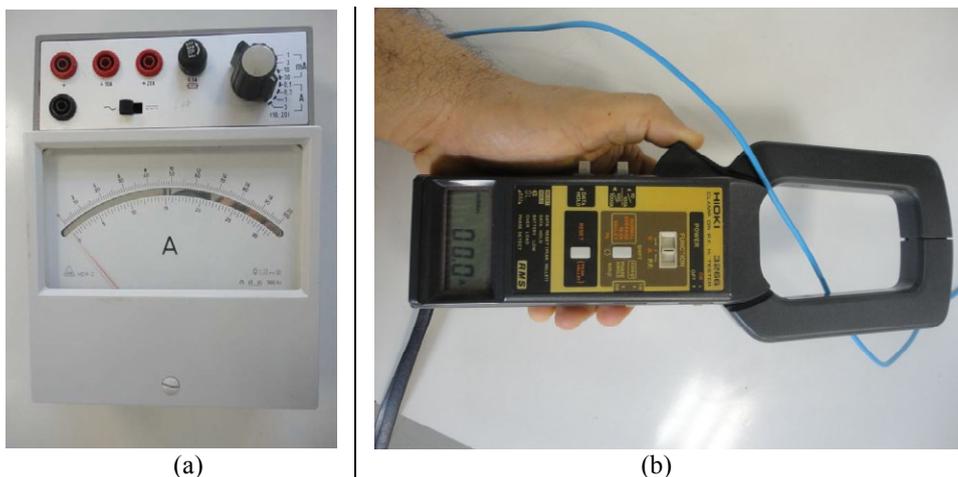
Corrente elétrica indica utilização da energia elétrica. Só há corrente, se houver utilização da energia elétrica. Esta corrente é a movimentação de elétrons pelos condutores para atender a uma carga elétrica. São exemplos de cargas elétricas: chuveiro elétrico, TV, Lâmpada, um motor elétrico, liquidificador, entre outros artefatos. Na nossa comparação, a corrente é como se fosse o fluxo de água dentro dos tubos. Os tubos podem ser comparados aos condutores que levam energia da fonte à carga.

Unidade de medida	➔	Ampère (A)
Submúltiplos usuais	➔	Miliampère (mA), kiloampère (kA)
Instrumentos de medição	➔	amperímetro
Relações	➔	$1 \text{ kA} = 10^3 \text{ A}$, $1 \text{ A} = 10^3 \text{ mA}$

Toda carga elétrica precisa de uma determinada corrente para funcionar em determinada tensão. Essa corrente deve ir, desde a fonte de tensão até a carga, pelos condutores.

Na Figura 2.8, vemos dois tipos de amperímetro: o amperímetro de circuito e o de alicate. No amperímetro de circuito, a corrente a ser medida passa por seu interior. Logo, este tipo de amperímetro deverá ser ligado antes de ligar a carga, pois ligá-lo depois implica desconectar a carga. Já para uso do amperímetro de alicate, não há necessidade de desligar a carga; basta enlaçar um condutor. Percebe-se que o amperímetro de alicate é mais prático na medição de corrente.

Figura 2.8 – (a) Amperímetro de circuito; (b) Amperímetro de alicate



2.3.1 Como medir corrente elétrica em 7 passos

Uma medição de corrente eficiente segue necessariamente os 7 passos seguintes:

1º passo Ter noção da ordem de grandeza da corrente a ser medida e saber se a corrente é contínua ou alternada.

A ordem de grandeza da corrente é ditada pela fonte de tensão e pela carga. Por exemplo, uma lâmpada fluorescente de 20 W possui uma corrente por volta de 0,09 A ou 90 mA em 220 V. Um motor monofásico de 1 cv (736 W) possui uma corrente por volta de 5 A a plena carga em 220 V. As cargas possuem geralmente a descrição da sua corrente a uma determinada tensão nas placas de identificação.

2º passo Verificar se o amperímetro tem a capacidade de medição dessa corrente elétrica.

3º passo Verificar se o amperímetro é de circuito ou de alicate.

4º passo Se o amperímetro for de circuito, ligá-lo em série, já que a corrente deve passar por dentro do amperímetro.

Um cuidado especial deve ser tomado quando da ligação do amperímetro. Como o amperímetro possui resistência interna muito baixa (quase zero), não se devem ligar os plugues dos terminais de medida em dois pontos com tensão. Este procedimento errado provocará um curto-circuito e, provavelmente, queimará o equipamento. Assim, nunca se deve ligar um amperímetro de circuito em paralelo com uma fonte.

5º passo Se o amperímetro for de alicate, deve-se enlaçar o alicate num condutor cuja corrente se pretende medir.

6º passo Escolher a escala apropriada.

7º passo Ler o resultado no equipamento.

PRÁTICAS NA SALA DE AULA

- Ligue duas lâmpadas diferentes na tomada e meça a corrente de cada uma e das duas ao mesmo tempo.
- Ligue um motor monofásico, meça a corrente de partida e a corrente em regime deste motor em vazio.
- Pesquise e responda: Qual a capacidade de condução de corrente de uma tomada simples? E de uma tomada de cozinha?
- Pesquise e responda: Qual a capacidade de condução de corrente de um condutor 1,5 mm² e de 2,0 mm²?

2.4 Corrente contínua ou alternada? Qual a melhor?

Esta pergunta foi suscitada há muito tempo, por volta de 1880, e virou uma das maiores disputas da história. Tal disputa é conhecida como a guerra das correntes. Esta guerra começa com a capacidade inventiva de Thomas Alva Edison (1847-1931). Edison foi a primeira pessoa a montar um laboratório de pesquisa e desenvolvimento com mais de 100 engenheiros, gerando inventos comercializáveis. Iluminar com energia elétrica as cidades, suas ruas e residências era um dos seus sonhos e uma expectativa de retorno milionário. Tal feito de iluminar as cidades com energia elétrica, libertando-as dos candeeiros a gás, traria não só fama mas muito dinheiro. Foi desses laboratórios que surgiu a sua lâmpada incandescente, a qual já era muito pesquisada na época. Muitas versões dessas lâmpadas já tinham sido desenvolvidas por franceses, ingleses e russos. O projeto da lâmpada de Edison e do inglês Joseph Swan são muito semelhantes. O que difere no projeto dos dois são os filamentos. Edison utilizava fio extraído de bambu, enquanto Joseph Swan utilizava fio extraído do algodão. Como os projetos dos dois inventores eram semelhantes, eles entraram num acordo para vender seus produtos na Inglaterra.

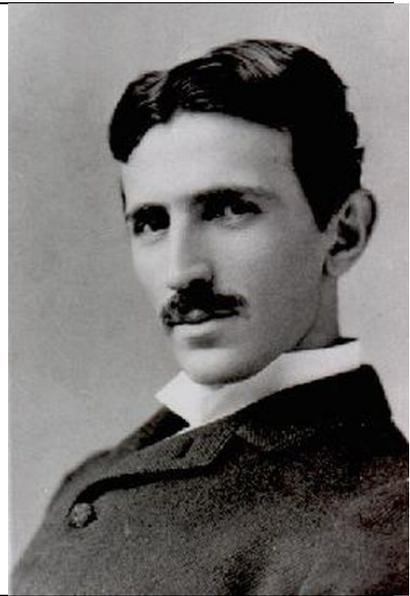
Thomas Edison não queria, entretanto, propor tão somente a lâmpada elétrica. Ele queria propor todo um sistema elétrico, ou seja, a geração de energia, distribuição e componentes do sistema elétrico como interruptores, receptáculos para lâmpadas e outros. Thomas Edison era um defensor da tensão contínua. Todo seu projeto de sistema elétrico era baseado em corrente contínua, porém não era possível aumentar a tensão contínua na época.

Sem o aumento da tensão, o gerador deveria estar muito próximo ao consumidor – pelos cálculos de Thomas Edson, por volta de 1,6 km. Em outras palavras, era necessária uma usina de geração de energia elétrica para cada região, num raio de 1,6 km. Somente os bairros ricos poderiam custear a geração e distribuição em tensão contínua. Além do mais, ia se criar uma forte dependência da geração de energia a partir de combustíveis fósseis. Foi nesta época que apareceu Nikola Tesla, um dos maiores gênios da ciência experimental que o mundo conheceu. Tesla defendia a corrente alternada, desde a geração até o consumidor final. Com a corrente alternada era possível variar o nível da tensão a partir de transformadores. Desta forma, com um potencial maior, a usina de geração poderia ser instalada a uma distância maior em relação ao consumidor final, pois, quanto maior o potencial, menor a corrente elétrica. Esta ideia foi bancada pelo empresário e Engenheiro George Westinghouse. Muita guerra publicitária foi utilizada para deter o desenvolvimento do sistema elétrico de corrente alternada. Nesta guerra, apelava-se para o risco de morte, com o fato de choques elétricos em corrente alternada serem mais altos que em corrente contínua. Até um elefante chegou a ser eletrocutado pelos técnicos de Edison em Coney Island. Foi por volta dessa época que também surgiu a cadeira elétrica que utilizava a corrente alternada para executar condenados.

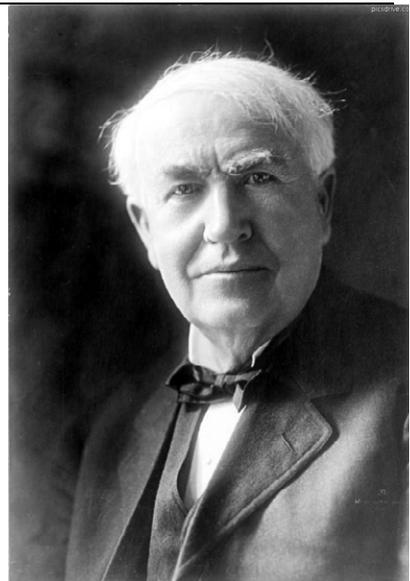
O sistema em corrente alternada traria, entretanto, a possibilidade de assistir muito mais consumidores, aumentando significativamente a viabilidade econômica em relação à corrente contínua. A corrente alternada ia realmente democratizar a energia elétrica. Em 1896, foi instalada a primeira usina hidrelétrica nas cataratas do Niágara, utilizando-se geradores de tensão alternada desenvolvidos por Tesla e Westinghouse. O sistema elétrico é gerado, transmitido e distribuído em corrente alternada, ou seja, da geração até nossos lares em corrente alternada, há mais de 120 anos. Vale destacar, porém, que a maioria das cargas elétricas residenciais atuais necessita de corrente contínua para seu funcionamento. São exemplos disso: lâmpadas a vapor eletrônicas, lâmpadas a led, televisores LCD e LED, computadores, sistemas de alarmes.

Nicola Tesla (1856-1943)

Cientista sérvio, nasceu na atual Croácia. Desenvolveu e propôs o sistema elétrico em tensão alternada polifásica. Foi dele o projeto do 1º gerador instalado nas cataratas do Niágara. São de sua autoria vários inventos como a bobina de Tesla. É o precursor da lâmpada de descarga, desenvolveu o transmissor de ondas de rádio e o controle remoto. Sua grande contribuição, porém, foi o motor de indução trifásico, que mais tarde foi desenvolvido e patenteado, numa versão mais comercial, por Mikhail Dolivo-Dobrovolsky. Mais de 95% dos motores dos processos industriais hoje são motores de indução. Este motor está na base de todo o desenvolvimento industrial do século XX. Sem família, morreu pobre, esquecido e cheio de manias, num quarto de hotel em Nova York, onde morava, de acordo com historiadores.

**Thomas Alva Edison (1847-1931)**

Cientista e empresário americano nascido no estado americano de Ohio. Edison unia o lado cientista ao lado empreendedor. São atribuídas a ele mais de 1000 patentes, por exemplo: lâmpadas incandescentes, fonógrafo, gravador de som, câmera de filmagem multi-quadros. Edison tinha uma equipe de cientistas trabalhando para ele no seu laboratório, chamado *Menlo Park* em Nova Jérsei. Esta equipe chegou a ser composta de mais de 100 cientistas. Para muitos, a maior contribuição de Edison foi o desenvolvimento do primeiro laboratório de iniciativa privada com intuito de desenvolver produtos de consumo. O que é uma característica de quase toda grande indústria de produção de bens: a presença de laboratórios de pesquisa e desenvolvimento.



2.5 Resistência elétrica

O leitor já deve ter percebido que há vários tubos para distribuição de água predial, de diâmetros maiores e menores. Qual o tubo que oferece a maior resistência à passagem de água: um de diâmetro de $\frac{1}{2}$ " ou um de diâmetro de 1"? Em sistemas elétricos é semelhante, há condutores que oferecem maior ou menor resistência à passagem da corrente elétrica.

Resistência elétrica é a dificuldade à passagem da corrente elétrica oferecida por um condutor. Um condutor possui uma resistência elétrica dada por (2.1). Percebe-se pela expressão (2.1) que, quanto maior o comprimento, maior a resistência, e quanto maior a seção

transversal, menor a resistência. A resistividade do cobre, a 20 °C, é de $\rho_{cu} = 1,68 \times 10^{-8} \Omega m$. Todo condutor possui uma certa resistência.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.1)$$

Onde:

ρ – Resistividade do material (depende do material e da temperatura)

l – Comprimento do condutor (m)

A – Área da seção transversal do condutor (mm^2)

A resistividade de alguns materiais a uma temperatura de 20 °C está disposta na Tabela 2.2. Observa-se que o material com menor resistividade é a prata, seguida do cobre. O cobre é o condutor mais atrativo em termos de custo e benefício para a indústria eletroeletrônica. Em algumas aplicações, no entanto, são utilizados a prata, o ouro ou o alumínio.

Tabela 2.2– Alguns materiais e suas resistividades a 20 °C

Material	Resistividade (Ωm) a 20 °C
Prata	$1,59 \times 10^{-8}$
Cobre	$1,68 \times 10^{-8}$
Ouro	$2,44 \times 10^{-8}$
Alumínio	$2,82 \times 10^{-8}$
Cálcio	$3,36 \times 10^{-8}$
Ferro	$1,00 \times 10^{-7}$
Chumbo	$2,20 \times 10^{-7}$
Aço Inox	$6,90 \times 10^{-7}$
Mercúrio	$9,80 \times 10^{-7}$
Água do Mar	Por volta de $2,00 \times 10^{-1}$
Água Potável	Por volta de $1,01 \times 10^3$
Vidro	$1,00 \times 10^{13}$
Ar	Por volta de $2,30 \times 10^{16}$
PET	$1,0 \times 10^{21}$
Teflon	$1,0 \times 10^{24}$

Outro tipo importante de resistência é a que está presente nos contatos elétricos. Por exemplo, num interruptor há uma resistência no contato quando tal contato está fechado. Existem muitos contatos elétricos em sistemas elétricos residenciais e industriais. Esses contatos vão se degradando ao longo do tempo e, conseqüentemente, aumentando sua resistência. Com esse aumento da resistência, a temperatura no contato elétrico se eleva, quando este está ligado. Isto é chamado no jargão técnico de “ponto quente”. Monitorar tais contatos é um dos atributos mais importantes da manutenção elétrica industrial.

As resistências, quando percorridas por corrente elétrica, geram calor. Quando este calor não é dissipado para o meio ambiente de forma eficiente, há aumento de temperatura da resistência. A resistência do chuveiro elétrico se aproveita deste efeito para gerar calor para

aquecer a água. A temperatura de um condutor ou de um contato, no entanto, pode chegar a valores acima do permitido, a ponto de, em alguns casos, fundir o condutor. Assim, todo condutor possui um corrente limite de condução. Acima desse valor limite, o condutor aquece de forma perigosa, causando perdas de energia elétrica. Os contatos elétricos possuem também corrente limite de condução. Por exemplo, os interruptores simples possuem capacidade de condução de até 10 A.

Unidade de medida	➡	Ohm (Ω)
Submúltiplos usuais	➡	miliohm ($m\Omega$), kilohm ($k\Omega$), megaohm ($M\Omega$)
Instrumentos de medição	➡	ohmímetro
Relações	➡	$1 \Omega = 10^3 m\Omega$, $1 k\Omega = 10^3 \Omega$, $1 M\Omega = 10^6 \Omega$

As resistências estão inseridas numa faixa muito grande, a qual vai desde alguns ohms, quando se quer medir continuidade, até milhões de ohms, ao se medir isolamento. Daí nasceram duas importantes definições que possuem como ponto em comum as resistências:

Condutores: são materiais que oferecem baixa resistência à passagem de corrente elétrica. São exemplos de condutores: fios de cobre e de alumínio, cabos de cobre, barras de cobre. Geralmente promovem a ligação de uma fonte a uma carga. São comuns condutores com resistências por volta de $0,1 \Omega$.

Isolantes: são materiais que oferecem muita resistência à passagem de corrente. Um exemplo de isolamento é a resistência entre o condutor de um motor e a sua carcaça. É comum termos, neste caso – entre o condutor de um motor e sua carcaça –, resistência por volta de $300 k\Omega$. Para se conseguir tais valores, utilizam-se fibras de polyester entre a bobina e a carcaça. Desta forma, observa-se que o que difere condutor de isolante é a faixa de resistência. O material isolante dos cabos dos alicates é outro exemplo.

Os ohmímetros mais comuns são os contidos nos multímetros, que podem ser analógicos ou digitais. A recomendação mais importante nas medições de resistências é que estas devem ser realizadas com circuitos desenergizados. Jamais se devem utilizar ohmímetros em circuitos energizados, pois isso pode danificar o instrumento, bem como oferecer perigo ao operador. Na Tabela 2.3 são mostrados alguns condutores elétricos de cobre, com isolamento PVC, utilizados em instalações elétricas, com a respectiva capacidade de condução de corrente nominal.

Tabela 2.3 – Alguns condutores elétricos de cobre com isolamento PVC utilizados em instalações prediais

Condutor	Capacidade de condução de corrente (A)
1,5 mm ²	14,5
2,5 mm ²	19,5
4,0 mm ²	26
6,0 mm ²	34

2.5.1 Teste de continuidade

O teste de continuidade visa medir resistências muito baixas. São exemplos de resistências baixas:

- A resistência entre os dois terminais de uma bobina de um motor;
- Os dois terminais de uma resistência de ferro de passar;
- A resistência dos dois terminais de um interruptor ligado.

Tais resistências são, na maioria das vezes, até 10Ω . Os multímetros comerciais possuem a opção de medição de continuidade. O teste de continuidade é um dos testes mais importantes nos procedimentos de manutenção. Com este teste, é possível verificar se o condutor está partido ou não.

Unidade de medida	➔	Ohm (Ω)
Instrumentos de medição	➔	Ohmímetros, multímetros

A maioria dos testes de continuidade possui um sinalizador auditivo para indicar que a continuidade está aceitável.

Como medir continuidade

Uma medição de continuidade segue necessariamente os seguintes passos:

- 1º passo** Certificar-se do desligamento do condutor cuja continuidade se quer medir.
- 2º passo** Escolher a escala apropriada do ohmímetro (multímetro).
- 3º passo** Realizar a medição encostando as pontas de provas nos terminais cuja continuidade se quer medir. É necessário evitar o contato da pele nas pontas de prova, pois tal contato pode alterar o valor medido.

2.5.2 Medição de isolamento

Isolação são resistências muito altas, na maioria das vezes, mais de $1.000.000 \Omega$ ($1 M\Omega$). É o que se espera encontrar entre os enrolamentos e a carcaça do motor, por exemplo. Se a isolação entre a carcaça e os condutores do motor for baixa, é sinal de que a carcaça será energizada quando o motor for ligado. Esta falha pode causar danos no motor ou até acidentes fatais com usuários. Por isto, verificar os níveis de isolamento é fundamental para a manutenção de equipamentos elétricos.

Unidade de medida	➔	megaohm ($M\Omega$)
Instrumentos de medição	➔	megômetro

Na Figura 2.9 são mostrados dois tipos de megômetros, o analógico (de gerador manual) e o digital.

Figura 2.9 – Megômetro (a) analógico e (b) digital



Como medir isolamento

Uma medição de isolamento eficiente segue necessariamente os seguintes passos:

- 1º passo** **Certificar se os terminais, cuja isolamento se quer medir, não estão energizados.**
- 2º passo** **Escolher a correta tensão CC de ensaio e ajustar o megômetro para este valor.** O valor da tensão de ensaio depende da tensão de trabalho do equipamento. Na Figura 2.7 (b), observa-se que o megômetro possui três tensões de ensaio 250 Vcc, 500 Vcc e 1000 Vcc.
- 3º passo** **Ligar os terminais nos pontos cuja isolamento se quer medir.** Deve-se esperar até o carregamento das capacitâncias parasitas – as normas recomendam 1 minuto ou 10 minutos. Observa-se que, durante este tempo, o valor medido aumenta até se estabilizar. É importante todas as medições serem padronizadas num mesmo tempo para leitura, pois tais medições servem de comparação para tomada de decisão quanto à deterioração da isolamento.
- 4º passo** **Deve-se ter cuidado especial ao se manipular o megômetro.** O megômetro gera uma tensão alta nas pontas de prova. Contato da pele com as pontas de prova pode causar choque desagradável.

Na Tabela 2.4, são mostradas as resistências de isolamento mínimas aceitáveis para isolantes sólidos e imersos em óleo, a 20 °C de temperatura do isolante em teste, de acordo com a norma ANSI/NETA ATS-2009. Na Tabela 2.5, é mostrado o fator de multiplicação de correção para outras temperaturas.

Tabela 2.4 – Resistência de isolamento mínima recomendada de acordo com a norma ANSI/NETA ATS-2009

Tensão nominal (V)	Tensão mínima de ensaio (Vcc)	Resistência de isolamento mínima recomendada (MΩ)
250	500	25
600	1.000	100
1000	1.000	100
2.500	1.000	500
5.000	2.500	1.000
8.000	2.500	2.000
15.000	2.500	5.000
25.000	5.000	20.000
34.500 e acima	15.000	100.000

Tabela 2.5 – Fator de correção de temperatura para resistência de isolamento de acordo com a norma ANSI/NETA ATS-2009

Temperatura (°C)	Isolante imerso em óleo	Isolantes sólidos
20	1	1
25	1,40	1,25
30	1,98	1,58
35	2,80	2,00
40	3,95	2,50
45	5,60	3,15
50	7,85	3,98
55	11,20	5,00
60	15,85	6,30
65	22,40	7,90
70	31,75	10,00
75	44,70	12,60
80	63,50	15,80
85	89,79	20,00
90	127,00	25,20
95	180,00	31,60
100	254,00	40,00

Por exemplo, a resistência de isolamento de um motor com tensão nominal de 380 V foi medida para uma tensão de ensaio 1000 V, resultando em 130 MΩ, a uma temperatura do motor de 40 °C. Qual o valor de resistência referente a uma temperatura do isolante de 20 °C?

$$R_{20} = 2,50R_{40}$$

$$R_{20} = 325 \text{ M}\Omega$$

De acordo com esta norma, o valor da resistência de isolamento está acima do mínimo recomendado, não necessitando de intervenção da manutenção.

Observação importante é que as Tabelas 2.4 e 2.5 apresentadas são recomendações que devem ser aplicadas na ausência de outras recomendações e normas prioritárias. A norma ABNT NBR 5383-1:2002, para motores de indução, que segue as recomendações da antiga IEEE 43, em que o valor mínimo de resistência a 40 °C, é expressa em (2.2) em $M\Omega$, para medição em 1 minuto.

$$R_{\text{mínima}} = (kV) + 1 \quad (2.2)$$

O valor medido a uma temperatura T (°C), R_{mT} , deve ser corrigido para 40 °C de referência pela expressão (2.3).

$$R_{m40} = R_{mT} (0,5^{(40-T)/10}) \quad (2.3)$$

Por exemplo, a resistência entre duas fases de um motor 380 V resultou em 20 $M\Omega$ a 60 °C.

$$R_{\text{mínima}} = 1,38 \text{ M}\Omega$$

$$R_{m40} = 20 (0,5^{(40-60)/10}) = 80 \text{ M}\Omega \text{ (muito acima do valor mínimo)}$$

2.5.3 Resistores para circuitos eletrônicos

Os resistores utilizados em circuitos eletrônicos possuem uma faixa muito grande de disponibilidade. Encontram-se resistores de 1 Ω até na faixa de centenas de $M\Omega$. Esses componentes possuem um código de cores para sua identificação. Existem duas maneiras para sua identificação: por esse código de cores ou pela sua medição a partir de um ohmímetro. Na Figura 2.10, é mostrado o código de cores dos resistores.

Figura 2.10 – Código de cores dos resistores

Cores	1ª Faixa	2ª Faixa	3ª Faixa	Multiplicador	Tolerância
Preto	0	0	0	X 1Ω	
Marron	1	1	1	X 10Ω	+/- 1%
Vermelho	2	2	2	X 100Ω	+/- 2%
Laranja	3	3	3	X 1kΩ	
Amarelo	4	4	4	X 10kΩ	
Verde	5	5	5	X 100kΩ	+/- 0,5%
Azul	6	6	6	X 1MΩ	+/- 0,25%
Violeta	7	7	7	X 10MΩ	+/- 0,10%
Cinza	8	8	8		+/- 0,05%
Branco	9	9	9		
Dourado				X 0,1Ω	+/- 5%
Prateado				X 0,01Ω	+/- 10%

Um resistor que possui as cores Preto, Preto, Marrom, Laranja, Vermelho, por exemplo, é um resistor de 1 KΩ com uma tolerância de +/- 2%.

PRÁTICAS NA SALA DE AULA

- Pesquise: Por que o corpo humano, composto praticamente de água e carbono, dois isolantes, conduz corrente elétrica?
- Meça a resistência de um ferro de passar.
- Meça a resistência entre os terminais de um grupo de bobinas de condutores elétricos de um motor.
- Meça a resistência de um resistor utilizado para circuito eletrônico e compare com o valor determinado pelo código de cores.
- Fazendo analogia com o cano de água: quanto maior a espessura do condutor maior ou menor sua resistência?
- Utilize um megômetro digital para medir a isolação entre um terminal de um motor e a carcaça, para o tempo de 1 minuto.
- Utilize o megômetro para medir os terminais de um interruptor desligado, em 1 minuto.
- Teste a continuidade entre os dois terminais de uma mesma bobina.
- Teste a continuidade entre dois terminais de uma resistência de chuveiro.
- Teste a continuidade entre dois terminais de uma resistência de ferro de passar.
- Por que a resistividade da água do mar é menor que a da água potável?

2.5.4 Variação da resistência com a temperatura

Para a grande maioria dos materiais, as resistências elétricas apresentam um comportamento variável com a temperatura. Os metais, por exemplo, aumentam sua resistência elétrica com o aumento da temperatura. Este comportamento é descrito pelo coeficiente de temperatura α . O coeficiente de temperatura é mostrado na expressão (2.4); sua dimensão é $1/^\circ\text{C}$. A expressão (2.4) mostra que o coeficiente de temperatura depende da própria temperatura. Na prática, no entanto, admite-se o coeficiente constante, ou seja, a variação da resistência com a temperatura é linear.

Na Tabela 2.6, são mostrados alguns valores de coeficiente de temperatura. Os metais apresentam coeficiente positivo e uma variação positiva da resistência com a temperatura (quanto maior a temperatura maior a resistência). Observa-se, nesta tabela, que o material *constantan*, uma liga de cobre e níquel, possui um coeficiente de temperatura quase nulo, apresentando uma resistência elétrica quase invariável com a temperatura. Algumas aplicações exigem resistência invariante com a temperatura – caso de alguns sensores térmicos termopares. Os materiais que apresentam coeficiente de temperatura negativa apresentam também uma variação de sua resistência negativa com a temperatura (quanto maior a temperatura menor a resistência).

Tabela 2.6 – Coeficiente de temperatura de alguns materiais

Material	Coeficiente de temperatura $1/^\circ\text{C}$ a 20°C
Alumínio	0,00430
Cobre	0,00404
Prata	0,00381
Ouro	0,00371
Aço	0,00300
Mercúrio	0,0009
Constantan	0,00003
Germânio	-0,048
Carbono	-0,0005
Silício	-0,075

$$\alpha = \frac{R(T) - R(T_0)}{T - T_0} \frac{1}{R(T_0)} \quad (2.4)$$

2.5.5 Resistências variáveis – Potenciômetros e reostatos

Uma categoria de resistência presente nos circuitos eletrônicos de muitos equipamentos é a resistência variável. Essas resistências variáveis possuem três terminais; os dois terminais extremos têm resistência fixa, e o terminal central possui um contato físico deslizante pela ação do operador. Desta forma, o operador varia a resistência entre um dos terminais da extremidade e o central, como mostra a Figura 2.11. A resistência fixa é a especificação da resistência variável, por exemplo, resistência variável de 100 Ω , 1 k Ω , 10 k Ω e outros. Tanto o potenciômetro quanto o reostato, mostrados na Figura 2.12, possuem o mesmo princípio. Os potenciômetros são voltados para circuitos eletrônicos de baixa potência com correntes na ordem de miliampères. Já os reostatos são mais robustos, projetados para conduzir correntes por volta de alguns ampères. Os reostatos são destinados para alimentação dos campos magnéticos das máquinas de corrente contínua, daí a expressão “reostato de campo”. Variando a corrente desses campos, é possível variar a velocidade da máquina, como um acelerador de um carro. Aliás, muitos dos aceleradores dos veículos são resistências variáveis como um potenciômetro, como pode ser visto na Figura 2.13, com seu devido esquema de ligação com a ECU (Engine Control Unit) do veículo. Quando se acelera, o que se está fazendo é variar uma resistência, e esta variação é interpretada pelo computador do veículo para injetar mais ou menos combustível na câmara de combustão.

Figura 2.11 – Esquema do potenciômetro ou reostato

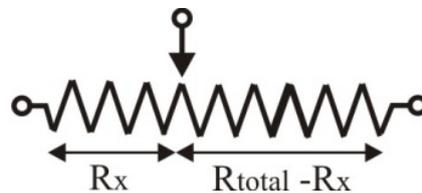


Figura 2.12 – (a) Potenciômetro de 10 k Ω ; (b) Reostato de campo de 1,6 A / 600 W

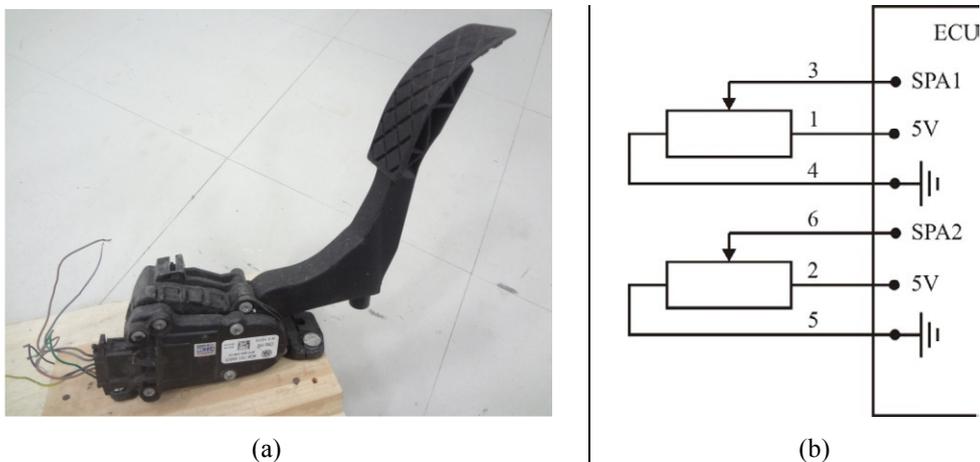


(a)



(b)

Figura 2.13 – (a) Acelerador de um veículo com resistência variável; e
(b) Esquema de ligação dos seus dois potenciômetros



2.5.6 Resistências não lineares

O efeito da temperatura oferece uma característica não linear às resistências, como observado na expressão (2.2). A corrente aquece o condutor, aumentando sua temperatura e variando, conseqüentemente, sua resistência. Os filamentos das lâmpadas incandescentes são exemplos desta não linearidade ocasionada pela temperatura. No entanto, existe uma categoria de resistores que varia sua resistência com a variação da tensão elétrica. À medida que aumenta a tensão elétrica, sua resistência diminui. Uma aplicação desta característica são os varistores (resistores variáveis), que diminuem a resistência com o aumento da tensão, mostrado na Figura 2.14 (a). Seu símbolo é mostrado na Figura 2.14 (b).

Os varistores são utilizados como dispositivos de proteção contra surtos de sobretensão, ao contrário dos fusíveis e disjuntores, que oferecem proteção contra surtos de sobrecorrente. Disjuntores e fusíveis são objetos de estudo no Capítulo 7. Um esquema básico de utilização dos varistores é mostrado na Figura 2.15 (a).

Um surto de sobretensão oriundo da fonte de tensão – por exemplo, uma descarga atmosférica atingindo a rede de distribuição – faz com que o varistor reduza rapidamente sua resistência. Esses surtos podem atingir milhares de volts de forma muito rápida, o que poderia causar danos irreversíveis ao circuito eletrônico, muitas vezes delicado. Três efeitos são observados neste caso:

- I. Uma alta corrente circula pelo varistor, em muitos casos queimando-o. Esse efeito é praticamente um curto-circuito.
- II. A tensão no circuito permanece em níveis seguros, evitando danos mais graves a este circuito.
- III. O fusível ou disjuntor de proteção atua devido à alta corrente no varistor.

Na Figura 2.15 (b) é mostrado num varistor comercial.

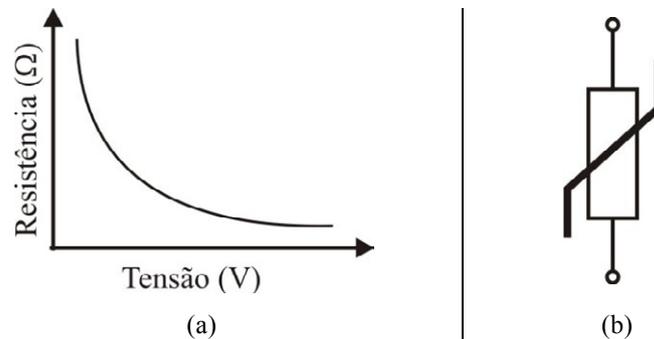
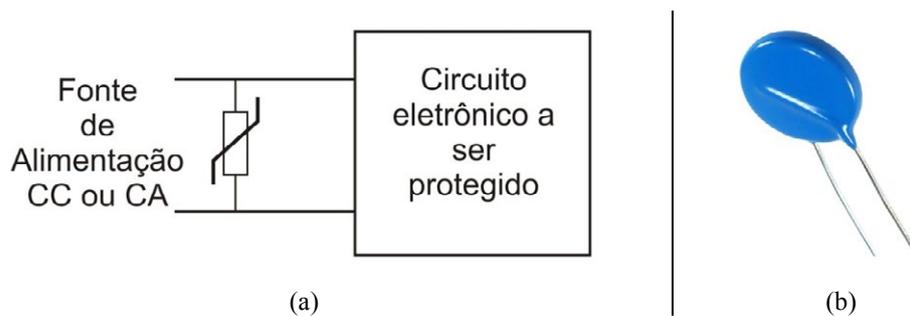
Figura 2.14 – (a) Característica de resistência *versus* tensão do varistor; (b) Símbolo do varistor

Figura 2.15 – (a) Esquema de utilização do varistor; (b) Varistor comercial



2.6 Potência elétrica ativa

Potência é a intensidade em que a energia está sendo consumida. Imagine duas pessoas que levaram 20 kg de peso ao longo de 50 metros, uma andando e outra correndo. As duas consumiram a mesma energia no percurso. A segunda, no entanto, em menor intervalo de tempo, consumiu energia com muito mais intensidade. Diz-se, neste caso, que a potência dissipada da segunda pessoa é maior que a da primeira. Nos sistemas elétricos acontece o mesmo. Uma carga é mais potente que outra quando gasta a mesma energia em menor intervalo de tempo. Por exemplo, uma lâmpada de 100 watts gasta a mesma quantidade de energia de uma lâmpada de 50 watts na metade do tempo.

Unidade de medida	➡	watts (W)
Submúltiplos usuais	➡	miliwatts (mW), kilowatts (kW), megawatts (MW)
Instrumentos de medição	➡	wattímetro

As unidades de potência cv (*Cavalo Vapor*) e hp (*Horse Power*) são comuns aos equipamentos que operam dentro dos processos industriais. Observa-se, a seguir, como se relacionam as diversas unidades e submúltiplos.

- 1 cv = 735,5 W
- 1 hp = 745,7 W
- 1 kW = 1.000 W
- 1 MW = 1.000.000 W

Nas cargas resistivas, caso dos chuveiros elétricos, ferros de passar, lâmpadas incandescentes, fornos resistivos, vale a expressão (2.5) – potência é igual a tensão multiplicada pela corrente –, tanto em sistemas de corrente contínua quanto em sistemas de corrente alternada. Pela expressão (2.5), pode-se determinar a corrente de uma carga com potência conhecida, operando numa tensão também conhecida. Nessa expressão, a potência é expressa em [W], corrente em [A] e tensão em [V].

$$P = vi \quad (2.5)$$

Um wattímetro analógico é mostrado na Figura 2.16. O wattímetro necessita das ligações de tensão e corrente da carga cuja potência ativa se quer medir. Ademais, deve-se respeitar a correta ligação que é mostrada no manual do instrumento. Na Figura 2.16, os bornes pretos são destinados à ligação de tensão e os vermelhos são destinados à corrente elétrica.

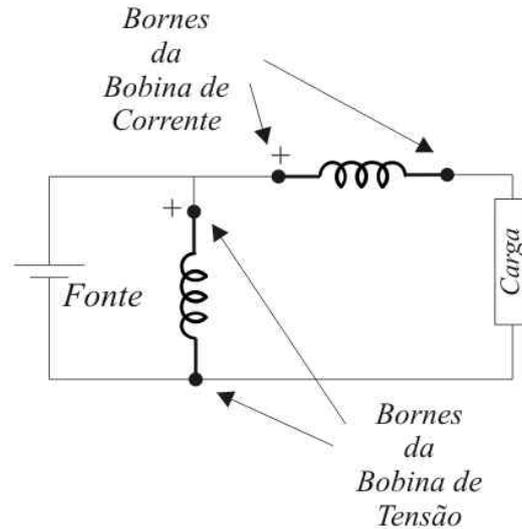
Figura 2.16 – Wattímetro do tipo analógico



Como medir potência com wattímetro

- 1º passo** Certificar-se se a carga cuja potência se quer medir não está energizada.
- 2º passo** Ter noção da ordem de grandeza da potência a ser medida. Esta ordem de grandeza vem do conhecimento da carga, a partir da sua placa de identificação ou informações de manuais.
- 3º passo** Ligar a bobina de corrente do equipamento em série e a bobina de tensão do equipamento em paralelo, respeitando-se a polaridade de ambas, como mostra a Figura 2.17.
- 4º passo** Escolher a escala apropriada.
- 5º passo** Ligar a carga elétrica e realizar a leitura.

Figura 2.17 – Esquema de ligação do wattímetro



Em alguns instrumentos, a bobina de corrente é medida com um alicate, não precisando assim desconectar a carga. Isto abre a possibilidade de realizar as conexões com a carga energizada. Este procedimento de conexão da bobina de tensão com a carga ligada deve ser acompanhado com todo o cuidado.

2.6.1 Demanda elétrica, Potência instalada e Potência média

O leitor pode observar as cargas elétricas da sua residência, lâmpadas elétricas, TV, geladeira e outras. Observe que nem sempre todas as cargas estão ligadas ao mesmo tempo. Existe um instante em que a potência consumida na residência é máxima. Esta potência máxima, ou demanda, não necessariamente corresponde ao somatório de todas as cargas. Na Figura 2.18 é mostrado o gráfico da potência consumida durante um dia (24 horas) numa residência. Às 20 horas, o sistema alcançou a potência máxima, no caso de 800 W.

Define-se demanda como **“a potência máxima que um sistema elétrico consumiu num determinado instante.”** É para este valor de demanda que os condutores são dimensionados. Já a potência instalada é **“o somatório de todas as potências nominais de todas as cargas”**. É de se esperar que a demanda seja menor que a potência instalada. A razão entre a demanda e a potência instalada é conhecida como fator de demanda da instalação, como mostra a expressão (2.6). Vemos na Tabela 2.7 o fator de demanda para iluminação e tomadas residenciais extraído da ND-5.1, da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), para fins de projeto. Essa tabela orienta projetistas na hora de dimensionarem condutores, disjuntores e definir o tipo de fornecimento. Se o projeto fosse realizado pela carga instalada, haveria sobredimensionamento e, conseqüentemente, um custo maior de instalação.

$$\frac{D}{P_i} = F_d \quad (2.6)$$

Figura 2.18 – Potência consumida por uma residência durante um dia

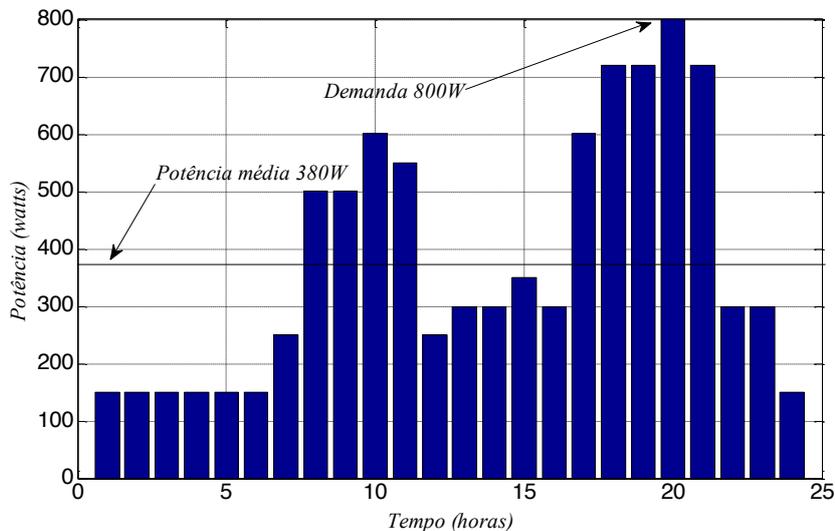


Tabela 2.7 – Fator de demanda extraído da ND-5.1 CEMIG

P_i – Potência instalada (kW)	F_d – Fator de Demanda
$P_i \leq 1,0$	0,86
$1,0 < P_i \leq 2,0$	0,81
$2,0 < P_i \leq 3,0$	0,76
$3,0 < P_i \leq 4,0$	0,72
$4,0 < P_i \leq 5,0$	0,68
$5,0 < P_i \leq 6,0$	0,64
$6,0 < P_i \leq 7,0$	0,60
$7,0 < P_i \leq 8,0$	0,57
$8,0 < P_i \leq 9,0$	0,54
$9,0 < P_i \leq 10,0$	0,52
$10,0 < P_i$	0,45

A potência média ou demanda média é “**um valor constante de potência que consome a mesma energia que a instalação**”. Este valor é determinado pela média que é calculada pela expressão (2.7), se for estipulado em horas. Esta potência média é utilizada para determinar a energia consumida durante o dia. É utilizada pela concessionária de energia para cobrar o consumo de energia.

$$P_m = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_{24}}{24} \quad (2.7)$$

PRÁTICAS NA SALA DE AULA

- Leia a potência de um motor monofásico na sua placa de identificação.
- Leia a potência de chuveiro elétrico na sua placa de identificação. Determine a corrente desse chuveiro operando sob a tensão nominal, utilizando a expressão (2.3).
- Leia a potência de um ferro de passar e determine sua corrente operando sob a tensão nominal.
- Leia a potência de uma lâmpada incandescente e determine sua corrente operando sob a tensão nominal.
- De todas as cargas lidas, qual a que gasta mais energia elétrica, se ligadas num mesmo período de tempo?
- Meça a potência de uma lâmpada incandescente com um voltímetro e um amperímetro.
- Meça a potência de um motor ligado com um wattímetro.

2.7 Potência elétrica reativa

Algumas cargas necessitam de campos magnéticos, bobinas de fios condutores por onde circula corrente elétrica. Um exemplo clássico da utilização dos campos magnéticos são os motores elétricos. Os motores elétricos necessitam dos campos magnéticos para realizarem a conversão eletromecânica de energia, ou seja, transformar energia elétrica em mecânica. A potência elétrica destinada à alimentação desses campos magnéticos é chamada de potência reativa. Campo magnético é uma região do espaço onde se evidenciam fenômenos magnéticos. É necessário energia para criar este campo. Campo magnético será foco do capítulo destinado a grandezas magnéticas.

A potência destinada a alimentar esses campos não é consumida, mas sim uma energia que transita entre a fonte e a carga, de forma alternada. Essa energia vai da fonte até a carga e volta para a fonte 60 vezes por segundo. Apesar de não ser consumida, essa potência flui pelos condutores entre a fonte e a carga. Tal potência só existe nos circuitos de corrente alternada.

Unidade de medida		volt-ampère reativo (VAr)
Submúltiplos usuais		kilovolt-ampère reativo (kVAr), megavolt-ampère reativo (MVar)
Instrumentos de medição		wattímetro reativo ou indiretamente com um wattímetro

Alguns multímetros possuem o recurso de medir diretamente o reativo de uma carga. Com o wattímetro, um voltímetro e um amperímetro, é possível realizar a leitura indireta da potência reativa, aproveitando a relação (2.8). Essa relação só faz sentido se o sistema é corrente alternada.

$$Q = \sqrt{(vi)^2 - P^2} \quad (2.8)$$

PRÁTICA NA SALA DE AULA

- Ligue um motor elétrico monofásico e realize a medida de potências Ativa, Reativa e Aparente.
-

2.8 Fator de potência

Fator de potência [$\cos\varphi$] de uma carga é a fração da potência total que chega à carga, que realmente é consumida (utilizada). Por exemplo, um fator de potência de 0,8 implica que 80% de toda potência que chega até a carga está sendo consumida, transformada em calor, trabalho, luz; o resto é energia reativa, destinada à alimentação dos campos magnéticos. A expressão (2.9) é utilizada para determinar o fator de potência da carga.

$$\cos(\varphi) = \frac{\text{potência Ativa}}{\text{Potência Total}} = \frac{p}{vi} \quad (2.9)$$

Unidade de medida		adimensional
Submúltiplos usuais		0 a 1,0
Instrumentos de medição		cofasímetro, mostrado na Figura 2.19 (b) ou indiretamente por wattímetro

Para saber o percentual de energia reativa [$\text{sen}\varphi$], aplica-se a expressão (2.10).

$$\text{sen}(\varphi) = \sqrt{1 - \cos(\varphi)^2} \quad (2.10)$$

Obs.: Energia reativa e fator de potência somente estão presentes se a fonte de tensão for alternada. Em tensão contínua toda potência é ativa.

Uma das cargas mais críticas quanto ao fator de potência é o motor de indução. O fator de potência do motor de indução varia muito de acordo com a potência do motor e seu carregamento. Em geral, o motor de indução em vazio (sem carga) possui fator de potência muito baixo, por volta de 0,2, e a plena carga, por volta de 0,80. Para valores mais precisos, é necessário consultar o catálogo dos fabricantes de motores.

As concessionárias de energia elétrica estipulam os valores mínimos de fator de potência aceitável. No Brasil, o valor de 0,92 é o mínimo permitido pelas concessionárias. Abaixo desse valor, a concessionária estipula multas para o consumidor. O entendimento da concessionária é que a potência reativa, que circula da fonte à carga, sobrecarrega seu sistema (condutores, transformadores), sem necessidade. A energia reativa pode ser gerada no local onde a carga está, sem a necessidade da disponibilização por parte da concessionária.

Aos consumidores residenciais não é cobrado fator de potência.

PRÁTICAS NA SALA DE AULA

- Uma carga possui um fator de potência $\cos\varphi = 0,8$. Determine o percentual de reativo dessa carga.
 - Meça o fator de potência de um motor monofásico ligado.
 - Nesse mesmo motor, meça a potência reativa e ativa.
-

2.9 Energia elétrica

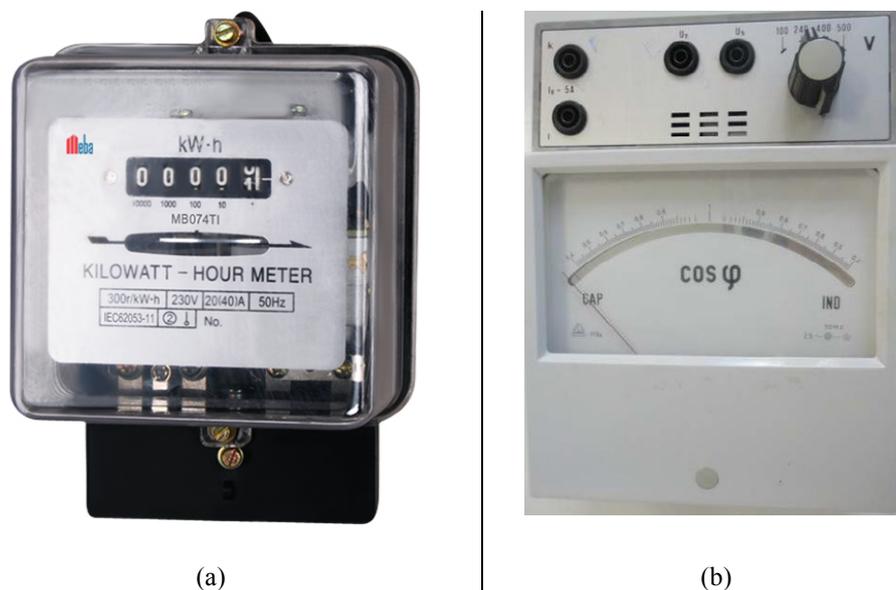
A energia elétrica é o total da energia consumida por uma carga, num determinado tempo de utilização. Essa energia elétrica é determinada pelas concessionárias, para finalidade de cobrança pela utilização da referida energia. Observe que energia necessita de carga (potência) e tempo de utilização. A concessionária de energia elétrica geralmente utiliza um mês de utilização para sua faturação. A expressão para determinação da energia elétrica é mostrada em (2.11).

$$W = \text{potência Ativa} \times \text{tempo de utilização} \quad (2.11)$$

Unidade de medida		kilowatt hora (kWh), joule (J)
Instrumentos de medição		medidor de energia elétrica

Assim, um chuveiro elétrico de 4000 watts, utilizado durante 10 horas no mês, gastará 40 kWh. Um medidor monofásico analógico é mostrado na Figura 2.19 (a).

Figura 2.19 – (a) Medidor de energia elétrica monofásico residencial analógico e (b) Medidor de fator de potência



Tarifa de consumo é o preço cobrado pelo uso da energia elétrica pela concessionária de energia local. Essa tarifa varia de acordo com o tamanho do consumidor, tipo de consumidor, região, período do ano. Por exemplo, a tarifa de energia elétrica residencial está por volta de 0,50 R\$/kWh, variando muito de estado para estado e também de consumo mensal (quem consome mais possui uma tarifa maior). É bom lembrar que, na composição da fatura de energia elétrica, além de se pagar o consumo, paga-se uma série de impostos e serviços, conforme mostrado na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Composição da fatura de energia elétrica residencial

Item	Para onde vai?
Consumo de energia	Concessionária
PIS (Programa de Integração Social)	Contribuição Federal
COFINS (Contribuição para Financiamento da Seguridade Social)	Contribuição Federal
ICMS (Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviço)	Imposto Estadual
Serviço de Iluminação Pública	Encargo Municipal

PRÁTICAS NA SALA DE AULA

- Qual a energia consumida por um chuveiro elétrico de 4000 W, ligado durante 1 hora por dia, durante 1 mês?
 - Qual a energia consumida por um ferro de passar de 1500 W, ligado durante 1/2 hora por dia, durante 1 mês?
 - Qual a energia consumida por uma lâmpada de 100 W, ligada durante 1 hora por dia, durante 1 mês?
 - Se a tarifa da concessionária for de 0,40 R\$/kWh, quanto o consumidor pagará por cada carga acima?
 - Desenhe os esquemas de ligação de um medidor de energia elétrico monofásico e trifásico.
-

2.10 Capacitores

Os capacitores são componentes utilizados para armazenar cargas elétricas, como já foi mencionado no capítulo anterior. Os capacitores são fundamentais, desde circuitos elétricos de baixa potência até sistemas elétricos de alta potência. Para medição de capacitância, utiliza-se frequentemente o multímetro. Alguns multímetros possuem a função de medição de capacitâncias.

Os capacitores eletrolíticos, já tratados no capítulo anterior, possuem terminais Anodo (+) e Catodo (−) definidos os quais precisam ser respeitados nas ligações.

Unidade de medida		farad (F)
Submúltiplos usuais		milifarad (mF), microfarad (μF)
Instrumentos de medição		capacímetro ou indiretamente com wattímetro, amperímetro e voltímetro.

PRÁTICAS NA SALA DE AULA

- Leia a capacitância de capacitor fornecido pelo professor.
 - Leia a capacitância de dois capacitores iguais em série e leia a capacitância de dois capacitores em paralelo. Registre sua conclusão a respeito dessas leituras. Desenhe os esquemas de ligação de um medidor de energia elétrico monofásico e trifásico.
-

2.11 Grandezas não elétricas importantes

Algumas grandezas não elétricas são muito importantes para o técnico que lida com manutenção de sistemas elétricos e mecânicos. São elas: a temperatura e a espessura. Em muitas atividades de manutenção essas grandezas estão presentes, influenciando, inclusive, em importantes tomadas de decisão.

2.11.1 Temperatura

Unidade de medida	→	graus Celsius (°C)
Instrumentos de medição	→	termômetros

Todo equipamento que utiliza energia elétrica possui perdas de energia. Tais perdas provocam dissipação de calor. Quando o equipamento está gerando mais calor que a sua capacidade de dissipação para o meio ambiente, sua temperatura aumenta. Este calor é gerado por efeito Joule, ou seja, corrente passando por resistência. Na expressão (2.12), é mostrada a potência gerada por corrente passando por uma resistência. Observe que, aumentando a corrente, o efeito sobre a potência transformada em calor aumenta pelo quadrado. Aumentando-se a resistência, também se aumenta a potência transformada em calor.

$$p = r i^2 \quad (2.12)$$

O aumento da temperatura de trabalho pode estar associado a uma falha. Falha, às vezes, não implica parada de operação, no entanto, pode ser seu prenúncio. São exemplos de problemas que podem acarretar aumento de temperatura:

Aumento da corrente

Causas: Motor com sobrecarga ou com rotor bloqueado, aumento de carga sem critério.

Efeito: Aumento de temperatura nos condutores e nos contatos físicos.

Aumento da resistência de contato das conexões

Causa: deterioração do contato de interruptores, chaves e disjuntores.

Efeito: Aumento de temperatura desses componentes.

Resistência do condutor alta

Causa: Condutor subdimensionado para uma determinada corrente.

Efeito: Aumento da temperatura do condutor.

Aumento da temperatura de rolamentos

Causa: Desgaste pelo tempo de utilização do rolamento.

Efeito: Aumento de temperatura do rolamento, devido ao atrito.

Aumento da temperatura da carcaça de motores

Causa: Harmônicos de tensão dos inversores que alimentam os motores.

Efeito: aumento de temperatura do motor.

A temperatura é um dos indicativos de falhas mais eficientes em manutenção de equipamentos elétricos. Um equipamento, operando com uma temperatura acima da especificada, implica que o equipamento já está sob falha latente. Dois tipos de falhas são observadas em equipamentos elétricos:

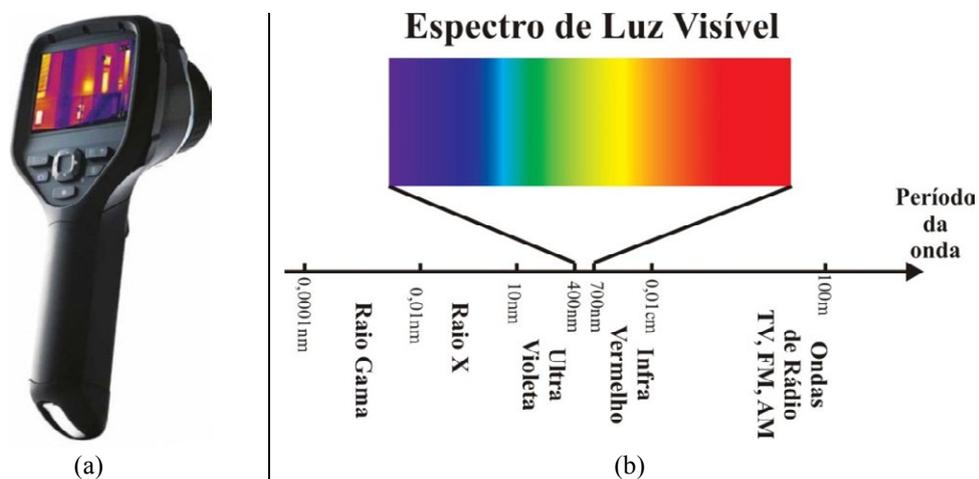
Falha Latente: Aquela falha que existe, mas o equipamento ainda se encontra operando.

Falha Concreta: Implica parada de operação do equipamento. É necessário atentar para o fato de que uma falha latente pode se transformar em falha concreta, se não for resolvida previamente.

Assim, o acompanhamento da temperatura de operação dos equipamentos é importante, pois mostra uma falha concreta em andamento. Se o equipamento ainda estiver em funcionamento, é possível o planejamento da manutenção, ou seja, uma manutenção preventiva, que busca evitar uma parada não programada. A temperatura nesse caso é um dos itens mais observados dentro da manutenção preventiva. A temperatura pode ser medida por termômetros de mira laser ou por termômetros baseados em termopares.

Um recurso muito importante para a manutenção de sistemas elétricos prediais e industriais é o termovisor, visto na Figura 2.20 (a). Diferente do termômetro de mira laser que lê a temperatura em um determinado ponto, o termovisor apresenta a distribuição de temperatura numa área.

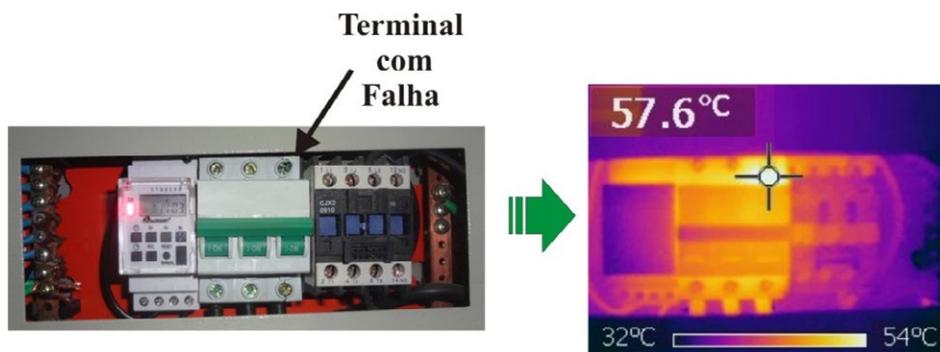
Figura 2.20 – (a) Termovisor comercial; (b) Espectro das ondas eletromagnéticas



O princípio da termovisão reside no fato de que todos os corpos com temperatura acima do zero absoluto emitem raios infravermelhos. Radiação infravermelha é uma onda eletromagnética (Luz) cuja frequência está abaixo da cor vermelha, portanto fora da faixa de luz visível ao ser humano, como mostrado na Figura 2.20 (b). Quanto maior a temperatura, mais radiação infravermelha o corpo irradia. O termovisor mostra, então, a distribuição de temperatura a partir da irradiação desses raios infravermelhos, sendo possível uma fotografia da distribuição de temperatura. É mostrado na Figura 2.21 um exemplo típico de aplicação de um termovisor, identificando-se falhas latentes num quadro de distribuição.

Na Figura 2.21, a partir da termovisão, detecta-se uma falha latente num terminal de um disjuntor trifásico. O aquecimento de um terminal, numa temperatura acima dos outros terminais, mostra que existe algum problema latente que pode se transformar numa falha concreta. Tal falha concreta poderia, por exemplo, gerar um incêndio no quadro de distribuição, acarretando danos físicos e financeiros para a organização. Nesse caso em particular, a falha latente pode ter diversas origens, como problema no contato físico do terminal, desequilíbrio de cargas alimentadas pelo disjuntor, entre outras. Com a constatação de que existe a falha latente, cabe à manutenção pesquisar, descobrir e sanar tal falha. Neste simples exemplo, percebe-se quão importante é a temperatura dos componentes e equipamentos para a manutenção de sistemas elétricos.

Figura 2.21 – Terminal de um disjuntor com falha latente



A geração de calor está muito presente nos processos industriais, veículos automotores, aviões. O controle dessa geração de calor bem como da dissipação exige a leitura de temperatura por parte dos computadores dedicados que controlam tais processos. É com as informações de temperatura que os computadores vão tomar decisões como, por exemplo, ligar um ventilador para baixar a temperatura de uma estrutura. Os computadores, no entanto, são dispositivos elétricos que entendem somente grandezas elétricas, logo é necessário converter a temperatura em sinais de grandeza elétrica. Essa conversão é função dos sensores de temperatura ou transdutores de temperatura. Os sensores de temperatura mais comuns e suas características são descritas a seguir:

Termistores

NTC (*Negative Temperature Coefficient*) / PTC (*Positive Temperature Coefficient*)

Os termistores são sensores cuja resistência varia de acordo com a temperatura. No caso dos NTC a resistência diminui com o aumento da temperatura. No caso do PTC a resistência aumenta com o aumento da temperatura. Na leitura de temperatura nos veículos automotores, por exemplo, é mais comum a utilização de NTC. Os termistores são elementos que utilizam materiais semicondutores como os transistores e diodos. Além de leitura de temperatura, o NTC pode ser utilizado para proteção contra picos de corrente em equipamentos. Configura na Figura 2.22 (a), um pouco adiante, a imagem de um NTC comercial.

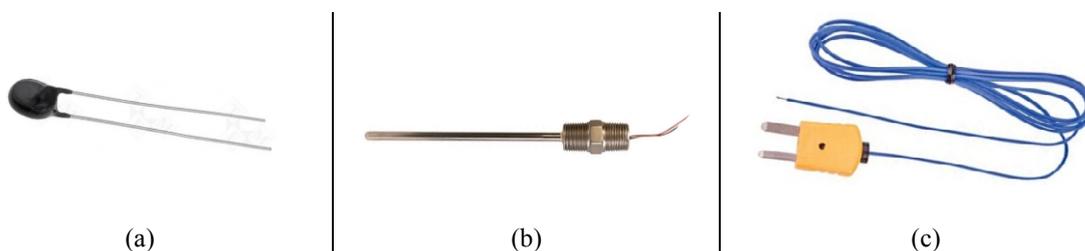
RTD (*Resistance Temperature Detectors*)

São sensores que variam sua resistência com a variação da temperatura. Diferem dos termistores por serem compostos de metais não semicondutores, níquel, cobre ou platina, e possuírem somente coeficiente de temperatura positivo. Possuem faixa de temperatura mais larga que a dos termistores, boa estabilidade e repetibilidade. Em algumas aplicações em que se faz necessário temperaturas muito altas, os RTD são preferíveis aos termistores. A RTD mais popular é o PT100, mostrado na Figura 2.22 (b), que possui uma resistência de $100\ \Omega$ a $0\ ^\circ\text{C}$ e uma faixa de $-60\ ^\circ\text{C}$ a $570\ ^\circ\text{C}$.

Termopar

O termopar é uma junção de dois materiais que geram uma pequena tensão dependente da temperatura. Diferente dos outros sensores que necessitam de uma fonte externa e na maioria dos casos um divisor de tensão, os termopares geram sua própria tensão, resultado do efeito Seebeck já enfocado. São menos precisos que os termistores e RTD, mas trabalham numa larga faixa de operação. Possuem coeficiente positivo por volta de $50\ \mu\text{V}/^\circ\text{C}$. O termopar mais popular é o Tipo K, mostrado na Figura 2.22 (c), com faixa de operação de $300\ ^\circ\text{C}$ a $1200\ ^\circ\text{C}$.

Figura 2.22 – Sensores de temperatura: (a) NTC; (b) PT100; (c) Termopar



PRÁTICAS NA SALA DE AULA

- Leia a temperatura de um interruptor ligado com termômetro de mira laser.
- Leia a temperatura de dos terminais de uma lâmpada elétrica ligada com termômetro de mira laser.

2.11.2 Espessura

Espessuras sempre estão presentes dentro da manutenção. A medição de diâmetro de condutores e eletrodutos, espessura de fibras isolantes, são alguns dos muitos procedimentos de manutenção. Tal procedimento é feito a partir de:

Unidade de medida	➔	centímetro (cm) ou milímetro (mm)
Instrumentos de medição	➔	micrômetro e paquímetro

Na Figura 2.23 (a) e (b) são mostrados um micrômetro e um paquímetro, respectivamente.

Figura 2.23 – (a) Micrômetro medindo o diâmetro de um condutor de cobre; (b) Paquímetro



O funcionamento do micrômetro se baseia na relação proporcional entre o movimento rotativo do tambor e seu movimento axial. Vemos, na Figura 2.24, a imagem de um tambor com 100 divisões. A resolução, ou menor medida do micrômetro, é a medida do avanço axial do tambor para o movimento rotativo de uma divisão. No caso da Figura 2.24, a resolução é de $1 \text{ mm} / 100 = 0,01 \text{ mm}$. Isto implica uma volta completa no tambor, com avanço de forma axial de 0,01 mm.

As relações entre as principais unidades de medidas são:

- 1 metro = 100 centímetros
- 1 centímetro = 1/100 metros
- 1 metro = 1000 milímetros
- 1 milímetro = 1/1000 metros

Figura 2.24 – Tambor de um micrômetro



PRÁTICAS NA SALA DE AULA

- Leia, com o micrômetro, a espessura de uma folha de papel.
- Leia, com o micrômetro, o diâmetro de um fio de cabelo.
- Leia o diâmetro de um fio de cobre esmaltado e descubra sua especificação em AWG (*American Wire Gauge*), a partir de uma tabela.
- Leia, com o paquímetro, o diâmetro da sua caneta.
- Leia, com o paquímetro, o diâmetro de um eletroduto.

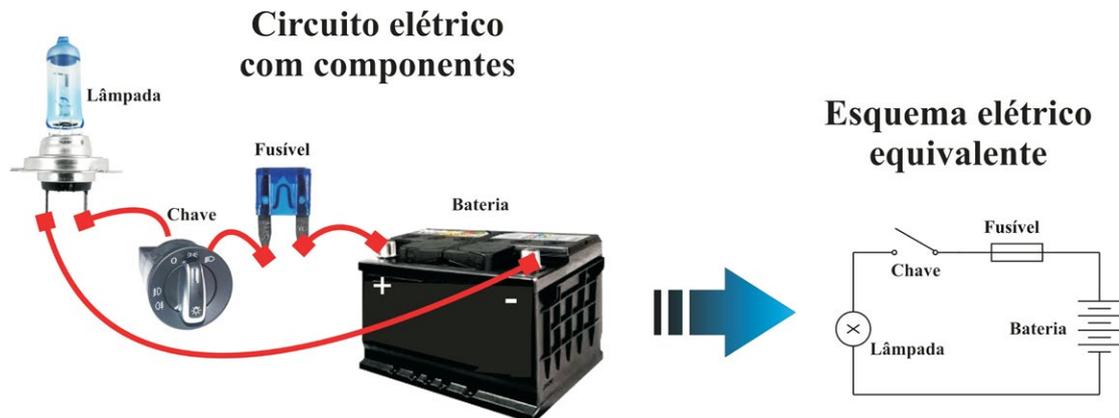
2.12 Padrão de simbologia e esquemas eletroeletrônicos

Os componentes elétricos, muitos deles vistos neste capítulo, caso das resistências elétricas, fontes de tensão e capacitores, se unem para formar sistemas elétricos e eletrônicos ou partes desses sistemas. A representação dos sistemas elétricos, a partir de símbolos organizados em forma de esquemas, são muitos úteis, pois simplificam sua análise. Tal simbologia possui um padrão, o que evita que cada um represente uma simbologia particular, o que acarretaria uma confusão no projeto, execução e manutenção desses sistemas elétricos. Esses símbolos estão padronizados em normas técnicas.

A norma que regula o padrão de grande parte da simbologia elétrica no Brasil é a NBR 5444 – Símbolos gráficos para instalações elétricas prediais. Este livro possui seu conjunto de símbolos gráficos para sistemas elétricos, mostrados no Anexo 1. Todas as plantas e esquemas elétricos contidos no livro seguem essa simbologia gráfica, que, na sua grande

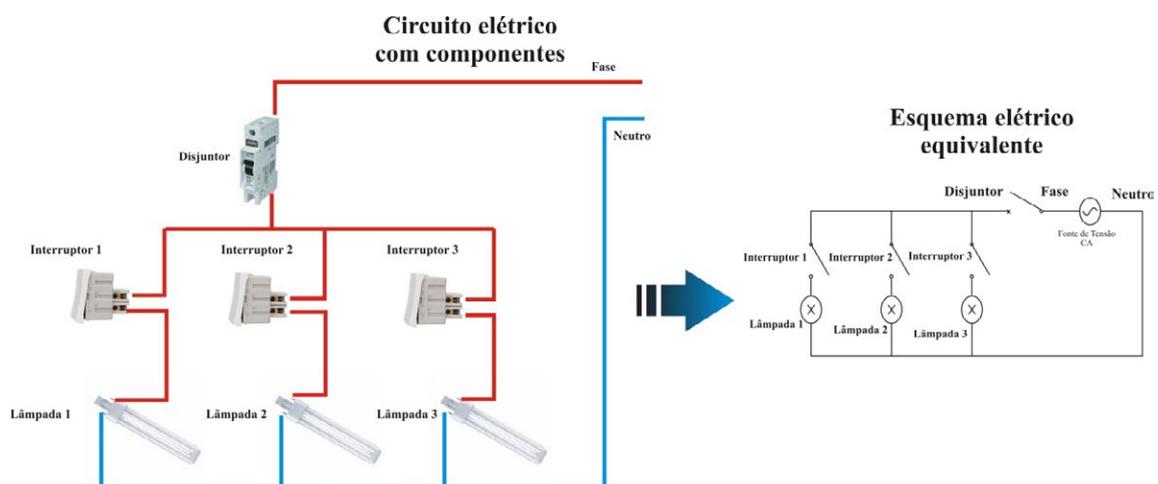
maioria, segue a norma NBR 5444. Assim, uma lâmpada de um farol de um veículo ligada à bateria, por exemplo, é uma parte do sistema elétrico do veículo, visto na Figura 2.25, que pode ser representado tanto por circuito de componentes quanto por um esquema. Observe que ambos possuem uma correspondência. No entanto, a elaboração e o entendimento do esquema são bem mais fáceis, principalmente em sistemas grandes ou complexos.

Figura 2.25 – Circuito elétrico automotivo em corrente contínua de componentes e seu esquema equivalente



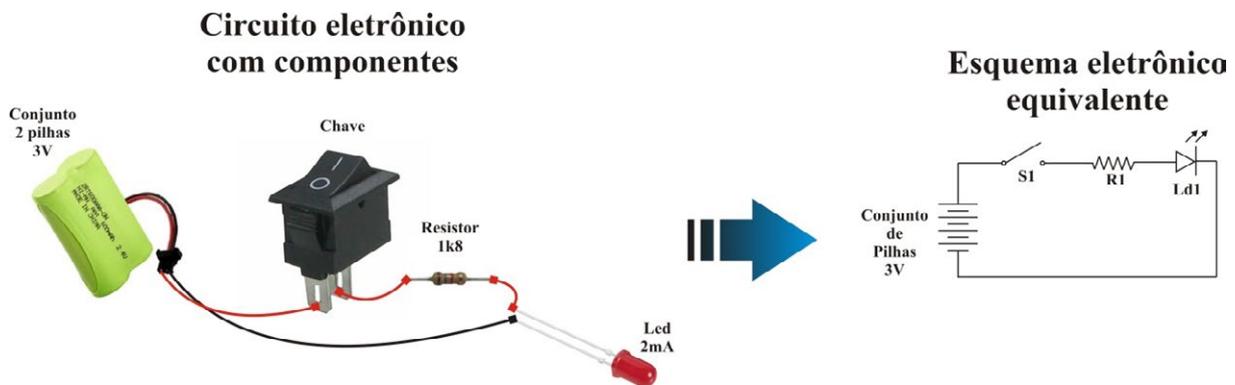
Os sistemas elétricos de corrente alternada também podem ser representados por esquemas elétricos. O sistema da Figura 2.26, por exemplo, consiste em um circuito de iluminação, contendo 3 lâmpadas compactas. Este é um típico circuito encontrado em muitas residências. Tal circuito pode ser representado pelo seu esquema elétrico equivalente de forma mais simples. O cálculo da corrente de cada chave bem como do disjuntor são procedimentos que podem ser simplificados.

Figura 2.26 – Circuito de iluminação residencial com 3 lâmpadas



Os circuitos eletrônicos possuem também seus esquemas equivalentes compostos a partir dos símbolos dos componentes. Representar um circuito eletrônico complexo a partir de seus componentes físicos seria muito complicado e de difícil compreensão. Os esquemas eletrônicos, nesse caso, simplificam muito as várias etapas dos circuitos eletrônicos: projeto, execução e manutenção. Vejamos a Figura 2.27, que mostra um circuito eletrônico de alimentação de um led. A representação do circuito de componentes físicos presente no exemplo simples dessa figura é de fácil entendimento; no entanto, se o circuito fosse uma matriz de 10 leds, a representação de seus componentes por circuito seria de difícil entendimento. Os esquemas eletrônicos compostos de símbolos seriam a única alternativa de representação do sistema de forma fácil e legível. No capítulo relativo à corrente contínua, serão abordados com mais profundidade os esquemas eletroeletrônicos com símbolos.

Figura 2.27 – Circuito eletrônico de alimentação de um led



2.13 Associação de resistências – Aplicação dos conceitos de potência ativa

Associação de resistências é o procedimento que visa determinar uma resistência equivalente a um conjunto de resistências. Resistência equivalente é aquela que consome a mesma potência ativa que o conjunto de resistências individuais. O objetivo maior do procedimento é a simplificação da análise. Por exemplo, é mais fácil analisar o comportamento de uma fonte alimentando apenas uma resistência do que alimentando várias.

- **Associação de resistências em série:**

Se as resistências estão em série, a corrente em todas elas é igual. Dessa forma, a resistência equivalente ao conjunto deve satisfazer à expressão (2.13), que, por sua vez, resulta na expressão final (2.14). Em outras palavras, a resistência equivalente de várias resistências individuais em série é a soma de todas essas resistências, como mostra a Figura 2.28. As relações de potências equivalentes e individuais derivam da expressão (2.5).

$$R_{eq} i^2 = R_1 i^2 + R_2 i^2 \quad (2.13)$$

$$R_{eq} = R_1 + R_2 \quad (2.14)$$

Figura 2.28 – Associação de resistências em série



Observe que, com duas resistências iguais, se consegue uma resistência equivalente igual ao dobro quando ligadas em série.

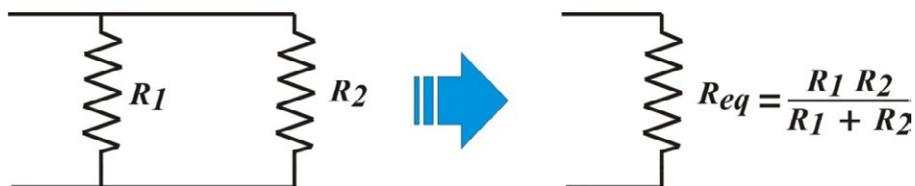
- **Associação de resistências em paralelo:**

Se as resistências estão em paralelo, todas estão submetidas à mesma tensão. Assim, a potência dissipada na resistência equivalente é a somatória das potências das resistências individuais. A expressão (2.15) deve ser satisfeita, gerando por sua vez a expressão (2.16), que relaciona a resistência equivalente com as resistências individuais, também mostrado na Figura 2.29. As relações de potências equivalentes e individuais derivam também da expressão (2.5).

$$\frac{v^2}{R_{eq}} = \frac{v^2}{R_1} + \frac{v^2}{R_2} \quad (2.15)$$

$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad (2.16)$$

Figura 2.29 – Associação de resistências em paralelo



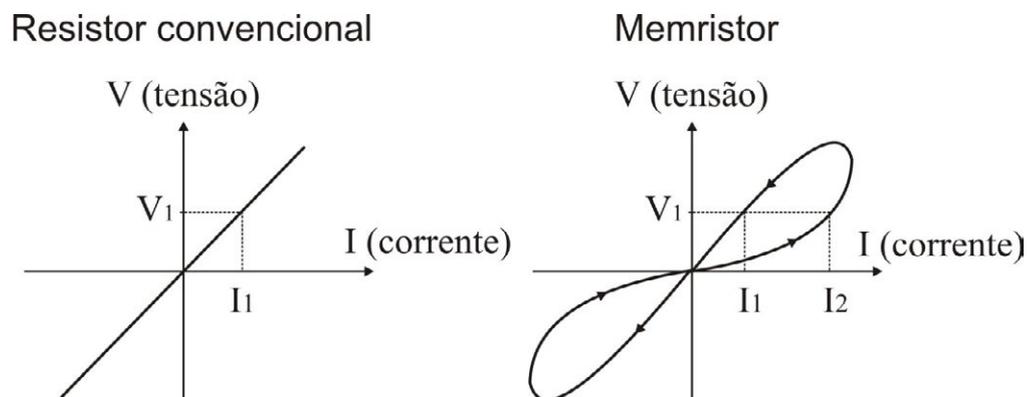
Observe que, com duas resistências iguais, se consegue uma resistência equivalente igual à metade quando ligadas em paralelo.

Memristor – o quarto elemento de circuito

Os elementos passivos de circuitos elétricos, resistor, indutor e capacitor estão presentes nos sistemas elétricos desde micro circuitos eletrônicos até circuitos elétricos que modelam grandes sistemas de potência. Em 1971, o cientista chinês Leon Chua levanta a possibilidade de haver outro componente passivo, ou resistor com memória, daí vem o termo Memristor. O trabalho do professor Chua se limitou ao conceito teórico deste quarto elemento, sem seu desenvolvimento, portanto. Por isto, a comunidade científica tratou sua teoria com muita reserva e ceticismo. Com o avanço da tecnologia de materiais, principalmente na área de nano tecnologia, a polêmica voltou quando a HP, em 2008, desenvolveu o componente e o viabilizou comercialmente em 2013.

O Memristor pode ser entendido como um resistor com memória de eventos passados. Na Figura 2.30, são mostradas as características de tensão e corrente de um resistor convencional e de um Memristor. No resistor convencional, a relação entre tensão e corrente é unívoca. Assim, quando aplicada uma tensão V_1 no resistor, circulará uma corrente I_1 . No Memristor, quando aplicado uma tensão V_1 , a corrente associada depende do que aconteceu antes. Na Figura 2.30, se a tensão anterior era maior que V_1 , circulará a corrente I_1 . Por outro lado, se a tensão anterior era menor que V_1 , a corrente será I_2 . O componente apresenta uma memória de um evento passado, mesmo desligado.

Figura 2.30 – Resistor linear convencional e Memristor



Vários centros de pesquisas estudam o Memristor em muitas aplicações, principalmente em memórias RAM de computador. A Memória RAM (*Random Access Memory*) é uma memória volátil – quando o computador é desligado a memória é zerada. Ao ligar o computador, a memória é novamente carregada de informações. Uma memória RAM, teoricamente, construída a partir de Memresistor, mesmo desligada, ainda mantém todas as informações do instante em que o computador foi desligado. O computador seria ligado imediatamente no ponto em que foi desligado, sem a necessidade do processo de inicialização – *Boot*. Quem desenvolver este tipo de memória sairá na frente, com um produto que impactará a vida de todos.

Exercícios propostos

2.1 Expresse os valores das grandezas nos submúltiplos que se pedem.

- a) Um capacitor de 0,0001 F em μF .
- b) Um resistor de 10.000 Ω em $\text{k}\Omega$.
- c) Um resistor de 100.000 Ω em $\text{M}\Omega$.
- d) Uma resistência de isolação de 303.000 $\text{k}\Omega$ em $\text{M}\Omega$.
- e) A resistência de um condutor de cobre de 0,001 Ω em $\text{m}\Omega$.
- f) Um indutor de 0,00001 H em mH e em μH .
- g) Um capacitor de 4.000 μF em mF e em pF .
- h) A tensão dos condutores de distribuição 13.800 V em kV .
- i) Uma determinada indústria possui uma demanda de potência de 550.000 W. Expresse essa potência em kW .
- j) Uma determinada cidade possui uma demanda de potência de 33.600.000 W. Expresse essa potência em MW e em kW .
- l) A corrente de curto circuito de uma instalação é de 5.000 A. Expresse essa corrente em kA .
- m) A potência de um motor é de 5 cv. Expresse essa potência em kW .

2.2 Considerando-se dois condutores de 100 metros de comprimento e de espessuras de 1,5 mm^2 e outro de 2 mm^2 , qual dos dois possui resistência menor?

2.3 Estime quantas espiras possui uma bobina cuja resistência é de 1,5 Ω , a 20 °C, sendo a espira de 15 cm e fio 21 AWG (consulte ANEXO 2).

2.4 Determine o valor da potência nominal dos principais equipamentos da sua residência. Construa uma tabela com tais valores.

2.5 Preencha a tabela com o valor dos resistores.

Cores	Valor em Ω ou $\text{k}\Omega$
Preto – marrom – vermelho – vermelho	
Preto – marrom – verde – vermelho	
Marrom – preto – preto – laranja	
Verde – preto – preto – laranja	
Preto – preto – marrom – azul	

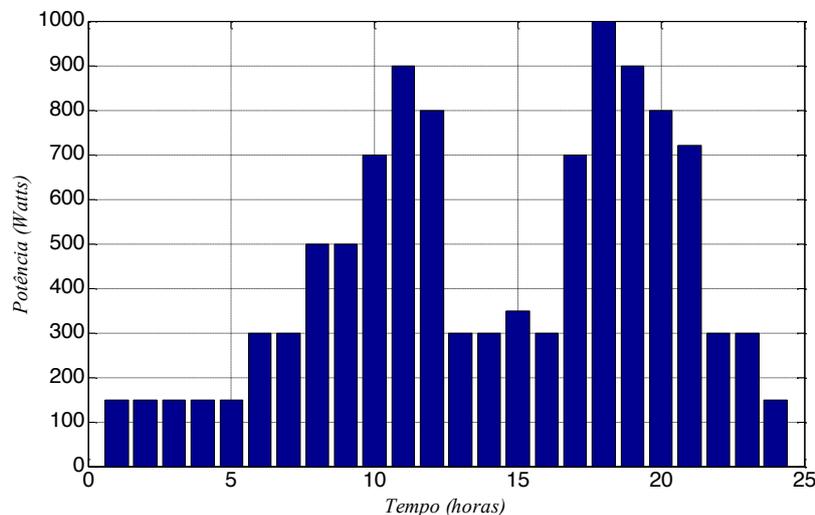
2.6 Em uma residência há os seguintes equipamentos/aparelhos com as respectivas cargas elétricas:

Equipamento	Unidades	Potência unitária (watts)
Lâmpada de 20 W	4	20
Lâmpada de 40 W	6	40
Geladeira de 250 litros	1	250
Micro-ondas	1	1000
TV	2	150
Ferro de passar	1	1500
Chuveiro elétrico	2	4500
Computador	2	100
Condicionador de ar	2	900

- Determine a potência instalada da residência.
- Qual a corrente consumida por cada carga da tabela, se o sistema é alimentado a 220 V CA?
- Se todas as cargas estivessem ligadas, qual seria a corrente, se o sistema é alimentado a 220 V CA?

2.7 Uma determinada instalação apresenta o comportamento de consumo de energia mostrado no gráfico a seguir. Determine:

- Demanda da instalação.
- Potência mínima.
- Potência média.



- 2.8** Determine a potência instalada de iluminação e tomadas da sua residência. As tomadas da cozinha possuem uma potência de 600 W e as demais de 100 W. Determine a demanda estimada a partir da tabela de fatores de demanda extraída da ND 5.1 CEMIG.
- 2.9** Pesquise aplicações para o ouro e o alumínio como condutores na indústria de componentes elétricos.
- 2.10** Observe a fatura de energia elétrica da sua residência do último mês e identifique:
- Quanto foi consumido de energia elétrica em kWh?
 - Quanto foi pago pelo consumo?
 - Quanto foi pago pelos impostos, contribuições e serviços?
 - Comente: os serviços de iluminação pública na sua rua e na sua cidade valem o que é cobrado de cada residência?
- 2.11** O micrômetro da Figura 2.31 apresenta um avanço de 0,01 mm por divisão no tambor, este contendo 100 divisões. Descreva as seguintes medidas em milímetro:
- Está na primeira volta, parado na medida 39.
 - Está parado na segunda volta, na medida 16.

Figura 2.31 – Medições de micrômetro



Respostas: a)

b)

2.12 Qual a medição efetuada pelo paquímetro que apresenta a leitura mostrada na Figura 2.32 a seguir? Descreva as seguintes medidas em milímetro:

Figura 2.32 – Medições de paquímetro



Respostas: a)

b)

2.13 Foi comentado que a temperatura é uma variável importante na manutenção elétrica industrial. Foi detectado que um terminal de ligação de uma fase de um motor de indução está com a temperatura acima do esperado. A partir do comentário e da detecção do aumento de temperatura citados, esclareça o que pode estar acontecendo nesse contato.

2.14 Ao testar os fusíveis de um veículo com um voltímetro, pondo as duas pontas de prova em contato com os terminais do fusível, o técnico se deparou com duas situações:

I - Para o fusível A, o voltímetro leu zero volts, estando o circuito ligado ou desligado.

II - Para o fusível B, o voltímetro leu 12 V e zero volts, estando o circuito ligado e desligado, respectivamente.

Marque a alternativa correta:

O fusível A está normal e o B queimado.

O fusível B está normal e o A queimado.

Ambos os fusíveis estão queimados.

Ambos os fusíveis estão normais.

2.15 Qual o instrumento e o procedimento adequados para se determinar se a resistência de um ferro de passar ou de um chuveiro elétrico está partida no interior do equipamento?

- 2.16** Foi mencionada a diferença entre a falha latente e a falha concreta. Marque a seguir comportamentos dos sistemas elétricos que apontam para uma falha latente:
- () Aquecimento de contatos além do esperado.
 - () Trepidação de motores elétricos.
 - () Ruídos inesperados em rolamentos de motores elétricos.
 - () Baixa luminosidade de lâmpadas elétricas.
- 2.17** De posse de uma célula Peltier e duas bolsas térmicas, aqueça uma das bolsas na água quente e resfrie a outra na água gelada. Envolve a célula num saco plástico e encoste as duas bolsas em cada lado (fria e quente). Com um voltímetro, meça e observe a tensão gerada. Leia essa tensão a cada 2 minutos e anote. Elabore um gráfico desta tensão em função do tempo em minutos. Por quanto tempo seu gerador termovoltáico funcionará?
- 2.18** Determine a resistência equivalente de duas resistências de 100 ohm e uma de 150 ohm ligadas em série.
- 2.19** Determine a resistência equivalente de duas resistências de 100 ohm e uma de 150 ohm ligadas em paralelo.
- 2.20** Determine a resistência equivalente máxima e mínima para um potenciômetro ligado em série com uma resistência, como mostra a Figura 2.33. Considere os valores de $R_I = 100 \Omega$ e $P_I = 1 \text{ k}\Omega$.
- 2.21** Determine a resistência equivalente máxima e mínima para um potenciômetro ligado em paralelo com uma resistência, como mostra a Figura 2.34. Considere os valores de $R_I = 100 \Omega$ e $P_I = 1 \text{ k}\Omega$.
- 2.22** Para um potenciômetro ligado de forma mista com três resistências, como mostra a Figura 2.35, com valores de $R_1 = R_2 = R_3 = 1 \text{ k}\Omega$ e $P_I = 1 \text{ k}\Omega$:
- a) Determine a resistência equivalente máxima e mínima.
 - b) Elabore o gráfico da resistência equivalente *versus* valor do potenciômetro (de 0 a 1000 Ω).

Figura 2.33 – Resistência em série com um potenciômetro

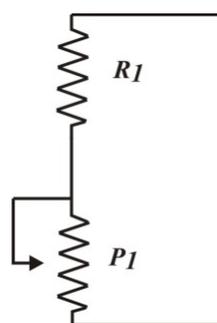


Figura 2.34 – Resistência em paralelo com um potenciômetro

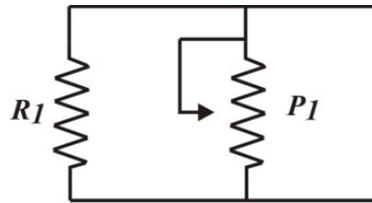
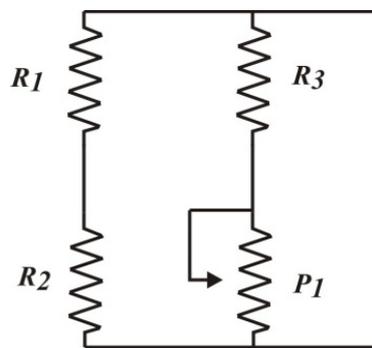


Figura 2.35 – Resistência em paralelo com um potenciômetro



Projeto

Elabore um projeto de um resfriador ou aquecedor de água de pequeno porte com pastilhas Peltier comerciais utilizando fontes de tensão de 12 V. Elabore um desenho, discutindo em equipe a melhor alternativa.

Pesquisa e discussão em grupo

Os veículos elétricos utilizam as baterias como fonte de tensão para seus motores. Na maioria das vezes, as baterias são compostas de dezenas de pequenas baterias ligadas em série ou paralelo, distribuídas no chão do veículo com a finalidade de ocupar pouco espaço. Os veículos elétricos ocuparão todo o espaço de mercado dos veículos movidos por motores a combustão a longo prazo?

REFERÊNCIAS

AGILENT TECHNOLOGIES. **Agilent**: Trusted Answers. Disponível em: <<http://www.agilent.com/home>>. Acesso em: dez. 2017.

AMETHERM. **What Is An NTC Thermistor**. Disponível em: <<https://www.ametherm.com/thermistor/what-is-an-ntc-thermistor>>. Acesso em: ago. 2017.

BISHOP, Tom. Insulation resistance testing: How many megohms does it take to start a motor? **NETA World**, Spring 2008.

CEMIG. Disponível em: <<http://www.cemig.com.br/>>. Acesso em: fev. 2018.

CHUA, Leon. Memristor-The missing circuit element. **IEEE Transactions on circuit theory**, v. 18, n. 5, set. 1971.

COTRIM, Ademaro A. M. B. **Instalações elétricas**. São Paulo: Prentice Hall, 2009.

FLUKE. **Fluke test and measurement tools**. Disponível em: <<http://www.fluke.com/>>. Acesso em: set. 2017.

GUSSOW, Milton. **Eletricidade Básica**. Porto Alegre: Bookman, 2009. (Coleção Schaum).

INTERNATIONAL ELECTRICAL TESTING ASSOCIATION; AMERICAN NATIONAL STANDARDS INSTITUTE. **American National Standard – Standard for Acceptance Testing Specifications for Electrical Power Equipament and Systems**. ANSI/NETA ATS-2009.

LAUBE, Philipp. Fundamentals: The p-n junction. In: _____. **Semiconductor Technology from A to Z**. Disponível em: <<https://www.halbleiter.org/en/fundamentals/the-p-n-junction/>>. Acesso em: dez. 2017.

_____. **Thermistor**. Disponível em: <<https://www.omega.com/prodinfo/thermistor.html>>. Acesso em: jul. 2017.

OMEGA ENGINEERING. **Thermocouple**: Different Types, What It Is, and How to Replace One. Disponível em: <<https://www.omega.com/thermocouple>>. Acesso em: jul. 2017.

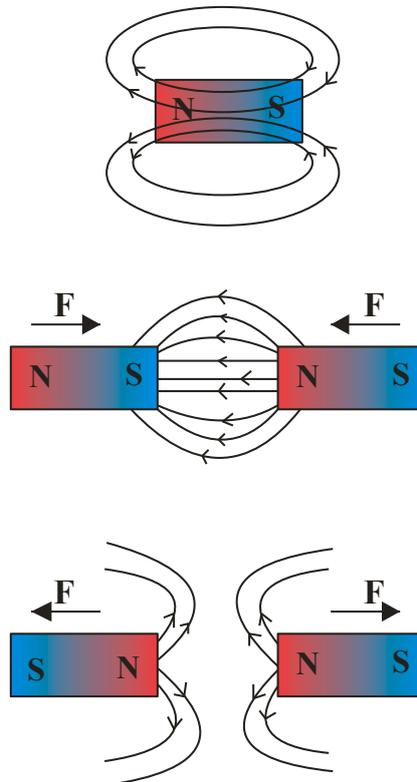
TEKTRONIX. **Test and Measurement Equipment – Tektronix**. Disponível em: <<https://www.tek.com/>>. Acesso em: dez. 2017.

3 Elementos de magnetismo

Nos capítulos preliminares, vimos que a matéria possui características elétricas, devido a partículas elementares – prótons e elétrons. Essas partículas são utilizadas, através dos seus movimentos, para produzir corrente elétrica. Os átomos possuem também características magnéticas. Os elétrons, quando giram, criam campos magnéticos elementares nos átomos. Cada átomo se comporta como um ímã. Quando esses átomos estão orientados de forma organizada, percebe-se o efeito magnético do material. Um ímã permanente possui essa orientação de forma organizada.

Na Figura 3.1 é mostrado um ímã permanente. Um ímã possui dois polos distintos (Norte e Sul). Os ímãs podem exercer força, sem contato, sobre outro ímã. Força sem contato traz à tona novamente o conceito de campo, ou seja, uma região do espaço em que se evidenciam os fenômenos magnéticos. Polos iguais se repelem e polos diferentes se atraem. Todos nós já experimentamos essas forças com pequenos ímãs. Essa propriedade dos ímãs, de atrair ou repelir, é utilizada nos motores elétricos, para conversão eletromecânica de energia. Tente girar um ímã a partir de outro ímã. Você está transferindo energia para a movimentação do outro ímã sem contato.

Figura 3.1 – Ímã permanente e seu efeito de atração e repulsão

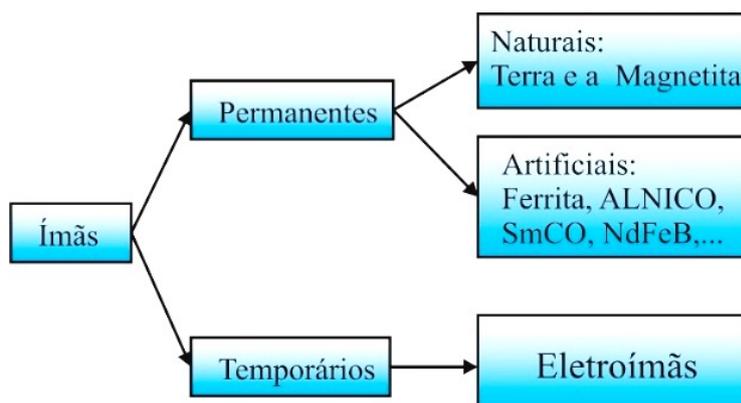


Os polos magnéticos são diferentes dos polos elétricos. Na eletrostática é possível separar cargas positivas e negativas. No magnetismo, os polos magnéticos são solidários e não se consegue separá-los. Ao partir um ímã, o que se faz é criar dois ímãs. Observe, na

Figura 3.1, que uma boa ferramenta para representar o campo magnético são as linhas de campo. As linhas de campo saem do polo norte e chegam ao polo sul. Essas linhas de campo magnético, entretanto, são contínuas; elas não nascem num polo, como no caso do campo elétrico. Tais linhas de campo magnético possuem um caminho fechado.

Vejam, na Figura 3.2, como os ímãs se classificam.

Figura 3.2 – Classificação dos Ímãs



O efeito de atração e repulsão dos ímãs é conhecido desde a Grécia antiga. Na cidade de Magnésia, na Grécia central (ver mapa na Figura 3.3), era comum a magnetita, um óxido de ferro que foi imantado por, provavelmente, raios. A bússola – talvez a primeira aplicação do magnetismo que realmente agregou valor à vida humana – é construída a partir de um pedaço de ferro que, quando esfregado num ímã natural, se magnetiza e guarda este pequeno magnetismo residual. Por atração e repulsão natural dos ímãs, este pedaço de ferro consegue se orientar com o campo magnético terrestre. A causa da magnetização da terra ainda é polêmica na comunidade científica. A hipótese mais aceita é que, devido ao fato de o núcleo da terra ser formado por metais derretidos e carregados, estes estão em constante movimento.

Figura 3.3 – Localização da Magnésia, na Grécia



3.1 Um pouco de história

Devido às suas características de exercer força sem contato, os ímãs foram muito utilizados por mágicos e para o entretenimento infantil. Alusões escritas no século XI na China apontam para utilização de um aparato magnético que ajudava na orientação dos navegantes, as primeiras bússolas. Evidências escritas mostram seu aparecimento na Europa por volta do século XIV. A bússola foi a primeira aplicação do magnetismo para resolver um problema humano e foi fundamental para o avanço da navegação, pois permitia a orientação à noite ou em períodos de sol encoberto. O norte magnético e o norte geográfico, no entanto, não coincidem, e, o que é pior, essa diferença varia com a latitude. Foi somente em 1701 que Edmund Halley, depois de diversas expedições, construiu e publicou suas cartas isonômicas do oceano atlântico. Com essas cartas era possível realizar correções na leitura das bússolas.

Foi em 1600, com o cientista inglês William Gilbert, que o magnetismo começou a ser tratado cientificamente, com a publicação do seu livro *De magnete, magneticisque corporibus, et de magno magnete tellure* (Sobre os ímãs, os corpos magnéticos e o grande magnetismo terrestre). Embora as observações de Gilbert fossem importantes, seus conceitos estavam entrelaçados com a Teologia. Presente na sua obra está a ideia do magnetismo como a alma da terra. Foi somente em 1819 que o cientista dinamarquês Urdsted observou que uma corrente elétrica que circula por um condutor cria ao redor desse condutor um campo magnético. Ao redor do condutor, uma agulha imantada era defletida. Essa observação mostrou que, a partir da eletricidade, era possível gerar magnetismo. Em 1826, o cientista francês André-Marie Ampère propôs a expressão matemática para as observações de Urdsted. É a conhecida lei de Ampère, que será enfocada mais adiante. Em 1831, o cientista inglês Michael Faraday observou e propôs a expressão matemática dual da lei de Ampère, a qual defendia que um campo magnético variável gera potencial elétrico, ou seja, magnetismo gera eletricidade. Essas duas leis, lei de Ampère e lei de Faraday, são fundamentais para o projeto de máquinas elétricas, como transformadores e máquinas rotativas, estas de suma importância para o desenvolvimento industrial.

3.2 Ímãs e eletroímãs

Os ímãs artificiais são aqueles construídos por ligas de metais que são submetidas a processos de imantação dentro de campos magnéticos muito fortes. Depois da imantação, esses ímãs guardam a orientação magnética por muito tempo. A liga Alnico, que é uma liga de alumínio, níquel e cobalto, foi um dos primeiros ímãs artificiais desenvolvidos. O Alnico foi fundamental na Segunda Guerra Mundial. Com esses ímãs se construíram os radares, os quais deram uma vantagem grande aos aliados, pois podiam detectar aviões alemães. Os ímãs de ferrita apareceram nos anos cinquenta e são formados por óxido de ferro. São os ímãs encontrados nas portas das geladeiras, para segurar recados; possuem baixo custo e baixo poder magnético. Já os ímãs de Terras Raras, desenvolvidos nas décadas de 1970 e 1980, possuem um poder muito maior que seus predecessores, mas são muito mais caros também. Na Tabela Periódica (Figura 3.4), são mostrados os elementos Terras Raras – dos quais são formados esses ímãs. Os dois ímãs de Terras Raras mais populares são o NdFeB (Neodímio – Ferro – Boro) e o SmCo (Samário – Cobalto). O NdFeB é um ímã quase 100 vezes mais forte

que a ferrita. Tais ímãs de Terras Raras foram muito importantes na miniaturização de muitos componentes como alto-falantes e pequenos motores.

Figura 3.4 – Elementos Terras Raras

Tabela Periódica

Elementos Terras Raras

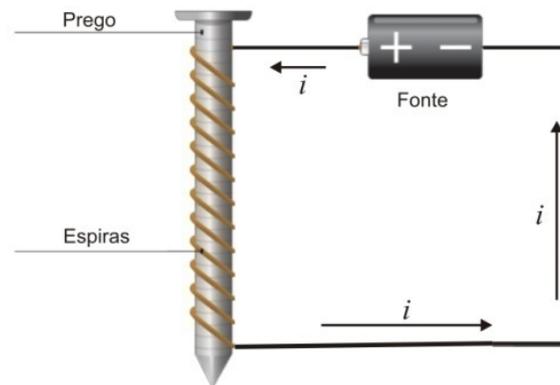
1 H 1.0079 Hydrogen																	2 He 4.0026 Helium
3 Li 6.941 Lithium	4 Be 9.0122 Beryllium											5 B 10.81 Boron	6 C 12.011 Carbon	7 N 14.007 Nitrogen	8 O 15.999 Oxygen	9 F 18.998 Fluorine	10 Ne 20.180 Neon
11 Na 22.990 Sodium	12 Mg 24.305 Magnesium											13 Al 26.982 Aluminum	14 Si 28.086 Silicon	15 P 30.974 Phosphorus	16 S 32.065 Sulfur	17 Cl 35.453 Chlorine	18 Ar 39.948 Argon
19 K 39.098 Potassium	20 Ca 40.078 Calcium	21 Sc 44.956 Scandium	22 Ti 47.88 Titanium	23 V 50.942 Vanadium	24 Cr 51.996 Chromium	25 Mn 54.938 Manganese	26 Fe 55.845 Iron	27 Co 58.933 Cobalt	28 Ni 58.693 Nickel	29 Cu 63.546 Copper	30 Zn 65.38 Zinc	31 Ga 69.723 Gallium	32 Ge 72.630 Germanium	33 As 74.922 Arsenic	34 Se 78.96 Selenium	35 Br 79.904 Bromine	36 Kr 83.80 Krypton
37 Rb 85.468 Rubidium	38 Sr 87.62 Strontium	39 Y 88.906 Yttrium	40 Zr 91.224 Zirconium	41 Nb 92.906 Niobium	42 Mo 95.94 Molybdenum	43 Tc 98.906 Technetium	44 Ru 101.07 Ruthenium	45 Rh 102.91 Rhodium	46 Pd 106.37 Palladium	47 Ag 107.87 Silver	48 Cd 112.41 Cadmium	49 In 114.82 Indium	50 Sn 118.71 Tin	51 Sb 121.76 Antimony	52 Te 127.60 Tellurium	53 I 126.905 Iodine	54 Xe 131.29 Xenon
55 Cs 132.91 Cesium	56 Ba 137.33 Barium	57-71 La-Lu Lanthanides	72 Hf 178.49 Hafnium	73 Ta 180.95 Tantalum	74 W 183.85 Tungsten	75 Re 186.21 Rhenium	76 Os 190.23 Osmium	77 Ir 192.22 Iridium	78 Pt 195.08 Platinum	79 Au 196.97 Gold	80 Hg 200.59 Mercury	81 Tl 204.38 Thallium	82 Pb 207.2 Lead	83 Bi 208.98 Bismuth	84 Po 209 Polonium	85 At 210 Astatine	86 Rn 222 Radon
87 Fr 223 Francium	88-103 Ra-Lf Actinides	104 Rf 261 Rutherfordium	105 Db 262 Dubnium	106 Sg 263 Seaborgium	107 Bh 264 Bohrium	108 Hs 265 Hassium	109 Mt 266 Meitnerium	110 Uun 267 Ununennium	111 Uuu 268 Ununtrium	112 Uub 269 Unbibium	113 Uut 270 Untrium	114 Uuq 271 Unquadrum	115 Uup 272 Unpentium	116 Uuh 273 Unhexium	117 Uus 274 Unseptium	118 Uuo 276 Unoctium	
89 La 138.905 Lanthanum	90 Ce 140.12 Cerium	91 Pr 140.91 Praseodymium	92 Nd 144.24 Neodymium	93 Pm 145 Promethium	94 Sm 150.36 Samarium	95 Eu 151.96 Europium	96 Gd 157.25 Gadolinium	97 Tb 158.93 Terbium	98 Dy 162.5 Dysprosium	99 Ho 164.93 Holmium	100 Er 167.26 Erbium	101 Tm 168.93 Thulium	102 Yb 173.05 Ytterbium	103 Lu 174.967 Lutetium			
90 Ac 227 Actinium	91 Th 232.04 Thorium	92 Pa 231.04 Protactinium	93 U 238.03 Uranium	94 Np 237.05 Neptunium	95 Pu 244.06 Plutonium	96 Am 243.06 Americium	97 Cm 247.07 Curium	98 Bk 247.07 Berkelium	99 Cf 251.08 Californium	100 Es 252.08 Einsteinium	101 Fm 257.10 Fermium	102 Md 258.10 Mendelevium	103 No 259.10 Nobelium	104 Lr 260.10 Lawrencium			

O avanço dos ímãs permanentes artificiais está ligado, em grande parte, ao desenvolvimento de novos produtos e, principalmente, à miniaturização, nos últimos anos. Sem esses ímãs, não seria possível a fabricação de produtos como o notebook, celulares, MP3 player, vidros elétricos, cartões de créditos, tarjas de proteção contra roubo de produtos em lojas e muitos outros.

Os eletroímãs são ímãs temporários, criados por corrente elétrica circulando por uma bobina. Bobinas são conjunto de espiras enroladas no mesmo sentido. Corrente elétrica circulando por uma bobina gera campo magnético, ou seja, eletricidade gera magnetismo. Na Figura 3.5, vemos um eletroímã elementar, criado por 12 espiras de fios, circuladas num prego, nas quais circula corrente elétrica. Ao desligar o condutor que leva a corrente até a bobina, acaba o efeito magnético. Os motores elétricos utilizam eletroímãs. Tais motores elétricos são construídos com base nas duas ideias a seguir:

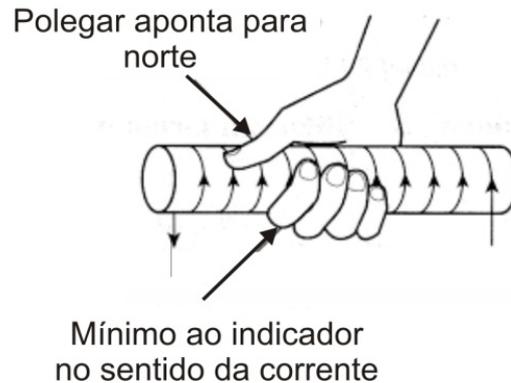
- Um ímã pode ser criado a partir de corrente elétrica, ou seja, a partir de uma fonte de tensão.
- Dois ímãs com polos iguais próximos se repelem, e dois ímãs com polos diferentes próximos se atraem (ver Figura 3.1).

Figura 3.5 – Eletroímã elementar construído num prego enrolado por 14 espiras



É possível determinar o sentido do campo magnético dentro de uma bobina circulado por uma corrente a partir da “regra da mão direita para bobinas”, mostrada na Figura 3.6. **“Envolva a bobina com a mão direita de tal forma que do dedo mínimo ao indicador apontem para o sentido da corrente. O polegar apontará para o polo norte, por onde saem as linhas de campo”**. Na Figura 3.5, o campo criado no prego, o polo norte está em cima, na cabeça do prego, ou embaixo, em sua ponta aguda? O polo norte está em cima, na cabeça do prego.

Figura 3.6 – Regra da mão direita



3.3 Grandezas magnéticas

Fluxo magnético (ϕ) está relacionado com a quantidade de linhas de campo, que saem do polo norte e entram pelo polo sul.

Unidade de medida (SI)  weber (Wb)

Somente pelas linhas de campo não é possível, contudo, saber se um ímã é mais poderoso que outro. O tamanho dele deve ser levado em consideração. Assim, mais significativa que linhas de campo é a densidade dessas linhas de campo (B), que dá ideia da quantidade de linhas que cruzam a área da seção transversal do ímã, visto na expressão (3.1).

$$B = \frac{\phi}{A} \quad (3.1)$$

Unidade de medida (SI)  weber/m² (Wb/m²) ou Tesla

A unidade gauss, do sistema CGS, é utilizada em muitos medidores e em curvas características de ímãs permanentes.

Outra grandeza importante é a intensidade de campo magnético (H). A intensidade de campo magnético está relacionada à corrente de um eletroímã. Quanto maior a corrente maior a intensidade de campo magnético.

Unidade de medida (SI)  ampère espira/m (Ae/m)

A unidade oersted, do sistema CGS, é utilizada em muitos medidores. Na Tabela 3.1, são mostradas as unidades do sistema CGS e SI com respectivos fatores de relação. No escopo deste livro, no entanto, como já foi mencionado, o sistema básico é o SI.

Tabela 3.1 – Unidades das grandezas magnéticas do sistema CGS e SI

	Sistema CGS	Sistema SI
Fluxo magnético	1 maxwell (Mx)	10 ⁻⁸ Wb
Densidade de Fluxo magnético	1 gauss (G)	10 ⁻⁴ T
Intensidade de campo magnético	1 oersted (Oe)	1000/4π Ae/m

A medição de densidade de fluxo se dá por intermédio de um medidor chamado gaussímetro.

3.4 Domínios magnéticos

Domínio magnético é a região dentro do material magnético que possui magnetização uniforme, como mostrado na Figura 3.7. Dentro desses domínios, os átomos que formam tais materiais possuem uma determinada orientação uniforme. Essa teoria foi proposta pelo físico francês Pierre Ernst Weiss, por volta de 1906. Essa teoria é útil para entender o comportamento magnético dos materiais ferromagnéticos. Na Figura 3.7 são mostrados materiais sem magnetização. Nesse caso, os domínios estão orientados aleatoriamente, e não há efeito externo. Já quando se trata de material magnetizado, os domínios estão orientados numa mesma direção, uniformemente. Nesse último caso, há um efeito magnético externo, ou seja, o material foi magnetizado naturalmente ou artificialmente.

Figura 3.7 – Domínios magnéticos de um material sem magnetização e de outro magnetizado

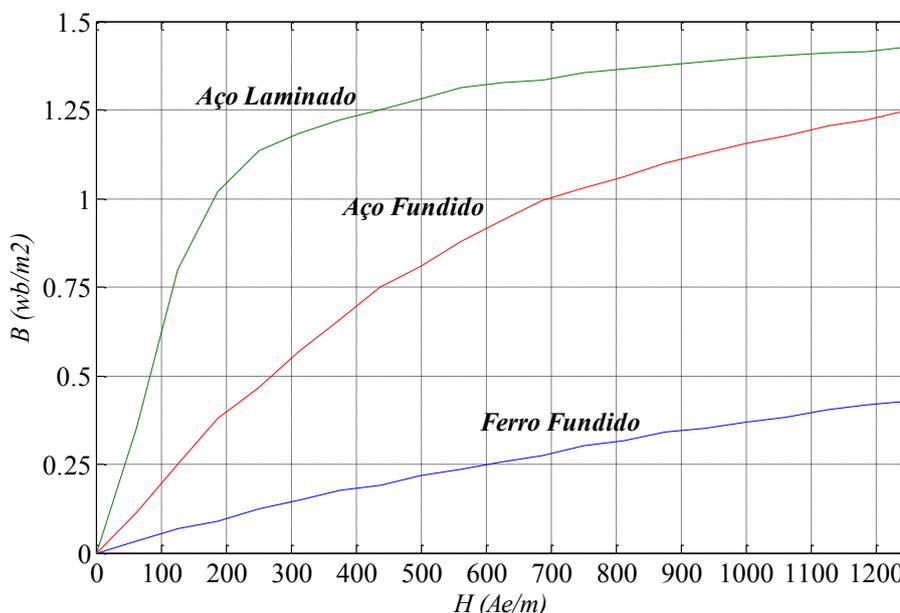


3.5 Curva de magnetização e permeabilidade magnética

Suponha que tenhamos um eletroímã com o qual se pode aumentar a corrente elétrica. Aumentando-se a corrente, aumenta-se a intensidade de campo magnético que orienta os domínios magnéticos do núcleo do eletroímã, ou seja, aumentando H aumenta-se B . Fluxo e densidade de fluxo magnético são funções da quantidade de domínios orientados. A quantidade de domínios que formam o material, entretanto, é limitada. Chega-se a um ponto em que, mesmo se aumentando H , não se aumenta mais B . Neste caso, diz-se que o material saturou magneticamente – todos os domínios que compõem o material já estão orientados, não há mais o que orientar. Na Figura 3.8, vemos a curva de magnetização de alguns materiais ferromagnéticos. Observe que essa curva descreve como o material se comporta na presença de um campo magnético externo. A densidade de campo aumenta, apresentando um comportamento próximo ao linear para baixos valores de intensidade de campo magnético H . Por exemplo, no aço laminado, até uma densidade de campo de 1 Wb/m^2 , a curva de magnetização é praticamente linear. Para valores de densidade de campo maior que 1 Wb/m^2 , porém, a curva de magnetização não é linear. Os motores elétricos e transformadores são

projetados para operarem na faixa linear da curva de magnetização. Existem alguns transformadores especiais que são projetados para operar na saturação.

Figura 3.8 – Curvas de magnetização do ferro fundido, aço laminado, aço fundido



A permeabilidade magnética do material, que é representada pela letra grega μ (pronuncia-se mi), é uma constante que depende do material que relaciona intensidade de campo magnético e densidade de fluxo magnético (3.2). Em outras palavras, é uma constante que descreve como o material se magnetiza na presença de um campo magnético externo.

$$\mu = \frac{B}{H} \quad (3.2)$$

A permeabilidade magnética dos materiais é a inclinação da curva de magnetização em sua região linear. Dessa forma, a permeabilidade do material aço silício laminado é maior que a permeabilidade do aço fundido (ver Figura 3.8).

Por convenção, a permeabilidade magnética do vácuo é considerada referência e vale $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} H/m$. É comum expressar a permeabilidade magnética dos materiais em relação ao vácuo (3.3), onde μ_r é a permeabilidade relativa do material. Alguns materiais ferromagnéticos e sua permeabilidade relativa estão expostos na Tabela 3.2. Nessa tabela vemos, por exemplo, que o níquel, com 99% de pureza, possui uma permeabilidade magnética 750 vezes maior que o vácuo.

$$\mu = \mu_r \mu_0 \quad (3.3)$$

Tabela 3.2 – Alguns materiais ferromagnéticos e sua permeabilidade relativa

Material	μ_r	Aplicação
Níquel (99% de pureza)	750	–
Ferro (99,8% de pureza)	5000	–
Aço-Silício sem Grãos Orientados	7000-16000	Transformadores e máquinas rotativas em geral.
Aço-Silício com Grãos Orientados	40000	Transformadores de corrente e de potencial.
Supermalloy NiFeMo	40000-100000	Transformadores ultrasensíveis
Superpermalloy	100000-1000000	–

Observa-se, na Tabela 3.2, que os materiais ferromagnéticos orientam seus domínios de forma a gerarem muito mais linhas de campo que o vácuo. Na presença de um campo externo, os domínios que formam o material se orientam no mesmo sentido do campo externo, logo, na presença de um ímã externo, esses materiais são fortemente atraídos. Quanto maior a permeabilidade magnética do material que compõe o núcleo de um eletroímã, de menos corrente se necessita para criar uma determinada densidade de fluxo. Por exemplo, um eletroímã que possui um núcleo de aço silício, com grãos orientados, necessita somente de 12,5% da corrente do mesmo eletroímã, com núcleo de ferro de 99,8% de pureza. Por esse motivo, são utilizados materiais ferromagnéticos nos núcleos de transformadores e de máquinas rotativas.

Além dos materiais ferromagnéticos, há mais duas categorias de materiais importantes: os paramagnéticos e os diamagnéticos. Os materiais paramagnéticos se magnetizam como os materiais ferromagnéticos, com um campo magnético na mesma orientação do campo externo, mas em muito menor intensidade. Sua permeabilidade relativa é próxima à unidade, mas sempre maior que esta. Os materiais paramagnéticos são levemente atraídos por um ímã externo. Já os materiais diamagnéticos possuem permeabilidade menor que a unidade. O campo induzido nesses materiais é em oposição ao campo externo. Desta forma, os materiais paramagnéticos são levemente repelidos por um ímã externo. Na Tabela 3.3 são mostrados alguns materiais diamagnéticos e paramagnéticos. É interessante notar que o corpo humano, que é constituído na sua maioria por água e carbono, é diamagnético.

Tabela 3.3 – Alguns materiais paramagnéticos e diamagnéticos.

Material	μ_r	
Alumínio	1,0000207	Paramagnéticos
Oxigênio	1,0000020	
Ar	$\cong 1,000000$	
Vácuo	=1	
Água	0,9999910	Diamagnéticos
Cobre	0,9999904	
Carbono (Grafite)	0,9999840	
Carbono (diamante)	0,9999790	
Ouro	0,9999656	

3.6 Características dos ímãs permanentes

Já foi mencionada a importância dos ímãs para o desenvolvimento tecnológico. Os ímãs desempenham um papel fundamental no processo de conversão de energia em muitos equipamentos e sensores. Um exemplo importante é a máquina síncrona, com ímã permanente. Essa máquina está presente em muitos veículos híbridos, além de ser fundamental para geração eólica de média e baixa potência.

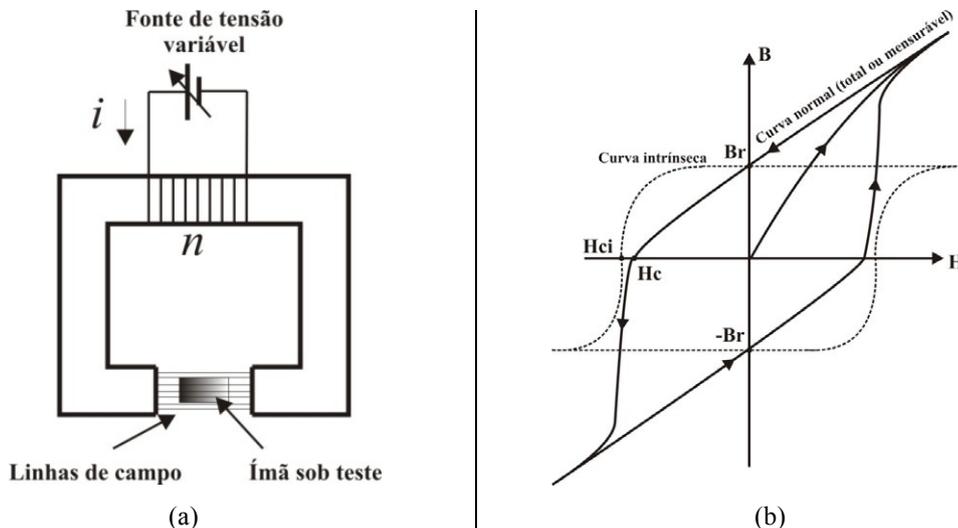
Os ímãs permanentes são frequentemente caracterizados por sua curva de magnetização. Essa curva é traçada submetendo o ímã permanente a um campo variante externo. Na Figura 3.9 (a) é mostrado o ímã sob teste e na Figura 3.9 (b) as suas duas curvas de magnetização normal e intrínseca.

A curva normal representa a curva de magnetização quando a densidade de campo B sofre a contribuição do campo externo e dos domínios magnéticos do ímã (da indução do próprio ímã), ou seja, $B = \mu_r \mu_0 H + B_i$, onde $\mu_r \cong 1.0$, se o meio onde está sendo realizado o teste for o ar. A contribuição do próprio ímã, B_i , é conhecida como indução intrínseca. A curva de magnetização intrínseca é útil quando necessita da contribuição única do ímã reagindo a um campo magnético externo. Quando não há campo externo, a curva de magnetização normal é o bastante para caracterização do ímã.

Os parâmetros que caracterizam os ímãs permanentes são listados a seguir:

- B_r – (medido em gauss) Densidade de fluxo residual normal. Corresponde à densidade de fluxo quando a intensidade de campo é nula depois de uma saturação.
- H_c – (medido em Oe) Força coercitiva normal. Corresponde à intensidade de campo necessária para desmagnetizar o ímã, ou seja, reduzir a zero o campo residual.
- H_{ci} – (medido em Oe) Força coercitiva intrínseca. Intensidade de campo necessária para reduzir a indução intrínseca B_i do ímã a zero.
- BH(Max)** – (medido em MGOe) É o valor máximo do produto B e H . É um indicador da densidade de energia por volume do ímã.

Figura 3.9 – (a) esquema para determinação da curva de magnetização de ímãs permanentes; (b) curva de magnetização de ímãs permanentes



Na Tabela 3.4, encontram-se os valores típicos de alguns ímãs comerciais.

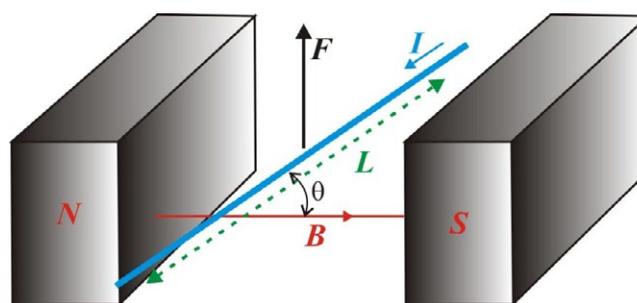
Tabela 3.4 – Valores típicos de parâmetros de ímãs permanentes comerciais

Ímã Permanente	B_r (G)	H_c (Oe)	H_{ci} (Oe)	BH(Max) (MGOe)
NdFeB N50	14000	11500	14000	50
Sm2Co17	11500	8000	10000	28,0
Sm2Co5	10000	9500	13000	24,0
AlNiCo - 9	10500	1500	1600	11,0
AlNiCo - 5	12700	640	650	5,5
SrFe - Ferrite	3800	2800	2900	3,5

3.7 Força magnética atuando em um condutor com corrente elétrica e em cargas elétricas

A força magnética que se origina em um condutor percorrido por uma corrente elétrica e submetido a um campo magnético externo, visto na Figura 3.10, é o princípio que rege todas as máquinas rotativas. O princípio do alinhamento entre dois campos magnéticos e o princípio da força exercida em condutores carregados, sujeitos a um campo magnético, são, na realidade, dois lados de uma mesma moeda. O segundo princípio, no entanto, mostra, de forma mais compreensiva, que uma força mecânica nasce de uma relação entre eletricidade e magnetismo. Em outras palavras, o processo de conversão de energia eletromecânica está intrinsecamente relacionado com a interação entre eletricidade e magnetismo. A expressão matemática desta relação entre força, eletricidade e magnetismo é mostrada em (3.4).

Figura 3.10 – Força num condutor eletrizado dentro de um campo magnético



$$F = ILB\text{sen}(\theta) \quad (3.4)$$

Onde:

F – Força mecânica (N)

I – Corrente elétrica (A)

L – Comprimento do condutor que está sujeito ao campo magnético (m)

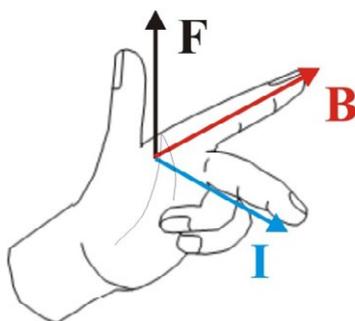
B – Densidade de campo magnético (Wb/m² ou Tesla)

θ – Ângulo entre o condutor e as linhas de campo magnético

Se o campo magnético for considerado constante, um ímã permanente, por exemplo, e se não há variação do comprimento do condutor, percebe-se claramente a relação básica da conversão eletromecânica de energia. Em outras palavras, aumentando-se a corrente aumenta-se a força mecânica.

A regra da mão esquerda de John Ambrose Fleming (1849-1945), cuja convenção original é composta para a mão esquerda (embora possa ser estabelecida, com algumas alterações, para a mão direita), afirma que, “**se o dedo indicador apontar para as linhas de campo e o dedo médio apontar para o sentido da corrente, o polegar, de forma perpendicular aos dois dedos, apontará para o sentido da força atuante no condutor**”. Esta regra, mostrada na Figura 3.11, é útil quando se quer determinar o sentido da força – em várias configurações – de condutores percorridos por correntes, sujeitos a campos magnéticos.

Figura 3.11 – Regra da mão esquerda



A força sobre condutores carregados, descrita nesta seção, é muito importante para a compreensão sobre o funcionamento de alguns motores elétricos, no entanto é uma particularidade de um fenômeno maior. Essas forças surgem em cargas elétricas individuais, em movimento, no interior de campos magnéticos. A expressão que relaciona força, carga, velocidade e campo magnético é mostrada em (3.5). Ao comparar as forças em cargas elétricas no interior de campos elétricos e em campos magnéticos, observam-se duas diferenças fundamentais:

- I – No primeiro, não se necessita de movimento da carga; no segundo, só surge força se houver movimento da carga elétrica.
- II – As trajetórias são diferentes. Enquanto no campo elétrico as cargas se movimentam no sentido das linhas de campo, no campo magnético seu movimento é perpendicular às linhas, como mostrado na Figura 3.12. A regra da mão esquerda pode ser utilizada para se estimar a trajetória de uma carga elétrica em movimento, dentro de um campo magnético.

$$F = qvB\text{sen}(\theta) \quad (3.5)$$

Onde:

F – Força mecânica (N)

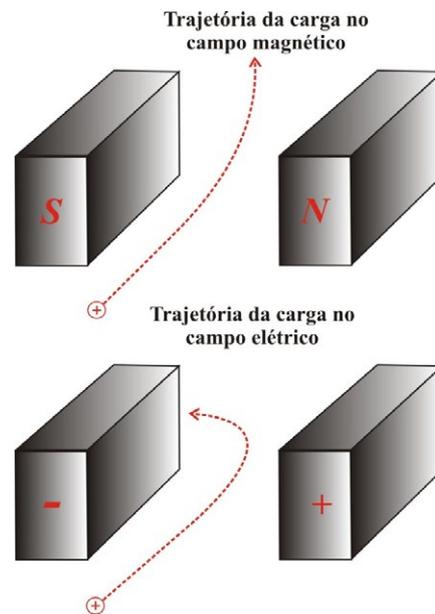
q – Carga elétrica (C)

v – Velocidade da carga (m/s)

B – Densidade de campo magnético (Wb/m² ou Tesla)

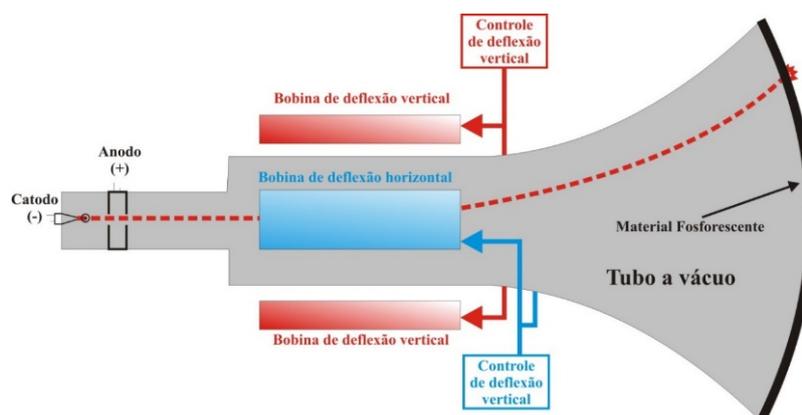
θ – Ângulo entre o vetor velocidade e as linhas de campo magnético

Figura 3.12 – Trajetórias de uma carga positiva se movimentando num campo magnético e elétrico



Tanto nos campos elétricos quanto nos campos magnéticos, é possível alterar a trajetória de uma carga elétrica que se movimenta dentro do campo, alterando o valor do campo. Isto pode ser verificado nas expressões (1.3) e (3.5), respectivamente. Quando se altera o valor do campo magnético, altera-se a força e, conseqüentemente, a trajetória da carga. Se for o caso de várias cargas atiradas num mesmo sentido e direção, chama-se a isto de feixe de cargas. Os campos magnéticos e elétricos provocam deflexão num feixe de cargas elétricas. Esse princípio foi a base dos tubos de raios catódicos ou CRT (*Cathode Ray Tube*), propostos pelo alemão Karl Ferdinand Braum (1850-1915) em 1897. Por um longo tempo, as TVs utilizaram essa tecnologia na sua fabricação, perdendo espaço, no final do século XX, para as tecnologias Plasma e LED. A planta simplificada do tubo de raios catódicos utilizados em TVs é mostrada na Figura 3.13. Um feixe de elétrons era lançado dentro de um tubo a vácuo e sua deflexão vertical e horizontal era alterada a partir da variação da corrente das bobinas. O feixe se chocava com um material fosforescente, criando um ponto luminoso que podia ser localizado em qualquer área da tela, bastando para isto variar a deflexão horizontal e vertical.

Figura 3.13 – Planta simplificada de um tubo de raios catódicos utilizado em TV



3.8 Leis do magnetismo

Uma lei científica é uma declaração sobre algum aspecto da natureza que foi comprovada a partir de observação, sob determinadas condições. Tal observação se dá por experimentos realizados repetidas vezes, sob condições controladas. Tais leis são importantes para a ciência, pois limitam o terreno daquilo que é e não é ciência. Por exemplo, a segunda lei de Newton afirma que “a força resultante que atua num corpo é igual à massa multiplicada pela sua aceleração”. Tal lei foi comprovada por experimentos repetitivos ao longo do tempo.

3.8.1 Lei de Faraday

Uma das leis mais importantes da eletricidade e do magnetismo é a lei de Faraday. Esta lei afirma que:

“Se há variação de campo magnético (fluxo concatenado) no tempo, haverá tensão elétrica induzida”.

É nessa lei que a eletricidade e o magnetismo se encontram, ou seja, magnetismo gera eletricidade. Na Figura 3.14, encontramos um experimento simples que pode ser realizado em laboratório. Inserindo-se um ímã permanente dentro de uma bobina, percebe-se que, quando não há movimento, não há tensão induzida na bobina. De modo inverso, quando há movimento do ímã, há tensão induzida. Isso mostra que só há tensão induzida se houver variação de campo magnético.

Figura 3.14 – Tensão induzida por variação de campo magnético



A expressão matemática aproximada para representar a lei de Faraday é vista em (3.6). O símbolo matemático Δ (*delta*) corresponde a uma variação da grandeza. Por exemplo, $\Delta t = t_{final} - t_{inicial}$ corresponde a uma variação de tempo. Essa expressão mostra que quanto maior a variação de fluxo e menor a variação no tempo, maior será a tensão induzida. Em outras palavras, só há tensão induzida se houver mudança de fluxo magnético no tempo.

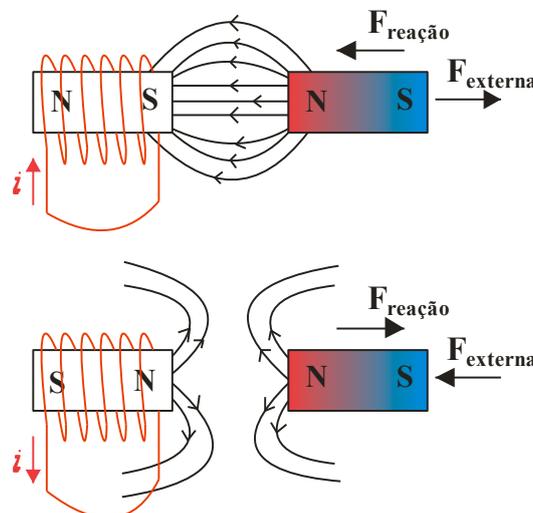
$$\text{Tensão induzida} = \frac{\text{variação de fluxo magnético concatenado}}{\text{variação de tempo}} = \frac{\Delta\lambda}{\Delta t} \quad (3.6)$$

Fluxo concatenado significa fluxo resultante nas N espiras. A expressão para o fluxo concatenado é vista em (3.7).

$$\lambda = N\phi \quad (3.7)$$

Ao aproximar um ímã permanente de uma bobina, haverá tensão nos terminais desta bobina, mas só haverá corrente se os terminais da bobina forem ligados a alguma carga, por exemplo, um resistor. O que acontece se ligarmos os dois terminais da bobina um ao outro? Haverá a circulação de corrente na bobina e criação de um campo magnético – da bobina – que se opõe à variação do campo magnético do ímã. Isso implica dizer que, se houver uma aproximação do ímã permanente da bobina, haverá a criação de um campo magnético na bobina que empurra o ímã permanente que está se aproximando. Por outro lado, se houver um afastamento do ímã permanente da bobina, haverá a criação de um campo na bobina que puxa o ímã permanente. A reação sempre é no sentido de se opor à variação. Esta é a lei de Lenz. Na realidade, a lei de Lenz põe um sinal negativo na expressão de Faraday (11), porém é muito importante, pois esclarece a conversão eletromecânica de energia. De fato, para a criação de um campo na bobina é necessário energia, e essa energia foi cobrada da pessoa que estava movimentando o ímã. A força de oposição foi o preço da conversão de energia mecânica em elétrica, como mostra a Figura 3.15.

Figura 3.15 – Efeito da lei de Lenz na conversão eletromecânica de energia



3.8.2 Lei de Ampère

Outra lei importante no estudo do magnetismo é a lei de Ampère, a qual afirma que:

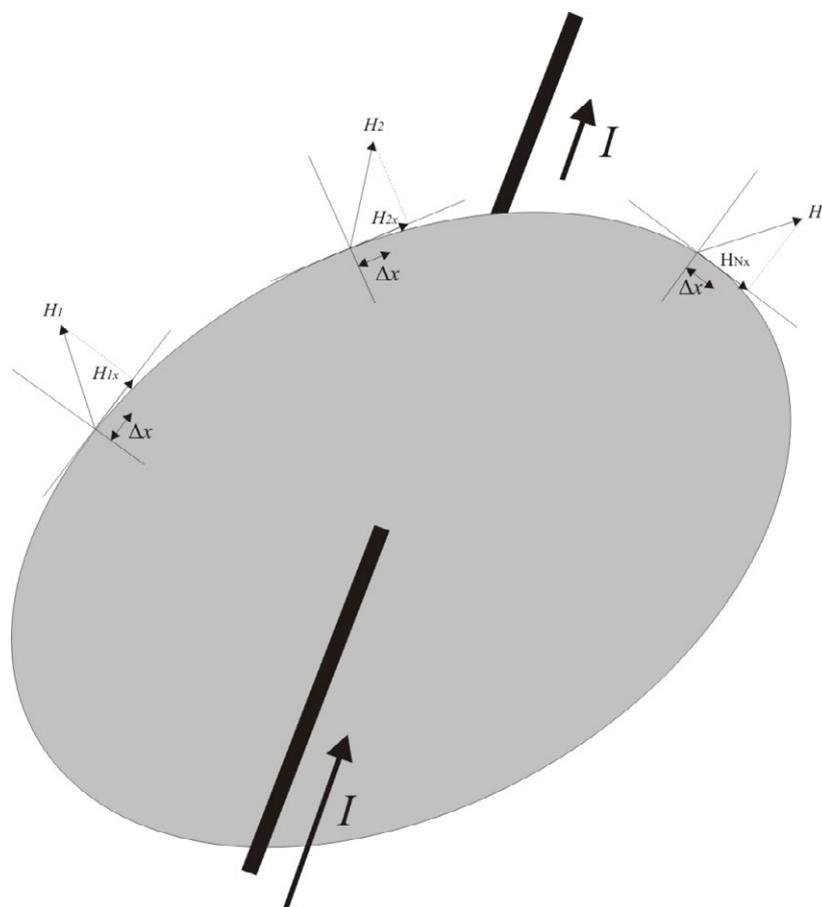
“Num percurso fechado, o somatório dos produtos das componentes da intensidade do campo tangencial ao percurso H_x e a componente linear Δx é igual à corrente que cruza a área formada pelo percurso fechado”.

A Figura 3.16 e a expressão matemática da lei de Ampère mostrada em (3.8), esclarecem o enunciado.

$$H_{1x}\Delta x + H_{2x}\Delta x + H_{3x}\Delta x + \dots + H_{Nx}\Delta x = I \quad (3.8)$$

Enquanto a lei de Faraday afirma que, a partir do magnetismo, gera-se eletricidade, a lei de Ampère afirma que, a partir de eletricidade (corrente elétrica), gera-se magnetismo. Essas duas leis regem o comportamento das máquinas elétricas destinadas à conversão eletromecânica de energia. Os motores elétricos são exemplos dessas máquinas. O motor converte energia elétrica em energia mecânica, enquanto um gerador elétrico converte energia mecânica em energia elétrica.

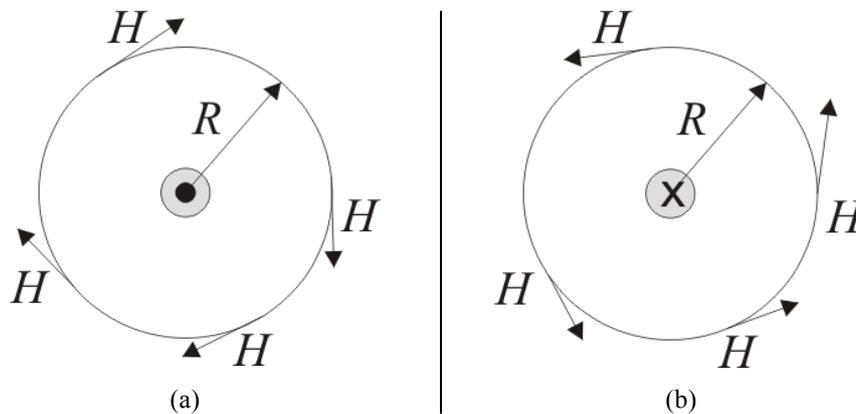
Figura 3.16 – Visualização da lei de Ampère



3.9 Campo magnético ao redor de um condutor com corrente elétrica

É possível mostrar, com limalha de ferro, que as linhas de campo magnético ao redor de um condutor que conduz uma corrente contínua I são circulares. Na Figura 3.17, é mostrada uma linha de campo a uma distância R do fio. O fio é representado perpendicularmente à folha de papel. Na Figura 3.17 (a), o sentido da corrente é entrando na folha de papel (por convenção, ponto). Na Figura 3.17 (b), o sentido é saindo da folha de papel (por convenção, xis). É possível verificar o sentido do campo a partir da regra da mão direita: “**O Polegar aponta para a corrente e os outros dedos (indicador ao mínimo), que circulam o condutor, apontam para o sentido do campo.**”

Figura 3.17 – Campo criado por uma corrente conduzida por um condutor visto em corte:
(a) corrente entrando no papel; (b) corrente saindo do papel



Como o módulo do campo pode ser considerado constante ao longo do círculo de raio R , aplicando a lei de Ampère, temos, para o módulo da intensidade campo, a expressão (3.9). Pondo o módulo do campo em evidência, o somatório dos Δx é circunferência do círculo de raio R (3.10). Consequentemente, a intensidade de campo é expressa em (3.11), enquanto a densidade de fluxo magnético, que depende da permeabilidade do meio, é expressa em (3.12). Observa-se que, quanto mais próximo do fio, maior a intensidade de campo magnético e densidade de fluxo.

$$H\Delta x + H\Delta x + H\Delta x + \dots + H\Delta x = I \quad (3.9)$$

$$H(2\pi R) = I \quad (3.10)$$

$$H = \frac{I}{2\pi R} \quad (3.11)$$

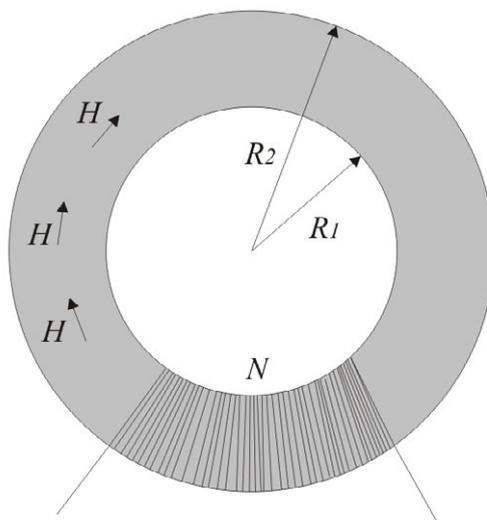
$$B = \frac{\mu_r \mu_0 I}{2\pi R} \quad (3.12)$$

A expressão (3.12) é conhecida também como um caso particular da **lei de Biot-Savart**, para um condutor de comprimento infinito. A descrição dessa lei faz uma justa homenagem aos cientistas franceses **Jean-Baptiste Biot (1774-1862)** e **Felix Savart (1791-1841)**, os quais propuseram uma expressão que, semelhante à lei de Ampère, relaciona eletricidade e magnetismo, ou mais precisamente, demonstra que, a partir da eletricidade, é possível criar campo magnético, ou seja, “eletricidade gera magnetismo”. Tais cientistas foram motivados pelas observações do cientista dinamarquês Hans Christian Oersted, que constatou a deflexão de uma agulha magnetizada nas proximidades de um condutor circulado por corrente elétrica contínua, por volta de 1820. A expressão da lei de Bio-Savart foge ao escopo deste livro devido a sua complexidade.

3.10 Campo magnético numa bobina com núcleo toroidal

As bobinas com núcleo toroidais são muito utilizadas em circuitos eletrônicos. O campo magnético pode ser considerado constante ao longo do círculo no meio do núcleo, conforme se pode conferir pela Figura 3.18. Admitindo-se que o módulo do campo é constante dentro do núcleo e aplicando-se a lei de Ampère, este módulo do campo magnético dentro do núcleo é representado pela expressão (3.13). A intensidade de campo e a densidade de fluxo magnético são expressos por (3.14) e (3.15), respectivamente.

Figura 3.18 – Bobina com núcleo toroidal



$$H \frac{2(R_1 + R_2)}{2} \pi = NI \quad (3.13)$$

$$H = \frac{NI}{(R_1 + R_2)\pi} \quad (3.14)$$

$$B = \frac{\mu_r \mu_0 N I}{(R_1 + R_2) \pi} \quad (3.15)$$

Onde:

N – Quantidade de espira.

I – Corrente circulando na bobina.

R_1 R_2 – Raio interno e externo do toroide.

μ_r – Permeabilidade relativa do núcleo.

3.11 Indutância

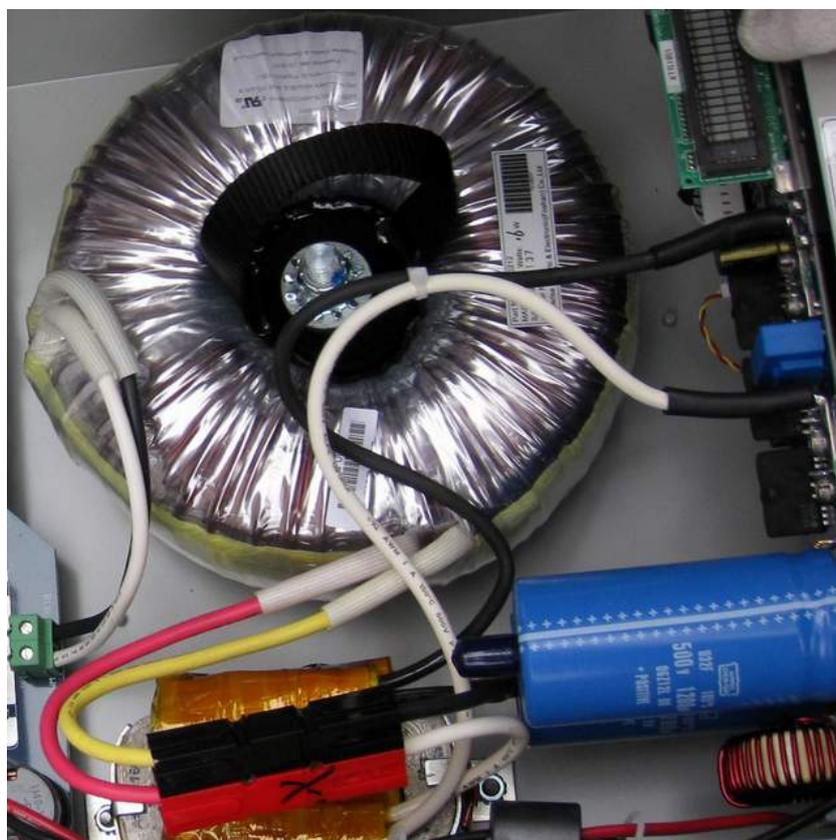
Vimos que a lei de Faraday afirma que, se há variação de campo magnético no tempo, haverá tensão induzida. Para uma bobina, com quantidade de espiras constante, se há uma variação de corrente, haverá uma variação de fluxo concatenado e, conseqüentemente, haverá uma tensão induzida na bobina. De fato, as bobinas criam dificuldade para a variação de corrente, e a indutância é a grandeza que mede esta intensidade. A expressão matemática para indutância é mostrada em (3.16) – é a razão do fluxo concatenado pela corrente. É bom notar que a expressão final que modela as indutâncias não depende da corrente, e sim somente das seguintes características físicas: dimensão física da bobina, número de espiras e permeabilidade relativa do núcleo. Inúmeros circuitos elétricos e eletrônicos utilizam as bobinas para não permitirem variações súbitas da corrente que por elas circulam.

$$L = \frac{\lambda}{I} \quad (3.16)$$

Unidade de medida (SI)		henry (H)
Submúltiplo mais utilizado		milihenry (mH)
Relação		1 H = 1000 mH

Na Figura 3.19, é mostrado o emprego de uma bobina em um circuito eletrônico utilizado em geração fotovoltaica. Um ruído de corrente pode ser considerado uma variação rápida de corrente. Essas bobinas impedem que esses ruídos se propaguem para a rede elétrica da concessionária. Eles funcionam como filtros de corrente, que barram o que não útil ao sistema elétrico. É bom observar o aspecto dual que diferencia capacitância e indutância. Enquanto a primeira é utilizada para evitar variações súbitas de tensão, a indutância é destinada a evitar variações súbitas de corrente.

Figura 3.19 – Indutância num circuito de um inversor utilizado em geração fotovoltaica



3.11.1 Determinação da indutância numa bobina de núcleo toroidal

A expressão que representa a indutância de uma bobina com núcleo toroidal é muito útil quando se almeja projetar um determinado indutor. A área da seção circular transversal do toroide é determinada por (3.17).

$$A = \left(\frac{R_2 - R_1}{2}\right)^2 \pi \quad (3.17)$$

O fluxo magnético é expresso por (3.18).

$$\phi = BA = \frac{\mu_r \mu_0 NI (R_2 - R_1)^2 \pi}{(R_1 + R_2) \pi 4} = \frac{\mu_r \mu_0 NI (R_2 - R_1)^2}{4(R_1 + R_2)} \quad (3.18)$$

Mas a indutância se relaciona com o fluxo magnético por (3.19).

$$L = \frac{\lambda}{I} = \frac{N\phi}{I} \quad (3.19)$$

Inserindo o valor do fluxo (3.18) em (3.19), temos a expressão final da indutância (3.20). Observa-se que a indutância não depende da corrente, como já foi mencionado. Depende somente das características da permeabilidade do núcleo, do número de espiras e das características geométricas do núcleo.

$$L = \frac{\mu_r \mu_0 N^2 (R_2 - R_1)^2}{4(R_1 + R_2)} \quad (3.20)$$

Exemplo prático:

Pretende-se projetar uma indutância para um circuito eletrônico com os seguintes dados:

$$L = 100 \text{ mH} = 0,1 \text{ H};$$

$$R_1 = 2 \text{ cm};$$

$$R_2 = 3 \text{ cm};$$

$$\mu_r = 4000$$

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H/m}$$

Determinar a quantidade de espiras da bobina.

Solução:

É necessário observar as corretas unidades. O sistema de unidade padrão neste livro é o SI (Sistema internacional), como já foi mencionado. Trabalhando-se a expressão (3.20) e substituindo-se os valores, tem-se:

$$N = \sqrt{\frac{4(R_1 + R_2)L}{\mu_r \mu_0 (R_2 - R_1)^2}}$$

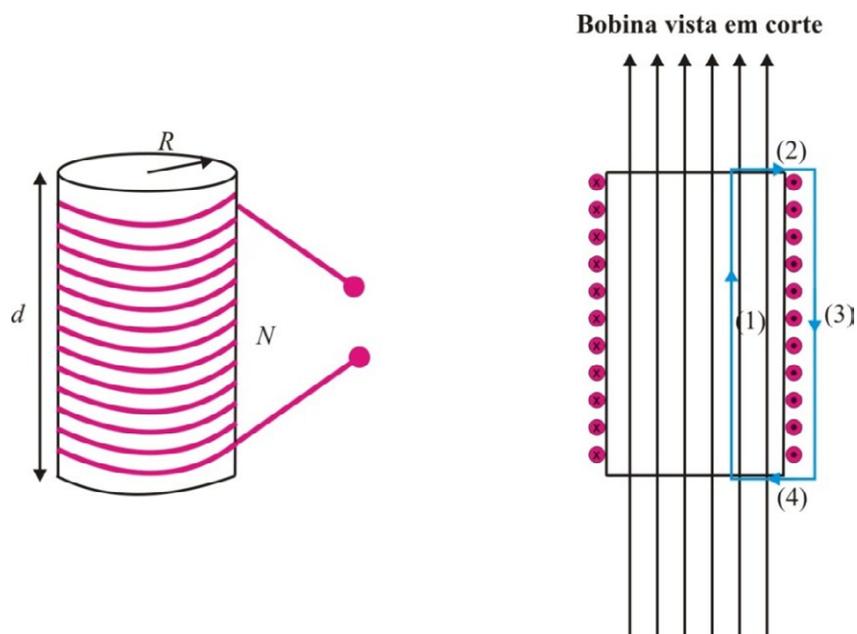
$$N \cong 200 \text{ espiras}$$

3.11.2 Indutância aproximada de uma bobina linear

A expressão da indutância da bobina de seção circular, vista na Figura 3.20, pode ser determinada de forma simplificada pela lei de Ampère, observando-se os seguintes pressupostos:

- I – O comprimento d seja muito maior que o raio R . Popularmente bobina de tamanho infinito.
- II – Não haja dispersão de linhas de fluxo magnético nas laterais da bobina, ou seja, no caminho (3) da Figura 3.20 o campo magnético é nulo.
- III – O campo magnético dentro da bobina é constante.

Figura 3.20 – Bobina de seção transversal circular e sua vista em corte



Aplicando-se a lei de Ampère no caminho fechado (1)-(2)-(3)-(4), verifica-se que somente o percurso (1) não é nulo. Os percursos (2) e (4) do campo não possuem projeção em relação ao deslocamento no percurso – em outras palavras, o campo é perpendicular ao deslocamento no percurso, daí a contribuição de $H\Delta x$, da lei de Ampère ser nula. No percurso (3), a intensidade de campo H é nula, o que faz a contribuição $H\Delta x$ ser também nula. Desta forma, tem-se a expressão (3.21) que teve origem na lei de Ampère, onde N é o número de espiras circulares pelo caminho fechado (1)-(2)-(3)-(4), que é, por sua vez, o número de espiras da bobina.

$$H d = NI \quad (3.21)$$

Determinando-se a densidade de fluxo, a partir de (3.21), temos (3.22).

$$B = \frac{\mu_r \mu_0 NI}{d} \quad (3.22)$$

Multiplicando-se a área da seção do núcleo pela expressão (3.22), temos a expressão do fluxo dentro do núcleo (3.23).

$$\phi = B\pi R^2 = \frac{\mu_r \mu_0 NI\pi R^2}{d} \quad (3.23)$$

Substituindo-se o fluxo (3.23) na expressão da indutância, temos (3.24), que, por sua vez, gera a expressão final da indutância (3.25).

$$L = \frac{\lambda}{I} = \frac{N\phi}{I} = \frac{\mu_r \mu_0 N^2 I \pi R^2}{Id} \quad (3.24)$$

$$L = \frac{\mu_r \mu_0 N^2 \pi R^2}{d} \quad (3.25)$$

Observe ainda que, para uma bobina com núcleo de ar, vale a expressão (3.26), posto que a permeabilidade magnética do ar é aproximadamente unitária.

$$L = \frac{\mu_0 N^2 \pi R^2}{d} \quad (3.26)$$

A expressão (3.25) é uma aproximação que melhora à medida que a relação $\frac{d}{R}$ aumenta. Na maioria dos projetos, a expressão (3.25) é suficiente. Há, no entanto, expressões mais precisas – é o caso da expressão de Lorentz e Nagaoka, que podem ser pesquisadas e utilizadas, caso haja interesse por maior precisão.

Exemplo prático:

Deseja-se projetar uma indutância com núcleo de ferro magnético os seguintes dados:

$$L = 100 \text{ mH} = 0,1 \text{ H};$$

$$R = 20 \text{ cm};$$

$$\mu_r = 4000$$

$$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H/m}$$

Determinar o número de espiras.

Solução:

$$N = \sqrt{\frac{dL}{\mu_r \mu_0 \pi R^2}}$$

$$N \cong 38 \text{ espiras}$$

3.12 Força magnetomotriz e relutância magnética

Sabe-se que o fluxo das linhas de campo magnético pode ser comparado ao fluxo de um líquido ou uma corrente elétrica nos circuitos elétricos. A força magnetomotriz é a responsável por este fluxo. A corrente e o número de espiras são os elementos que geram as

linhas de campo. Quanto maior a corrente e o número de espiras, maior será o fluxo magnético. Pode-se definir, então, que existem geometria e materiais em que as linhas de fluxo circulam com mais facilidade e outros com mais dificuldade. Matematicamente, temos a expressão (3.27). Tal expressão afirma que a força magnetomotriz é igual à relutância magnética multiplicada pelo fluxo. Assim, a relutância magnética está associada à dificuldade da passagem do fluxo magnético pelo local. Pode-se perceber, a partir de (3.28), que a relutância depende do material do núcleo e da geometria do aparato.

$$F_{mm} = R\phi \quad (3.27)$$

Na bobina toroidal, sua relutância é expressa por (3.28).

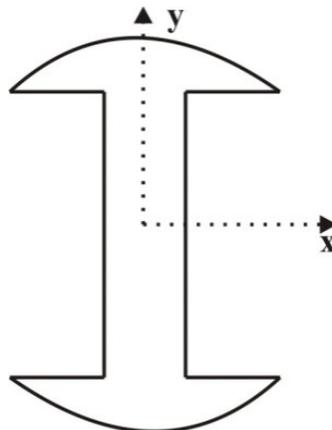
$$R = \frac{4(R_1 + R_2)}{\mu_r \mu_0 (R_2 - R_1)^2} \quad (3.28)$$

Na bobina linear, sua relutância é expressa por (3.29).

$$R = \frac{d}{\mu_r \mu_0 \pi R^2} \quad (3.29)$$

Na Figura 3.21 é mostrado, de forma simplificada, um polo saliente de um rotor de uma máquina rotativa. Observe que há dois eixos imaginários: x e y. Nesse polo, a relutância na direção de y é menor que na direção de x. De fato, na direção de y existe mais ferro no caminho, facilitando, assim, o caminho das linhas de campo magnético. Percebe-se, desta forma, que a relutância depende do eixo geométrico. As relutâncias determinadas em (3.28) e (3.29) são no sentido convencional das linhas de campo das Figuras 3.18 e 3.20, respectivamente.

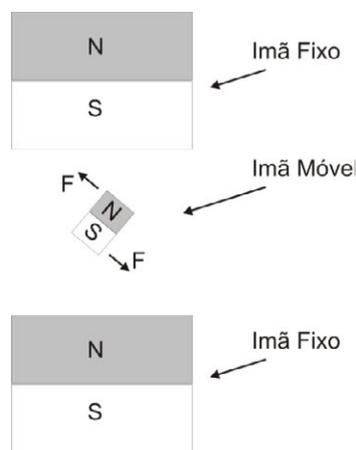
Figura 3.21 – Polo saliente simplificado de um rotor de uma máquina rotativa



3.13 Motor elétrico – aplicações da atração e repulsão magnética

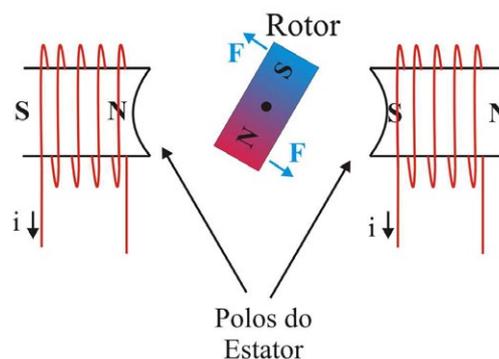
O motor elétrico é uma das principais aplicações da atração e repulsão dos ímãs. O princípio de funcionamento dos motores elétricos é a atração e repulsão entre dois eletroímãs ou entre eletroímãs e ímãs permanentes. Daí, sempre haverá bobinas nos motores elétricos. Um motor elementar é mostrado na Figura 3.22. Esse motor possui dois ímãs: um fixo (estator) e um móvel (rotor). Observe que o ímã móvel, neste instante, possui forças instantâneas de atração e repulsão, que faz com que esse ímã gire no sentido anti-horário. Este é o princípio fundamental de funcionamento dos motores elétricos: **“um ímã tendendo a se alinhar com outro”**.

Figura 3.22 – Motor elementar



Na Figura 3.22, é mostrada outra máquina elétrica elementar, em que o campo estático (fixo) é criado a partir de um eletroímã e a parte rotórica é um ímã permanente. Esse princípio é encontrado nas máquinas síncronas de ímã permanente. Essas máquinas são comuns em geradores eólicos ou na tração elétrica de carros híbridos. Observe as forças instantâneas de atração e repulsão atuando no rotor. Outra observação importante é quanto ao número de polos atuando sobre o rotor – neste exemplo, 2 polos (diz-se, na literatura técnica, que esta máquina possui 2 polos).

Figura 3.23 – Motor elementar em que o campo fixo é criado a partir de um eletroímã



As máquinas elétricas rotativas são máquinas que transformam energia elétrica em mecânica (no caso do motor) ou que transformam energia mecânica em elétrica (no caso do gerador). Os motores são utilizados para mover elevadores, trens, veículos elétricos, esteiras em processos produtivos industriais, movimentar bombas, acionar furadeiras e muitas outras aplicações. Os geradores são utilizados em hidrelétricas, geração nuclear, geração a carvão, geração eólica, maré motriz e muitas outras. Daí, percebe-se a importância do magnetismo. O magnetismo é o elemento principal para a conversão de energia eletromecânica. Motores elétricos, geradores, eletroímãs são alguns exemplos de máquinas que utilizam o magnetismo para transformar energia mecânica em energia elétrica e vice versa.

3.14 Algumas aplicações comerciais do magnetismo

O magnetismo está muito mais presente no nosso cotidiano do que imaginamos. Praticamente não seria possível o nível tecnológico atual sem o magnetismo. Algumas aplicações serão apresentadas a seguir, para mostrar que os conhecimentos expostos neste livro não são conhecimento desvinculados do nosso dia a dia.

3.14.1 Transformadores elétricos

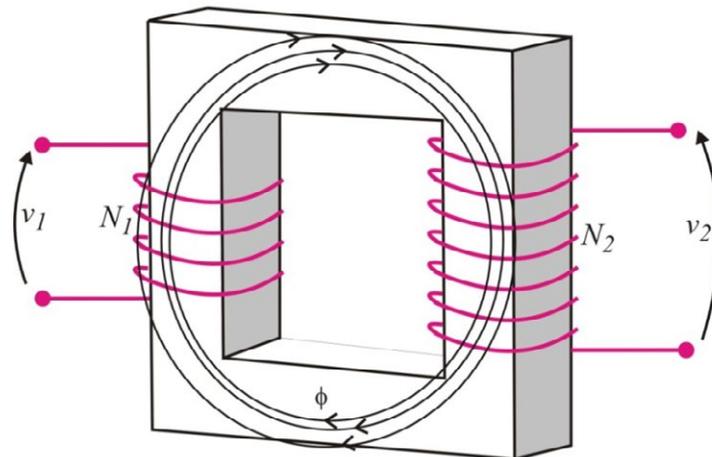
Transformador é uma máquina composta de um núcleo ferromagnético e bobinas, isoladas eletricamente do núcleo e entre as mesmas bobinas. Essa máquina é utilizada para aumentar ou reduzir tensões e correntes elétricas. Graças a essa máquina, temos vários níveis de tensões no sistema elétrico de corrente alternada, nível de transmissão, subtransmissão, distribuição em alta tensão e baixa tensão. O grande problema dos sistemas elétricos é que a geração de energia está longe dos consumidores – em outras palavras, essa geração está longe das cidades e das nossas residências. O transformador permite elevar muito a tensão e transmitir energia a longas distâncias com essas tensões elevadas, por isso foi a grande solução para integração da geração aos consumidores finais. Foi essa máquina que ditou que o sistema elétrico seria em corrente alternada, pois o transformador é uma máquina que opera somente nesse tipo de corrente. Noções mais aprofundadas dos sistemas elétricos em corrente alternada serão abordadas no Capítulo 8.

O transformador é a expressão direta da lei de Faraday. Na Figura 3.24 é mostrado um transformador com dois enrolamentos, contendo, cada um N_1 e N_2 espiras. Admitindo um transformador ideal (perfeito), seus enrolamentos não possuem resistências, as tensões terminais v_1 e v_2 são as tensões induzidas da lei de Faraday. Além do mais, todas as linhas de campo estão cruzando as duas bobinas, ou seja, todas as linhas de campo estão dentro do núcleo ferromagnético do transformador, logo não há dispersão de linhas de campo.

Temos a tensão induzida dos enrolamentos 1 e 2 dadas por (3.30) e (3.31), respectivamente. Como os fluxos nos dois enrolamentos são iguais, divide-se a expressão (3.30) por (3.31), tem-se, então, a expressão (3.32), que relaciona as duas tensões terminais e os respectivos números de espiras de cada bobina. Observe que a lei de Faraday diz que só

existe tensão induzida se houver variação de fluxo. No sistema de corrente alternada, as tensões e correntes variam no tempo, como já foi mencionado nos capítulos anteriores. Desta forma, o fluxo será variável. O transformador não funciona num sistema de corrente contínua, em que a tensão e corrente não varie no tempo.

Figura 3.24 – Transformador com dois enrolamentos, ideal ou perfeito



$$v_1 = \frac{\Delta\lambda_1}{\Delta t} = \frac{\Delta(N_1\phi)}{\Delta t} = N_1 \frac{\Delta(\phi)}{\Delta t} \quad (3.30)$$

$$v_2 = \frac{\Delta\lambda_2}{\Delta t} = \frac{\Delta(N_2\phi)}{\Delta t} = N_2 \frac{\Delta(\phi)}{\Delta t} \quad (3.31)$$

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (3.32)$$

A expressão (3.32) mostra que, no lado de maior número de espiras, se encontra a maior tensão. Por exemplo, um transformador com $N_1 = 1000$ espiras e $N_2 = 500$ espiras, se há uma fonte de tensão alternada de 220 V ligada em v_1 , nos terminais da segunda bobina, a tensão será $v_2 = 110$ V.

3.14.2 Válvulas solenoides

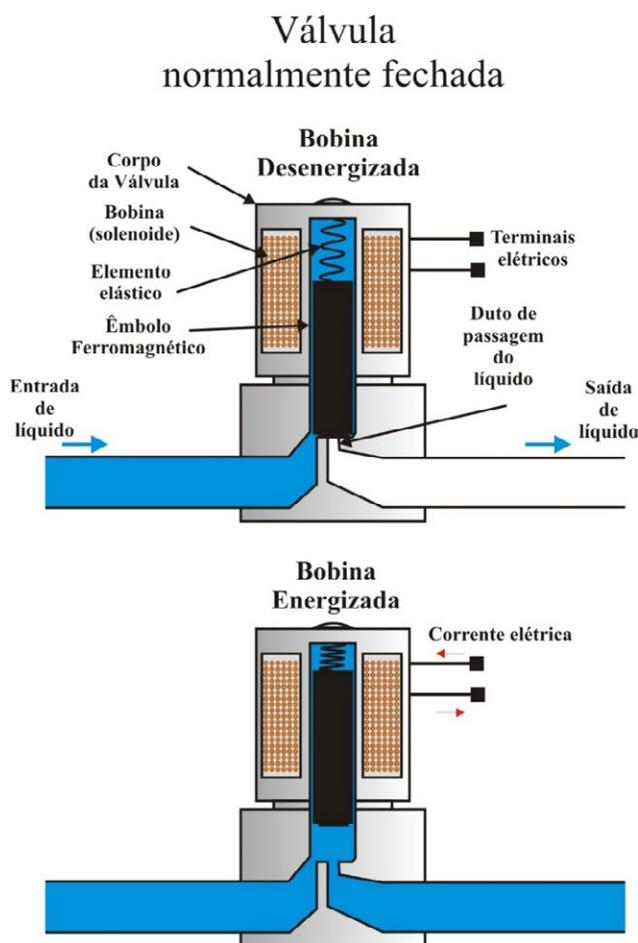
Uma aplicação do magnetismo muito comum nos processos industriais é a válvula solenoide, um dispositivo que controla o fluxo de líquidos a partir de um comando elétrico, ou seja, a partir da energização de uma bobina. Na Figura 3.25, é mostrada simplificada uma válvula e suas partes construtivas. A bobina, quando não energizada, não oferece atração

ao êmbolo ferromagnético, fechando o duto de passagem do líquido. Por isso, essa válvula é do tipo normalmente fechada – em outras palavras, quando desligada, a válvula está fechada. Se, no entanto, a bobina for energizada, a partir de uma fonte de tensão, haverá uma força magnética que atrai o êmbolo ferromagnético, como um ímã atraindo um pedaço de ferro. Essa força faz com que o duto seja liberado para a passagem do líquido. Há vários tipos de válvulas solenoides quanto à pressão de líquido e energização (tensão de alimentação). Há válvulas que possuem bobinas alimentadas com tensão CA tanto em 220 V, 110 V quanto 48 V, com correntes na faixa de 20 mA a 500 mA. Há válvulas que possuem bobinas que operam com tensão CC de 6 V a 48 V e correntes por volta de 200 mA. A potência elétrica consumida dessas válvulas depende da pressão do líquido (variam de 1 W a 20 W).

Do mesmo modo que existe a válvula normalmente fechada, há válvulas normalmente abertas. Esta última precisa ser energizada para que seja fechada.

As válvulas solenoides pertencem à categoria dos atuadores. Atuadores são aqueles componentes que executam alguma tarefa como ligar/desligar cargas elétricas, abrir/fechar a passagem de líquidos ou gases e outros. Os processos industriais estão repletos desses atuadores, participando de vários controles – por exemplo, o controle da quantidade de água na fabricação de refrigerantes. São esses controles que permitem a produção de bens, de acordo com determinadas especificações.

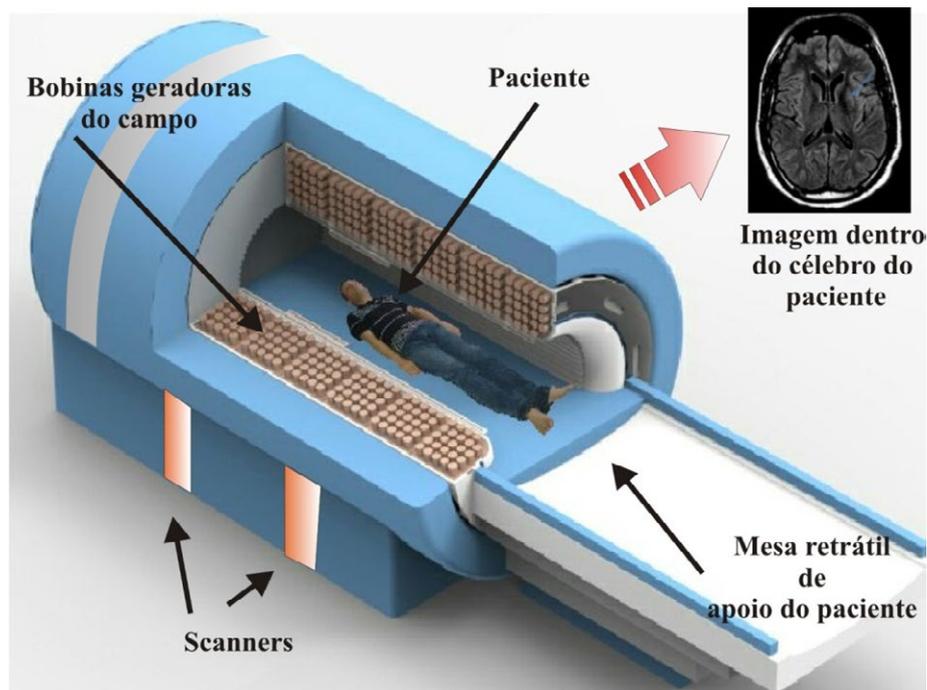
Figura 3.25 – Válvula solenoide simplificada para controle de vazão de líquidos



3.14.3 Máquina de imagem por ressonância magnética

Esta máquina é capaz de sintetizar uma imagem de vários tecidos do corpo humano, a partir do fenômeno da ressonância magnética – RM, visto na Figura 3.26. Foi proposta na década de 1970 nos Estados Unidos. Esse fenômeno se baseia no princípio de que alguns átomos são capazes de absorver e emitir energia quando inseridos num campo magnético. A máquina induz um campo magnético muito intenso – é comum máquinas de RM induzirem campos de 2 ou 3 Tesla. Esses campos são induzidos em várias frequências, fazendo com que alguns átomos emitam energia em determinada frequência. Esse campo magnético induzido pelos átomos é lido pelo scanner e processado para criar uma imagem de várias fatias de uma estrutura tridimensional do corpo humano. A partir desse recurso, são possíveis diagnósticos médicos muito precisos, por exemplo, a visualização precisa da estrutura tridimensional de um tumor, permitindo, assim, que se tomem decisões quanto à agressividade de uma doença e estratégias de como a combater. A máquina de RM, por ser um instrumento que oferece um procedimento preciso, indolor e não invasivo, constitui uma das maiores contribuições da ciência do magnetismo para a humanidade.

Figura 3.26 – Máquina de ressonância magnética



3.14.4 Sensores indutivos

Ao observar a expressão para a indutância de uma bobina, de uma estrutura toroidal, por exemplo, mostrada na seção 3.10.1, nota-se que tal expressão depende da permeabilidade relativa do material. Em outras palavras, a indutância depende do material com o qual é

formado o núcleo da bobina. Uma bobina aberta, mostrada na Figura 3.27 (1), possui uma indutância cuja função matemática é, praticamente, a da permeabilidade relativa do ar. Ao aproximar um corpo de material ferromagnético, Figura 3.27 (2), que possui permeabilidade relativa alguns milhares de vezes a do ar, a indutância irá aumentar. Se o corpo estiver dentro da bobina, caso da Figura 3.27 (3), a indutância será máxima. A indutância, portanto, aumentou com a proximidade do corpo de ferro. Em outras palavras, existe uma dependência da indutância com a proximidade do corpo. Se houver uma maneira de ler essa indutância, direta ou indiretamente há a possibilidade de se estimar a proximidade do corpo. Esse é o princípio de funcionamento do sensor indutivo. Esse tipo de sensor é destinado a detectar metais, com maior precisão, se os metais forem ferromagnéticos. Na Figura 3.28 (a), é mostrado um sensor indutivo industrial utilizado em vários processos, nos quais se deseja a detecção de metais. Na Figura 3.28 (b), é mostrada, de forma simplificada, a aplicação dos sensores nas indústrias que reaproveitam as garrafas PET (iniciais de *Polietileno Tereftalato*) nos seus produtos. Um sensor indutivo, na linha de produção, detecta a presença de metais, como colheres ou garfos, dentro das garrafas, por exemplo, as quais são removidas da esteira para exame minucioso, antes do procedimento de lavagem.

Figura 3.27 – (1) Bobina sem corpo de metal próximo; (2) Bobina com corpo de metal próximo; (3) Bobina com corpo de metal dentro

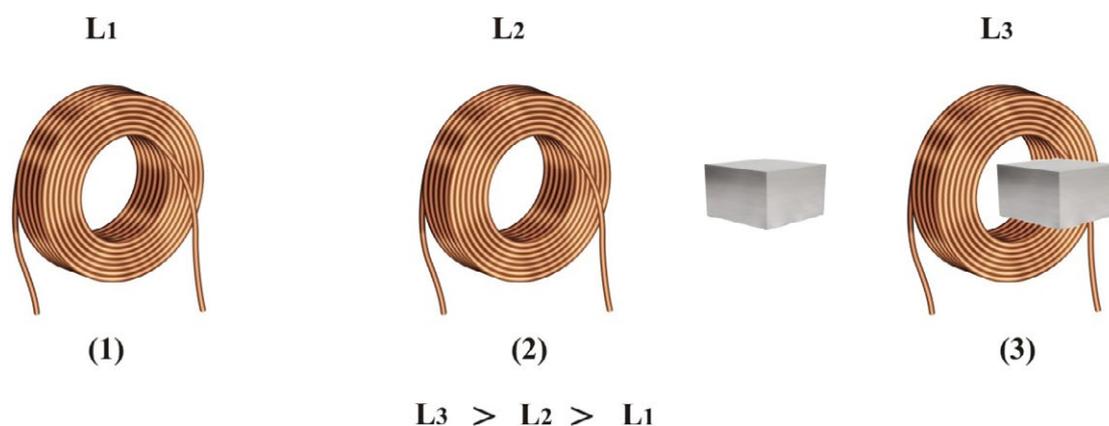
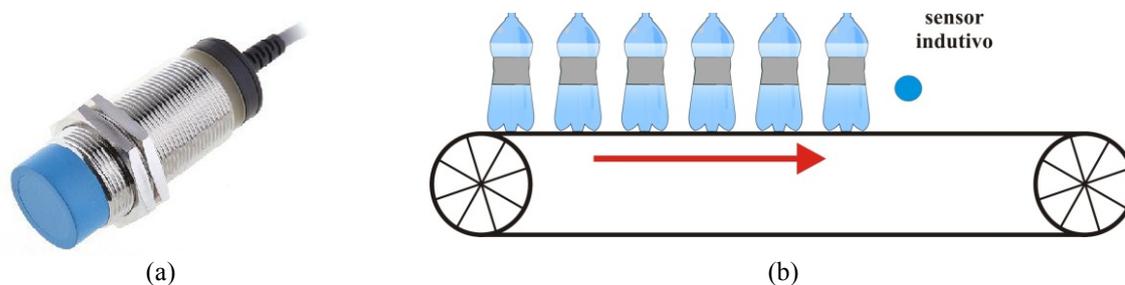


Figura 3.28 – (a) Sensor indutivo industrial; (b) Aplicação dos sensores indutivos



3.14.5 Sensores indutivos para detecção de tráfico de veículos

Os sensores indutivos são muito comuns para detecção de veículos. É possível observar esses sensores nas rodovias, especificamente suas bobinas, dentro de sulcos no asfalto. Os veículos são constituídos, na sua grande maioria, de metais que, quando cruzam essas bobinas, alteram-se suas indutâncias. Em outras palavras, aumentando-se a quantidade de material ferromagnético no núcleo de uma bobina, aumentar-se-á, também, sua indutância. Esse aumento de indutância é uma das estratégias para detecção de veículos. Para detecção de velocidade, são necessárias duas bobinas, como visto na planta simplificada na Figura 3.29. Há uma corrente no circuito formado de bobina e fonte de tensão e essa corrente é monitorada pelo sistema. Quando um veículo cruza uma das bobinas, há uma variação de corrente que pode ser lida diretamente, a partir de sensores de efeito *hall*, ou pela tensão nos terminais da bobina, a partir de sensores de tensão. O MCU (microcontrolador), ou DSP (processador digital de sinais), determina o tempo entre as duas variações que correspondem ao cruzamento do veículo pelas duas bobinas. Esse procedimento se realiza, geralmente, pelo disparo de um contador, quando o veículo cruza a primeira bobina, parando a contagem quando o veículo cruza a segunda bobina. De posse do tempo que o veículo levou de uma bobina à outra e da distância entre as bobinas, que é um parâmetro contido no programa, o MCU/DSP calcula a velocidade do veículo e mostra o valor dessa velocidade no display. O MCU/DSP ainda decide se é necessário fotografar. A fotografia é tirada se a velocidade do veículo estiver acima do limite permitido. Essa fotografia é utilizada para autuar e, em último caso, multar a pessoa que está registrada como proprietária do veículo. Em alguns países, esse sistema é utilizado sem a necessidade da multa. O equipamento possui somente a função de sinalização, permitindo, assim, que o condutor perceba se o veículo está na faixa de velocidade permitida, ou seja, nem abaixo da velocidade mínima, nem acima da velocidade máxima. É provado, nesses países, que somente o aviso já controla a velocidade dos veículos dentro dos limites permitidos, não sendo necessária a penalidade da multa.

Na Figura 3.30, representa-se um experimento de laboratório em que o corpo metálico é introduzido dentro de uma bobina que está alimentada por uma fonte de tensão alternada. A corrente é lida por uma garra de uma ponta de prova de corrente, que, por sua vez, é ligada a um osciloscópio digital. Na Figura 3.30, são mostrados os dois casos – sem e com o núcleo introduzido na bobina. É possível verificar, no osciloscópio, que, sem o núcleo de ferro magnético, a corrente possui uma intensidade maior do que no caso da bobina com núcleo de ferro. De fato, a indutância é proporcional à permeabilidade magnética do material de que é formado o núcleo. O ferro possui permeabilidade alguns milhares de vezes maior do que o ar. A bobina com núcleo de ferro oferece maior oposição à passagem de corrente elétrica alternada. Dito de outra forma, a bobina com núcleo de ferro possui uma reatância maior. Reatâncias de indutores serão estudadas com mais profundidade no capítulo referente a circuito em corrente alternada.

Figura 3.29 – Planta simplificada de um detector de velocidade

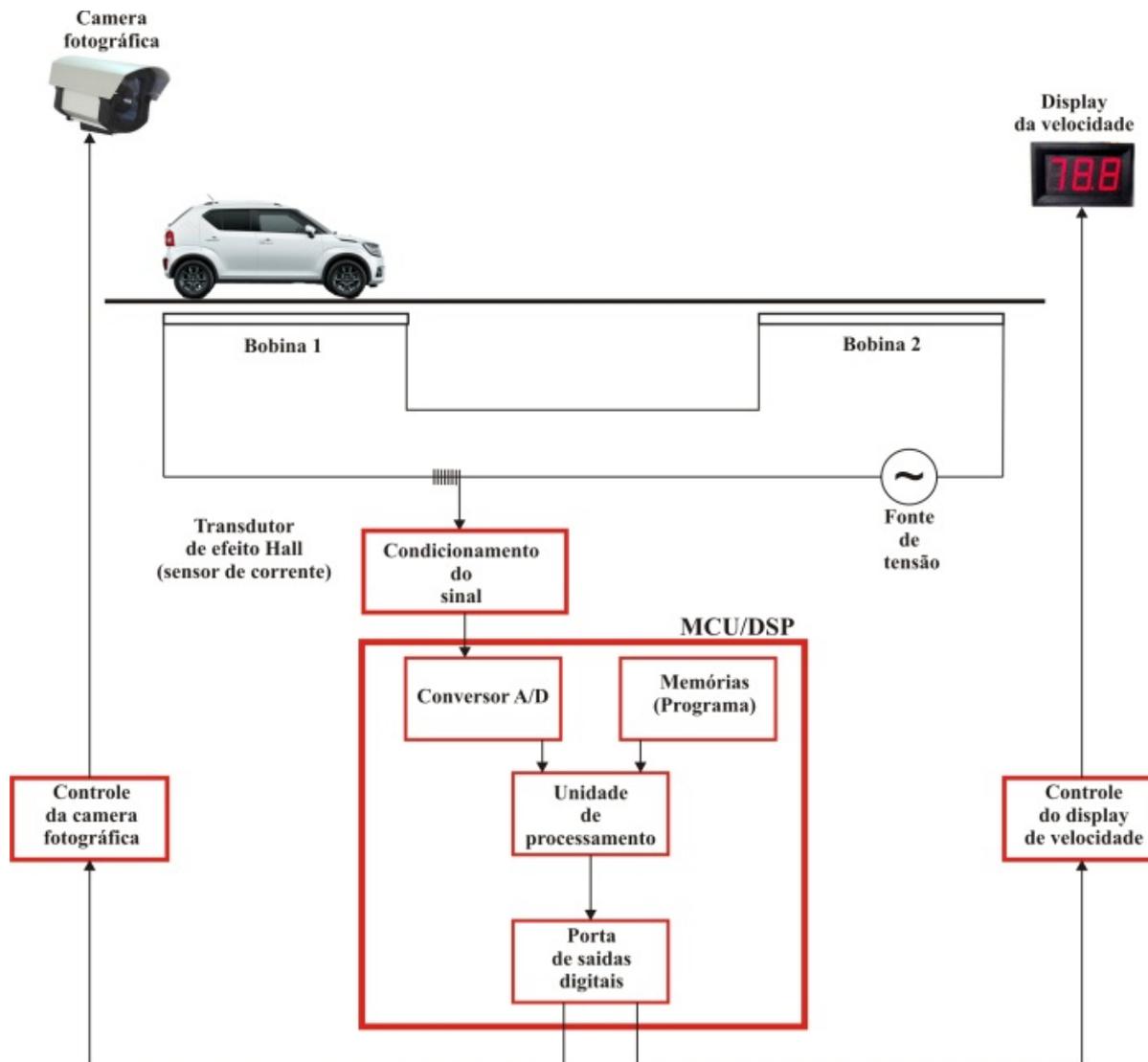
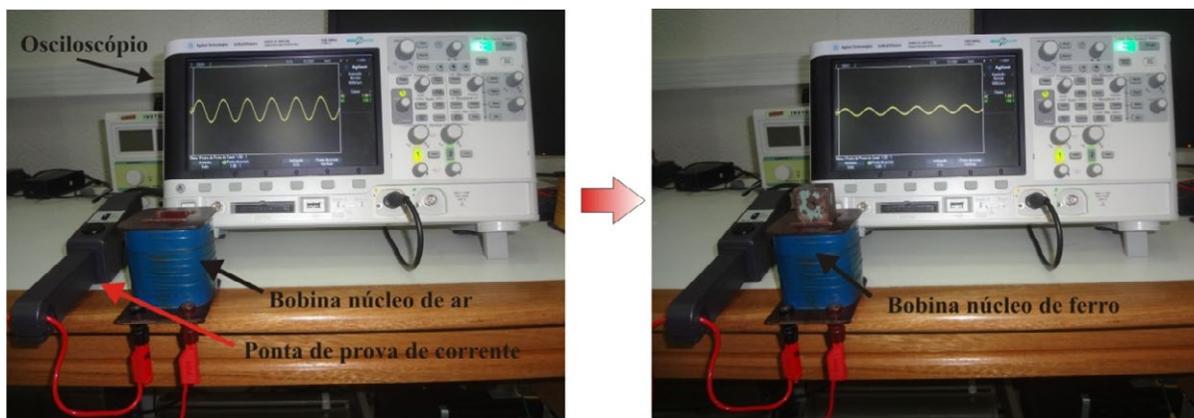


Figura 3.30 – Experimento para determinar variação de indutância com a variação do núcleo de uma bobina



Apesar de, no Brasil, esses sensores serem restritos praticamente às lombadas eletrônicas, popularmente chamadas de “pardais”, tais sensores podem ser utilizados, de forma muito mais versátil, para melhorar a fluidez do trânsito. São exemplos dessas possibilidades:

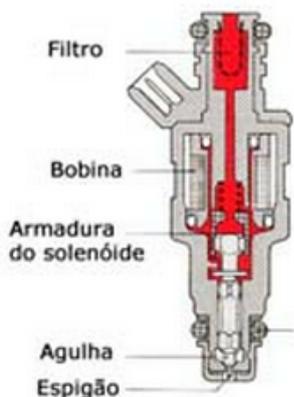
- Detecção de números de veículos, o que pode ser utilizado para detecção de pontos de congestionamento, permitindo uma atuação adaptativa em semáforos e sinalizadores;
- Detecção de veículos trafegando na contramão de uma via;
- Detecção de veículos trafegando acima ou abaixo do limite de velocidade da via;
- Abertura de cancelas.

Outra estratégia para detecção de presença de veículos é a utilização do magnetômetro. O magnetômetro é um medidor de fluxo magnético que pode ser unidimensional, bidimensional ou tridimensional. Esse componente pode detectar alterações no campo magnético de uma região, ocasionadas pela presença de um corpo metálico. Esse componente pode ser aplicado, por exemplo, para detectar submarinos, a partir de navios, assim como pode ser utilizado para detectar veículos numa rodovia. A bússola é um exemplo primitivo de magnetômetro. A miniaturização dos magnetômetros nos últimos anos, ver na Figura 3.31 um exemplo, permitiu que fossem incorporados aos celulares para utilização em aplicativos que transformam estes aparelhos em bússolas muito precisas.

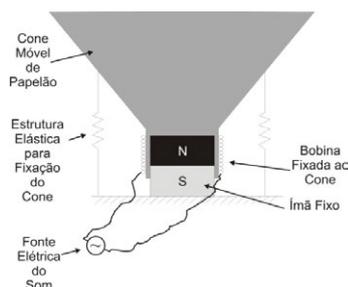
Figura 3.31 – Magnetômetro miniaturizado



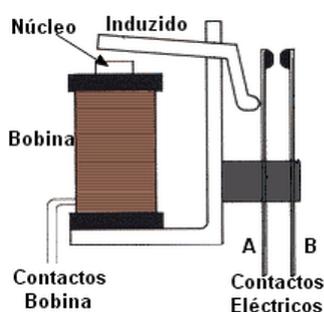
3.14.6 Outras Aplicações



A válvula injetora de combustível, nos carros a gasolina ou a álcool, utiliza um eletroímã que quando energizado puxa um êmbolo; este, por sua vez, injeta combustível na câmara de combustão. A bobina é energizada por um lado (positivo), geralmente pelo relé da bomba de combustível – o polo negativo vem da placa de comando do veículo (computador). Dessa forma, só é injetada a quantidade de combustível necessária, sem perdas.



O Alto-falante também aproveita a atração e repulsão dos ímãs. O sinal elétrico é aplicado na bobina móvel, fixada ao cone, que cria um campo magnético que irá interagir com o ímã fixo. Tal bobina é atraída ou repelida pelo ímã permanente (Fixo). Essa vibração é aplicada no cone de papel, transformando-se em ondas sonoras, já que, para criar som, deve haver vibração mecânica.

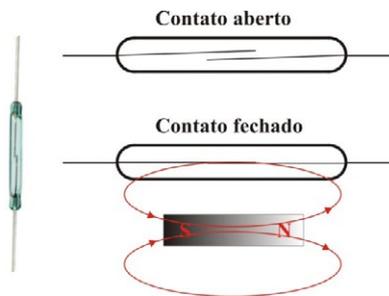


O relé eletromecânico funciona também a partir da força entre ímãs da ação e repulsão. A partir de uma corrente de baixo valor, que alimente a bobina do relé, é possível fechar ou abrir uma chave que liga ou desliga uma corrente alta. Por exemplo, com uma corrente de 1 A, proveniente de uma chave manual, é possível ligar um motor que necessita de corrente muito alta para seu funcionamento. Os relés estão presentes em circuitos de comando industrial, predial e automotivos.



Os Tubos de ferrite dos cabos

USB funcionam para filtrar os componentes de corrente de alta frequência, criando um campo magnético, dentro do núcleo de ferrite, contrário à variação da corrente. Isso é a aplicação direta da lei de Lenz. Esses componentes de alta frequência são as responsáveis pelas EMI – Interferências eletromagnéticas, que afetam o funcionamento de outros equipamentos. Os cabos funcionam como antenas. Observe que o tubo é localizado mais próximo à fonte que está gerando as EMI.



Reed Switch é uma chave com duas lâminas

de material ferromagnético, dentro de um recipiente de vidro hermeticamente fechado, com gás inerte no seu interior. Tais lâminas, que são normalmente espaçadas uma da outra, ao serem circuladas por linhas de campo magnético, se atraem, como dois ímãs. Na atração, os contatos se fecham, circulando corrente por seu corpo. A corrente máxima de um reed switch está por volta de 100 mA. São utilizadas em muitas aplicações como alarmes, chaves magnéticas, entre outros dispositivos.

Hans Christian Oersted (1777-1851)

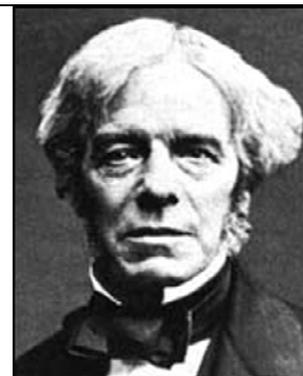
Físico-químico dinamarquês. Em 1820, observou que uma corrente que circula por um condutor era capaz de ocasionar deflexão de uma agulha imantada nas proximidades do condutor. Hoje se sabe que uma corrente que circula um condutor cria um campo magnético circular em relação a esse condutor, cujo módulo é inversamente proporcional à distância em relação ao próprio condutor.

A noção de que “**Eletricidade gera magnetismo**”, resultante de seus estudos e adotada pela literatura técnica, é fundamental para os motores elétricos, pois os campos magnéticos são gerados, na maioria das vezes, a partir de correntes elétricas.



Michael Faraday (1791-1867)

Físico-químico inglês, que deu diversas contribuições para a ciência. A mais importante foi a observação de que a variação de campo magnético cria força eletromotriz, ou seja, “**magnetismo gera eletricidade**”. Essa assertiva é fundamental para os geradores elétricos, pois, se conseguirmos, a partir de movimento, variar o campo magnético, origina-se tensão elétrica.

**André-Marie Ampère (1775-1836)**

Nascido na França. Foi físico, filósofo e matemático. Deixou uma grande contribuição no eletromagnetismo. A lei que leva seu nome traz em seu âmago a ideia de que “**magnetismo gera eletricidade**”. A lei de Ampère e a lei de Faraday são fundamentais para o projeto das máquinas rotativas, transformadores, relés eletromecânicos, máquinas de ressonância magnética e muitos outros aparatos eletromagnéticos.



PRÁTICAS NA SALA DE AULA

- Construa uma bússola com uma agulha, um copo de água, um ímã permanente e um pedaço de papel.
- Construa um eletroímã elementar.
- Construa um gerador elementar, utilizando uma bobina e um núcleo de ímã permanente. Procure aplicações para esses geradores elementares. Por exemplo, já há estudos de passarelas que aproveitam a vibração dos passos dos transeuntes para carregar baterias, que, conseqüentemente, iluminam a própria passarela.
- Num motor comercial aberto, identifique os eletroímãs do estator (que estão parados) e os do rotor (que giram).
- Discuta com seu professor como as válvulas solenoides poderiam reduzir o consumo de água nas torneiras dos banheiros da sua escola.
- Discuta com seu professor o funcionamento do alto-falante.
- Discuta com seu professor o funcionamento de campainha elétrica.
- Discuta com seu professor o funcionamento da tarja de segurança de produtos em lojas de departamento.
- Discuta com seu professor o funcionamento da ressonância magnética.

Exercícios propostos

3.1 Responda se as afirmativas são falsas ou verdadeiras.

- a) A magnetita é um exemplo de ímã permanente. ()
- b) ALNICO e NdFEB são magnetizado artificialmente. ()
- c) Nos ímãs, polaridades diferentes se atraem. ()
- d) Os ímãs são utilizados em muitas aplicações, como alto-falantes e microfones. ()
- e) Fluxo magnético está relacionado a quantidade de polos magnéticos. ()
- f) Ao partirmos um ímã separamos os polos magnéticos, norte de um lado e sul de outro. ()
- g) Densidade de fluxo magnético é medido em weber. ()
- h) Intensidade de campo magnético é medido em weber/m². ()
- i) Um condutor vertical circulado por corrente de baixo para cima possui as linhas de campo magnético orientadas no sentido horário. ()
- j) Uma bobina vertical possui correntes circulando no sentido anti-horário, logo o norte do campo magnético está para cima. ()
- l) O cientista Hans Christian Osrted descobriu o efeito magnético criado por uma corrente circulando por um condutor. ()
- m) As bobinas são empregadas em diversos produtos como relés, contadores, alto-falantes, motores elétricos. ()
- n) Uma barra de material magnético posto na extremidade de uma bobina energizada é expelida para fora desta bobina. ()
- o) Domínios magnéticos são pequenas regiões, dentro do material magnético, que possuem polaridade, como pequenos ímãs. ()
- p) Os motores elétricos são exemplos de aplicações das bobinas. ()
- q) Num eletroímã pode permanecer um pouco de magnetismo mesmo depois de desligada a corrente. Esse magnetismo é chamado de residual. ()
- r) As máquinas rotativas e transformadores funcionam na região de saturação da curva de magnetização. ()
- s) A curva de magnetização depende da corrente elétrica e não do material. ()
- t) Quanto menor a permeabilidade relativa do material mais fácil sua magnetização. ()
- u) A permeabilidade relativa da madeira é muito maior que a do aço laminado. ()

3.2 Assinale a alternativa correta:

Para a corrente circulando no condutor a seguir, as linhas de campo magnético são circulares e

- () no sentido horário.
- () no sentido anti-horário.

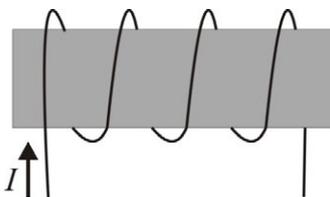


3.3 Assinale a alternativa correta:

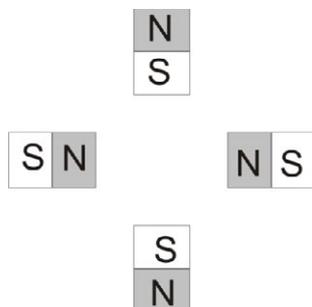
A bobina mostrada a seguir possui linhas de campo magnéticas voltadas para a

- () direita;
- () esquerda.

Esboce essas linhas de campo no seu caderno.



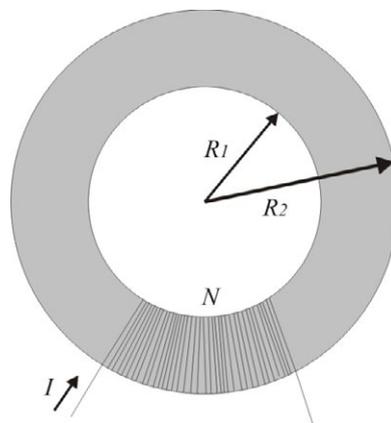
3.4 Esboce as linhas de campo magnético da estrutura formada por 4 ímãs permanentes iguais, como mostrado a seguir.



3.5 Esboce as linhas de campo magnético da estrutura formada por 3 ímãs permanentes iguais, como mostrado a seguir.

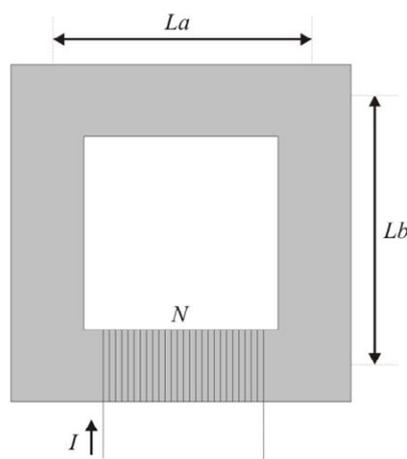


- 3.6 Pesquise sobre 3 produtos, no mínimo, que utilizam o magnetismo no seu princípio de funcionamento. Esboce e descreva esse princípio.
- 3.7 Pesquise o princípio de funcionamento da tarja magnética de segurança de produtos utilizada nas lojas de departamentos.
- 3.8 Pesquise o princípio de funcionamento da ressonância magnética.
- 3.9 Para a bobina com núcleo toroidal, mostrada a seguir, determine:
- Fluxo magnético no interior do núcleo;
 - Densidade de fluxo magnético no interior do núcleo;
 - Indutância da bobina.



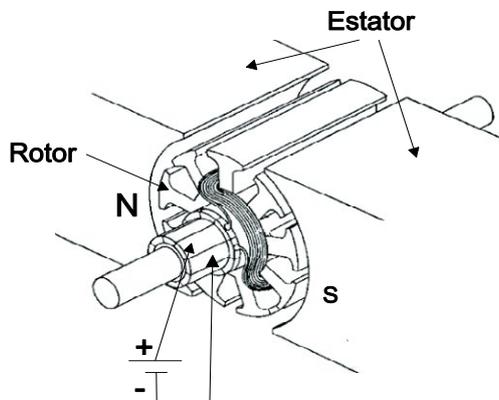
$$\begin{aligned}
 N &= 100 \text{ espiras} \\
 R_1 &= 5 \text{ cm} \\
 R_2 &= 10 \text{ cm} \\
 \mu_r &= 2000 \\
 \mu_0 &= 4 \pi 10^{-7} \\
 I &= 1 \text{ A}
 \end{aligned}$$

- 3.10 Para a bobina com núcleo retangular mostrada a seguir, determine aproximadamente:
- O fluxo magnético no interior do núcleo;
 - A densidade de fluxo magnético no interior do núcleo;
 - A indutância da bobina.



$$\begin{aligned}
 N &= 100 \text{ espiras} \\
 L_a &= 10 \text{ cm} \\
 L_b &= 10 \text{ cm} \\
 L_1 = L_2 &= 2,7 \text{ cm} \\
 \mu_r &= 2000 \\
 \mu_0 &= 4 \pi 10^{-7} \\
 I &= 1 \text{ A}
 \end{aligned}$$

3.11 O motor representado na figura abaixo possui o estator (parte estática) magnetizado. Com base nessa figura, assinale, entre as alternativas a seguir, a que responde corretamente à seguinte questão:



Se aplicarmos uma tensão CC nos terminais da bobina (nos pontos indicados pelas setas), o que acontece?

- O rotor será expelido para frente. ()
- O rotor será expelido para trás. ()
- O rotor girará no sentido horário. ()
- O rotor girará no sentido anti-horário. ()
- NRA. ()

3.12 Na Figura 3.32 encontram-se dois motores elementares, de 2 e 4 polos, vistos em corte. Admitindo a convenção desse livro como “ponto” corrente, entrando perpendicular ao papel e “xis” corrente, saindo perpendicular à folha de papel, determine:

- a) A polaridade de cada sapata polar.
- b) A força que está atuando nos condutores do rotor.
- c) Sentido de giro do rotor (horário ou anti-horário).

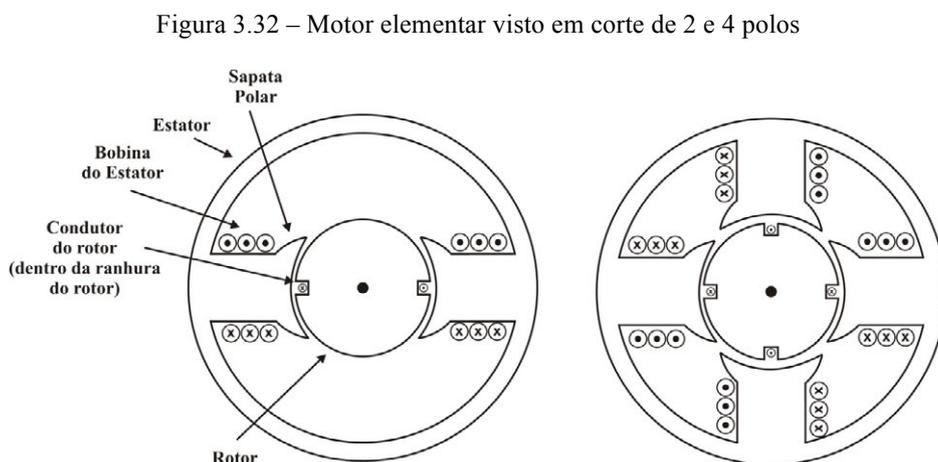
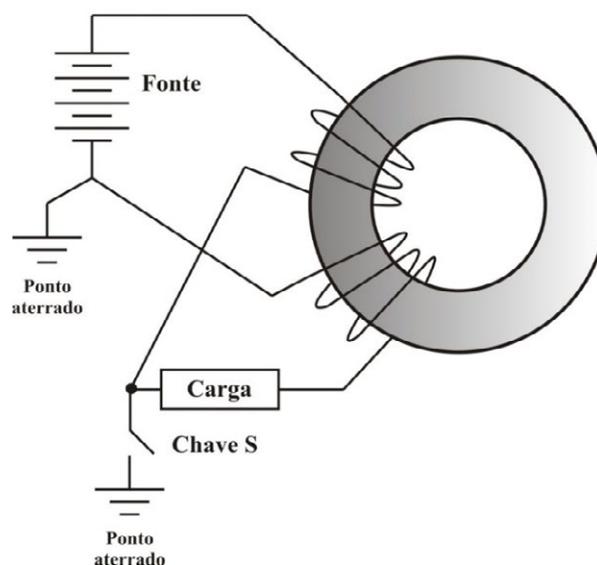


Figura 3.32 – Motor elementar visto em corte de 2 e 4 polos

3.13 O arranjo, mostrado na Figura 3.33, composto de um toroide ferromagnético e duas bobinas, é a base dos disjuntores DR. A corrente que sai do terminal positivo e negativo da fonte CC circula em sentido contrário nas bobinas. Admitindo-se que não haja dispersão de linhas de campo e que as duas bobinas possuem a mesma quantidade de espira, responda:

- Qual o fluxo magnético líquido dentro da estrutura ferromagnética se a chave S estiver aberta?
- Qual o sentido do fluxo magnético líquido dentro da estrutura ferromagnética se a chave S estiver fechada? Esse fluxo líquido poderia ser utilizado para desligar a fonte, evitando que esta permanecesse em curto circuito?

Figura 3.33 – Arranjo com toroide e duas bobinas



Pesquisa e discussão em grupo

Neodímio e Samário são elementos fundamentais na produção de ímãs com alta densidade de energia, que por sua vez são empregados em muitos produtos. Quais os países que detêm as maiores jazidas desses elementos?

Referências

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., Charles; UMANS, Stephen D. **Electric machinery**. Nova York: McGraw Hill, 2003.

INSTITUTE OF PHYSICS. How do speakers work? In: _____. **physics.org**. Disponível em: <<http://www.physics.org/article-questions.asp?id=54>>. Acesso em: mar. 2018.

KOSOW, Irving I. **Máquinas elétricas e transformadores**. São Paulo: Editora Globo, 1989.

LIPO, Thomas A. **Introduction to AC machine design**. Madison: Wisconsin Research Center, University of Wisconsin, 2004.

LUCAS, Jim. What is Faraday's law of induction? **Live Science**, 27 jan. 2016. Disponível em: <<https://www.livescience.com/53509-faradays-law-induction.html>>. Acesso em: jan. 2017.

NAVE, Carl R. Magnetic Fields of Currents. In: _____. **Hyperphysics**. Disponível em: <<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/magnetic/magcur.html>>. Acesso em: jan. 2018.

NOTAROS, Branislav M. **Eletromagnetismo**. São Paulo: Editora Pearson, 2012.

OMRON. **Inductive Sensors**. Disponível em: <<https://industrial.omron.eu/en/products/inductive-sensors>>. Acesso em: fev. 2018.

U. S. DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. Sensor Applications. In: _____. **Traffic Detector Handbook**. 3. ed. Volume 1. Disponível em: <<https://www.fhwa.dot.gov/publications/research/operations/its/06108/03.cfm>>. Acesso em: jan. 2018.

VARDALAS, John. History lesson: the magnetic compass. **The Institute: The IEEE news source**, 8 nov. 2013. Disponível em: <<http://theinstitute.ieee.org/tech-history/technology-history/a-history-of-the-magnetic-compass>>. Acesso em: dez. 2017.

4 Medidas Elétricas

As medidas elétricas são fundamentais para a atividade profissional do técnico. A partir dessas medidas, são tomadas decisões importantes na manutenção e execução de projetos elétricos. Por exemplo, medem-se as correntes das três fases de um sistema trifásico com a intenção de se verificar o nível de desequilíbrio entre essas fases. Outro exemplo é a medida da temperatura de contatos elétricos para verificação de pontos quentes, cuja detecção pode sugerir uma resistência de contato com temperatura acima do desejado. Enfim, muitos procedimentos da manutenção e execução precisam de conhecimento das medidas, sejam elétricas ou não, para fundamentar decisões. As medições podem apontar para falhas latentes, ou seja, falhas que ainda não se concretizaram. As medições mostram também o quanto o sistema está eficiente ou não; neste último caso, elas podem ajudar na indicação de mudanças necessárias para torná-lo eficiente. Por isto a importância de um processo de medição preciso.

Vimos, nos capítulos anteriores, as principais grandezas elétricas e magnéticas e seus respectivos processos de medição. Este capítulo se aprofunda nos fundamentos dos processos de medição dessas grandezas. Tópicos relacionados aos tipos de instrumentos de medição, erros, cuidados no processo de medição também serão abordados aqui. O conhecimento dos tópicos que envolvem este capítulo leva a uma medição mais eficaz e, conseqüentemente, a decisões mais acertadas.

4.1 Instrumentos de medição

Os instrumentos de medições são equipamentos utilizados para verificar o valor de uma grandeza. A partir deste valor, são tomadas decisões importantes como, por exemplo, melhorar a isolação de um motor elétrico, aumentar o diâmetro do condutor de alimentação de um ramal e outras. Tais instrumentos se classificam, genericamente, em analógicos e digitais. Os instrumentos digitais são baseados em sensores e circuitos eletrônicos. Os analógicos empregam forças eletromagnéticas para deflexão de ponteiros, os quais marcam os valores numa escala analógica. Um multímetro digital pode ser visto na Figura 4.1 (a), enquanto um voltímetro analógico é mostrado na Figura 4.1 (b).

Os instrumentos digitais apresentam uma facilidade indiscutível em seu manuseio, beneficiando os procedimentos de medição. Escolhida a escala adequada, o valor é apresentado na tela, sem o trabalho da adequação às escalas analógicas. Ainda assim, os medidores analógicos ainda são muito utilizados nos processos industriais, seja em painéis ou medidores portáteis. Os medidores analógicos possuem vantagens em relação aos medidores digitais: na quase totalidade das grandezas, não necessitam de baterias para sua alimentação e, na grande maioria dos casos, são mais robustos. Os medidores analógicos ainda são muito importantes para a prática dos técnicos. Várias grandezas podem ser lidas nos multímetros como: tensão (CA/CC), corrente (CA/CC), resistência, capacitância, indutância, temperatura, frequência elétrica, testes de diodos e transistores e muitas outras. Nenhum multímetro possui a capacidade de medição de todas as grandezas e todas as escalas. É importante que a compra de um multímetro seja orientada, de forma muito clara, para as grandezas e escalas que serão utilizadas no equipamento, nos procedimentos de medição.

Figura 4.1 – (a) Exemplo de multímetro digital; (b) Exemplo de multímetro analógico



(a)



(b)

As características de um medidor são muitas vezes identificadas por meio de símbolos, principalmente em instrumentos analógicos. O conhecimento desses símbolos é muito importante para uma medição de qualidade. A seguir, algumas das simbologias mais frequentes nos instrumentos de medição analógica.

	Instrumento que utiliza a deflexão por ferro móvel (bobina fixa).
	Instrumento que utiliza a deflexão por bobina móvel.
	Instrumento que utiliza a deflexão por bobinas cruzadas. Muito comum em wattímetros e cofasímetros.
	Instrumento para ser utilizado na vertical.
	Instrumento para ser utilizado na horizontal.
	Instrumento para ser utilizado inclinado. No caso a 60°.
	Instrumento para medição em corrente contínua.
	Instrumento para medição em corrente alternada.
	Instrumento para medição em corrente contínua e alternada.
	Tensão de isolamento ou tensão de prova do instrumento em kV. São encontrados também 2 kV e 3 kV. É a máxima tensão permitida a ser submetida a isolamento interna do instrumento. Na ausência de símbolos, a tensão de isolamento é de 500 V.
0,5 ou 1,0 ou 2,0	Aponta a classe de precisão do instrumento. Por exemplo, 0,5 implica que a medida encontrada pode ser até $\pm 0,5\%$.
	Instrumento de lâminas vibráteis ou ressonante. Encontrados em frequencímetros.

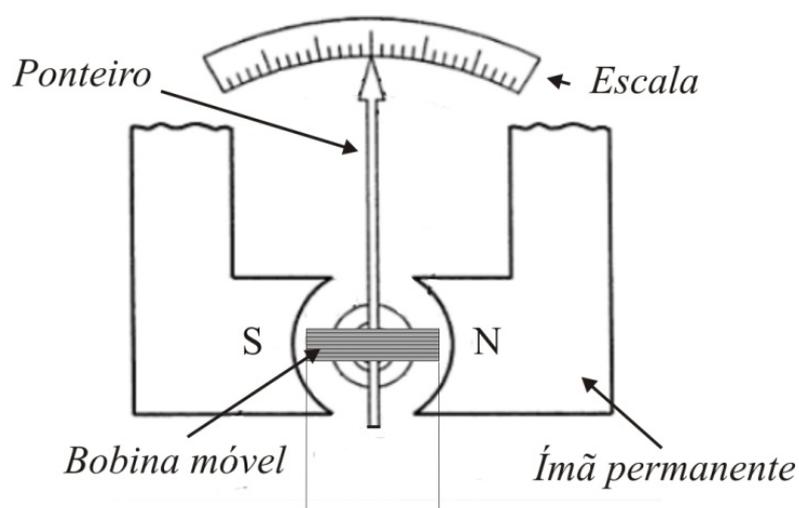
Tais simbologias são informações importantes para o operador do instrumento de medição. Por exemplo, uma tensão de isolamento de 1 kV pressupõe que este instrumento só pode ser utilizado em níveis de tensões abaixo de 1 kV. Assim, é importante que o operador do instrumento tenha essas informações para o planejamento seguro do processo de medição.

4.2 Princípios de funcionamento de instrumentos de medição analógica

4.2.1 Ímã permanente e bobina móvel

Esse tipo de instrumento utiliza um campo magnético fixo e uma bobina que se move dentro deste campo magnético, como representado na Figura 4.2. Quando uma corrente circula nessa bobina móvel, cria um campo magnético que tenta se alinhar com o campo magnético fixo. Esse instrumento mede corrente elétrica, pois é possível provar que o conjugado de rotação que age no sentido de girar a bobina é proporcional à corrente que circula na bobina. Uma das vantagens desse instrumento é a proporcionalidade da deflexão com a corrente, o que traz uma escala uniforme. Outra vantagem é o campo magnético constante, sem variações. Isso evita perdas por histerese e correntes parasitas no núcleo. Nesse instrumento, quando se muda a direção da corrente, muda-se o campo magnético da bobina móvel, invertendo-se, assim, o conjugado de rotação. Esse instrumento é indicado para medir correntes contínuas, oferecendo uma identificação rápida dos terminais positivo e negativo pela deflexão do ponteiro. A corrente alternada fará esse ponteiro experimentar conjugado de rotação que muda de sentido a cada 1/120 segundos, resultando num conjugado médio nulo. Em outras palavras, o ponteiro não sairia do lugar.

Figura 4.2 – Instrumento de bobina móvel



Para se entender o princípio de funcionamento do instrumento de ímã permanente e bobina móvel, é necessário saber o que é conjugado. Conjugado ou binário é um torque de duas forças de sentido contrário. Observe na Figura 4.2 que, quando o polo sul exerce uma força magnética para cima, o polo norte exerce a mesma força para baixo. Sobre a bobina só há componente de rotação. Como as duas forças são iguais e de sentido contrário, não há componente de força linear atuando na bobina. Esse princípio, que é uma manifestação da ação e repulsão dos ímãs, está presente em todas as máquinas rotativas.

Relação de deflexão em corrente contínua e em regime permanente

O conjugado de rotação na bobina é observado em (4.1).

$$T = 2rBlNi_m \quad (4.1)$$

Onde:

T – Conjugado causado pelas forças magnéticas, proporcional à corrente.

r – raio da bobina.

B – Densidade de fluxo no espaço onde a bobina está imersa.

l – Lado da bobina (perpendicular à figura).

N – Número de espiras.

i_m – Corrente que circula na bobina móvel.

k – constante de elasticidade da mola.

Em regime permanente, quando se alcança o equilíbrio, a contraposição ao conjugado é somente a força da mola, conforme se mostra em (4.2).

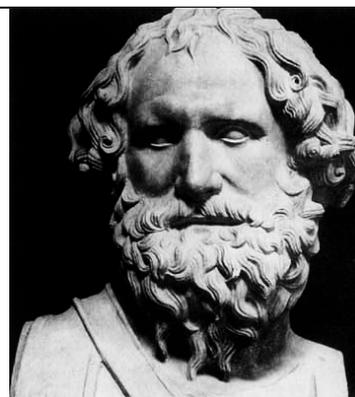
$$k\theta = 2rBlNi \quad (4.2)$$

$$\theta = k_c i \quad (4.3)$$

Como r, B, l, N e k são constantes e dependem dos aspectos construtivos do medidor, chega-se à expressão (4.3). Em outras palavras, a deflexão é proporcional à corrente e a escala é linear. Invertendo-se o sentido da corrente, a deflexão ocorrerá em sentido contrário.

Arquimedes de Siracusa (287 a.C. – 212 a.C.)

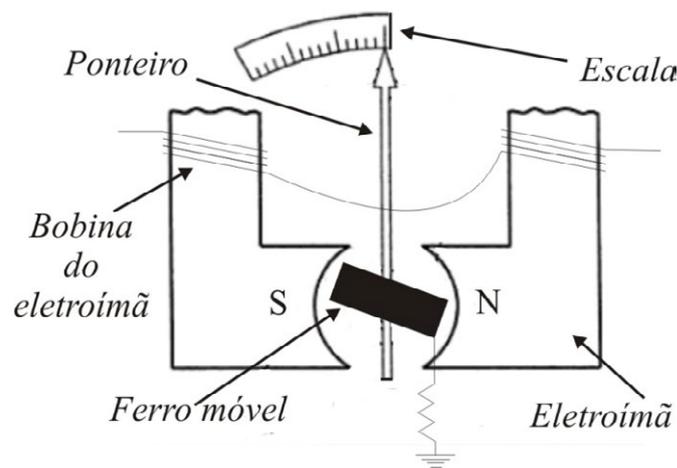
Matemático e inventor grego, responsável por muitas contribuições na matemática e muitas invenções bélicas e civis. Entre essas contribuições, estão os princípios do empuxo e da alavanca. A ele é atribuída a célebre frase “Dê-me um ponto de apoio que eu movo o mundo!”, que resume o princípio da alavanca ou torque.



4.2.2 Ferro móvel

O instrumento de ferro móvel, mostrado na Figura 4.3, utiliza um campo magnético criado pela corrente que se quer medir. Dentro deste campo, há uma barra de material ferromagnético que tende a se alinhar com o campo magnético, semelhante a uma simples atração de uma barra de ferro por um ímã. Nesse instrumento, invertendo-se a corrente da bobina do eletroímã, o conjugado de rotação não se inverte como o faz o instrumento de bobina móvel. Dessa forma, esse instrumento pode ser utilizado para medir tanto corrente contínua quanto corrente alternada.

Figura 4.3 – Instrumento de ferro móvel



Relação de deflexão em CC em regime permanente

O conjugado de rotação neste tipo de instrumento se dá pela variação de indutância. Podemos entender o circuito magnético formado pelo eletroímã e a barra de ferro móvel. As relações das forças ocorrem no sentido de aumentar a indutância do circuito magnético, ou seja, há uma tendência de a barra se tornar horizontal (ver Figura 4.3), ponto em que ocorre a maior indutância e, conseqüentemente, a menor relutância do circuito magnético.

Admitindo-se que só exista a força da mola em contraposição ao conjugado magnético de rotação, teremos a expressão para deflexão (4.4). Observa-se que a deflexão é função do quadrado da corrente medida, o que mostra que, para corrente contínua, a escala não é linear. Outro fator importante é que a deflexão média é proporcional à média do quadrado da corrente. A média do quadrado da corrente é conhecida como valor eficaz, que será abordado no capítulo relativo à corrente alternada. Este instrumento mede valor eficaz da corrente.

$$\theta \cong \frac{i_f^2 \Delta L}{2k \Delta \theta} \quad (4.4)$$

Onde:

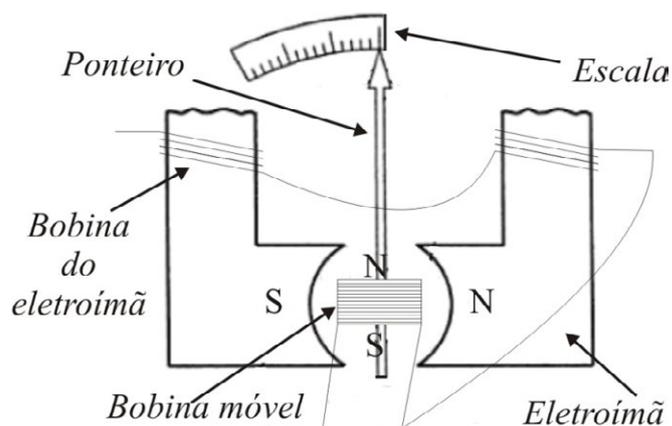
k – constante de elasticidade da mola.

i_f – Corrente da bobina do eletroímã.

4.2.3 Eletrodinâmicos

O instrumento eletrodinâmico, mostrado na Figura 4.4, é uma junção das duas abordagens anteriores. Existe uma bobina móvel, e o campo em que está inserida tal bobina é criado por um eletroímã com sua bobina independente, sendo, na realidade, um instrumento de duas bobinas. Observe, na Figura 4.4, que o conjugado de rotação do ponteiro se dá a partir da ação das forças magnéticas: o polo sul do eletroímã atrai o polo norte da bobina móvel e o polo norte do eletroímã atrai o polo sul da bobina móvel. O conjugado é no sentido de alinhar os dois campos. Mesmo que a corrente mude de sentido, o conjugado de rotação continuará imutável, pois haverá a mudança de todos os polos, tanto os do eletroímã quanto os da bobina móvel. Sendo assim, esse tipo de instrumento é utilizado para medição tanto de corrente contínua quanto de corrente alternada. O conjugado de rotação nesse tipo de abordagem é proporcional ao quadrado da corrente, se as duas bobinas estiverem em série. Para medição em corrente alternada, o conjugado de rotação é proporcional à média do quadrado da corrente, em outras palavras, proporcional ao valor eficaz da corrente.

Figura 4.4 – Instrumento Eletrodinâmico



Uma grande aplicação da abordagem do instrumento eletrodinâmico é a medição de potência – os wattímetros. A bobina móvel é constituída de muitas espiras de condutor de baixa seção transversal (condutor fino). Essa bobina é ligada em paralelo, a fim de medir a tensão da carga. Muitas espiras de condutor fino garantem alta impedância. A bobina fixa é destinada à leitura da corrente da carga. Essa bobina é ligada em série, com a carga, sendo necessária baixa impedância, ou seja, a bobina fixa é constituída de poucas espiras de condutor de alta seção transversal (condutor grosso).

Relação de deflexão em CC em regime permanente

O conjugado de rotação é função do produto das correntes da bobina fixa e da bobina móvel. Além do mais, o conjugado sempre age no sentido de aumentar a indutância mútua entre as duas bobinas. A máxima indutância mútua acontece quando os dois campos estão alinhados. Admitindo que só exista a força da mola em contraposição ao conjugado de rotação, teremos a expressão para deflexão (4.5). Se as bobinas estiverem em série, conforme

se apresenta na Figura 4.4, submetida à mesma corrente, a deflexão é função do quadrado da corrente a ser medida.

$$\theta \cong \frac{i_f i_m \Delta M}{2k \Delta \theta} \quad (4.5)$$

Caso as correntes sejam alternadas, a média da deflexão ainda obedece à expressão (4.5), sendo proporcional ao valor eficaz da corrente.

Os três instrumentos estudados medem corrente elétrica. Com algumas adaptações podem, entretanto, também medir tensão elétrica. Os amperímetros e voltímetros analógicos se baseiam numa dessas abordagens.

4.2.4 Lâminas vibráteis

Essa abordagem aproveita a ressonância para medir a frequência elétrica. O elemento principal é um conjunto de lâminas, cada uma com uma frequência de ressonância diferente. Este conjunto de lâminas, em contato com uma estrutura ferromagnética excitada por uma bobina, faz com que a lâmina, cuja frequência de ressonância é igual à frequência da tensão que se quer medir, vibre. Esse processo é semelhante ao das cordas de um violão que possuem frequências de ressonância diferentes. O conjunto de lâminas é associado a uma escala de frequência que permite a leitura, de forma simples, com auxílio de um instrumento muito comum em painéis industriais: o frequencímetro de Frahm (mostrado na Figura 4.5).

Figura 4.5 – Frequencímetro de Frahm



Uma Experiência com a ressonância

Num violão, cada corda possui uma espessura e uma tração, para vibrar numa determinada frequência. A afinação padrão dos violões é mostrada na Figura 4.6. Algumas páginas na internet possuem o recurso de gerar um sinal audível na frequência especificada. Acesse um dessas páginas e gere a frequência de uma das seis cordas. Ponha um violão

afinado com sua abertura na saída do alto-falante. A corda da respectiva afinação na frequência do som gerado irá vibrar, mostrando que essa corda está ganhando energia com a vibração do som. Este é o mesmo princípio do instrumento de medição de lâminas vibráteis. Diz-se, neste caso, que a corda entrou em ressonância na frequência especificada.

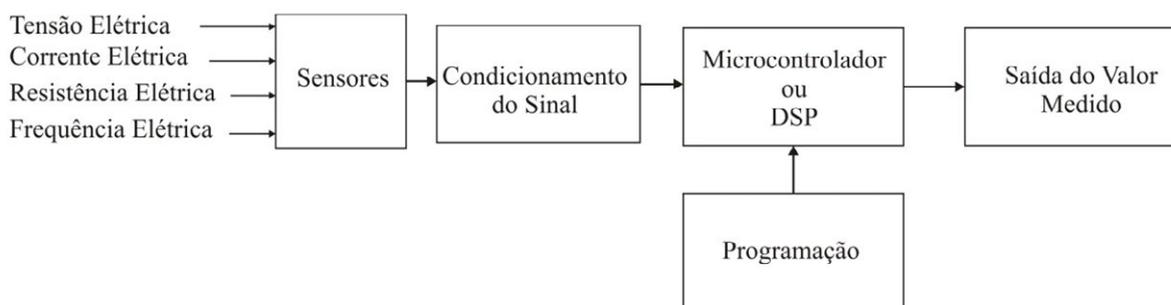
Figura 4.6 – Afinação padrão das cordas de um violão

—	(E-Mi) 82,41Hz
—	(A-Lá) 110,00Hz
—	(D-Ré) 146,83Hz
—	(G-Sol) 196,00Hz
—	(B-Si) 246,94Hz
—	(E-Mi) 329,63Hz

4.2.5 Instrumento de medição digital

Os instrumentos digitais funcionam baseados em circuitos eletrônicos digitais. Esses circuitos funcionam com MCUs (Microcontroladores) ou DSPs (Processadores Digitais de Sinais), os quais possuem entradas de informações, um módulo de processamento e saídas. Tanto os MCUs quanto os DSPs são computadores dedicados a uma determinada aplicação. Tais componentes requerem uma programação, que é uma sequência de instruções elaboradas por uma pessoa habilitada. As instruções da programação envolvem decisões lógicas e cálculos a serem realizados com as entradas, a fim de se chegar a um valor medido. Tal valor será exposto para o operador do instrumento através de um display de LCD. Na Figura 4.7 é mostrado um esquema básico de um instrumento digital.

Figura 4.7 – Esquema básico de instrumento digital



Para facilitar a compreensão da Figura 4.7, apresentamos a descrição de seus componentes:

Sensores

São componentes destinados à leitura de grandezas físicas como tensão, corrente, temperatura e muitas outras. Na Figura 4.8 (a) é mostrado um sensor de corrente por efeito hall de ± 50 A muito utilizado em medição de corrente, tanto contínua quanto alternada.

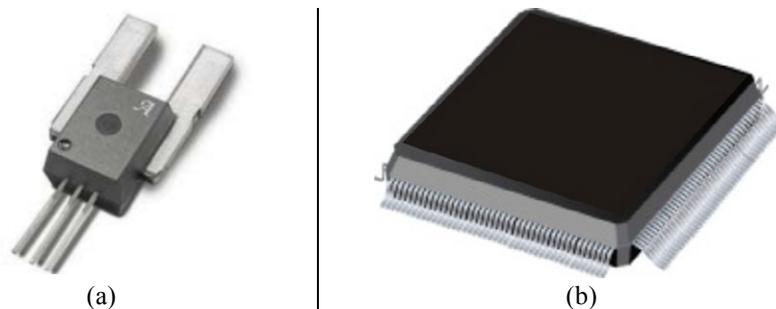
Condicionador de sinal

é um circuito eletrônico que prepara o sinal para ser lido e operado pelo MCU/DSP. Se os sinais provenientes dos sensores estiverem fora da faixa de leitura do MCU/DSP e possuírem ruídos, tornam a leitura sem precisão.

Microcontrolador e DSP

São dois componentes (*chips*) que possuem as características de um computador. Esses componentes efetuam leitura, executam o programa e oferecem uma saída. A diferença entre um MCU e um DSP é que esse último possui muito mais recursos oferecidos pelos fabricantes e é dedicado para uma determinada aplicação, por exemplo medição, processamento de vídeo, processamento de som, eletrônica de potência e outras. Na Figura 4.8 (b) é mostrado um DSP.

Figura 4.8 – (a) Sensor de corrente; (b) PDS – Processador digital de sinais

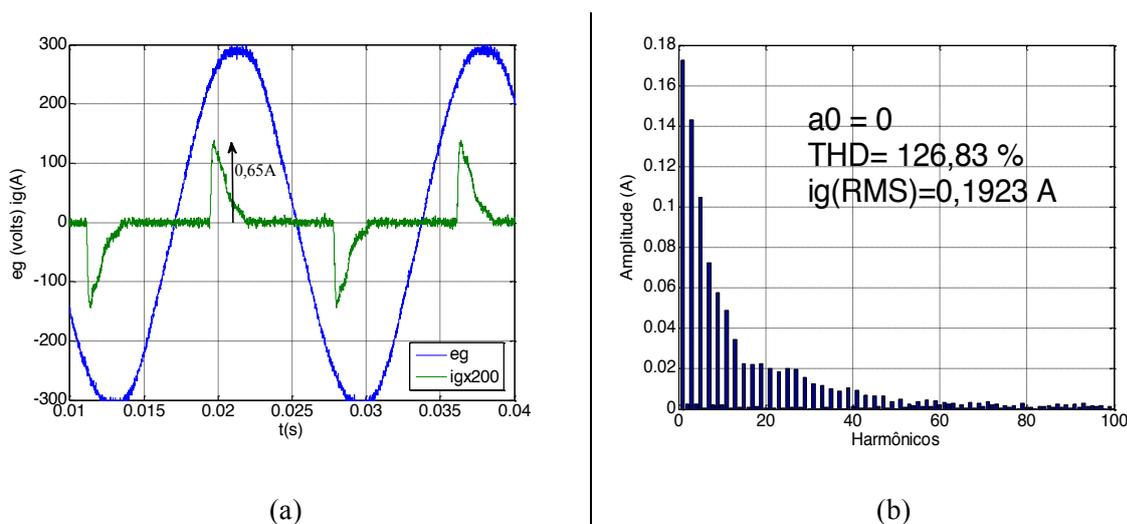


4.2.6 Instrumentos TRUE RMS

O nosso sistema elétrico é gerado, transmitido e distribuído em corrente alternada com frequência de 60 Hz, como já foi mencionado. É comum dizer que o componente de frequência fundamental do nosso sistema é de 60 Hz. Existem cargas que injetam componentes de frequência diferentes da fundamental. Os casos mais notórios são os reatores e transformadores. Essas cargas injetam componentes harmônicos de correntes diferentes de 60Hz. Um instrumento TRUE RMS é aquele que leva em consideração um conjunto de harmônicos na leitura, resultando num valor mais preciso. Utilizar um instrumento que não é TRUE RMS para medir grandezas elétricas com harmônicos pode levar a resultados e a decisões errados.

Na Figura 4.9 (a) apresenta-se a corrente de uma lâmpada eletrônica, compacta, de 20 W. Os componentes dos harmônicos ímpares 3°, 5°, 7°... são muito altos. Utilizar um amperímetro que não é TRUE RMS para medir essa corrente trará resultados que irão diferir muito do valor eficaz real da corrente. Observe os harmônicos, até o 51° harmônico, dessa corrente na Figura 4.9 (b). É importante observar que o instrumento TRUE RMS é uma categoria de instrumentos digitais.

Figura 4.9 – (a) Corrente numa lâmpada fluorescente compacta eletrônica de 20 W;
(b) Espectro de frequência da corrente



4.3 Erros na medição

Como já foi mencionado, as medições das grandezas são utilizadas como apoio ao processo de tomada de decisão. Tais decisões fazem parte da vida profissional do técnico, dentro dos processos de produção, seja de bens seja de serviços. Decisões acertadas podem evitar prejuízos financeiros e até mesmo evitar acidentes, muitas vezes fatais. Por exemplo, uma simples tomada de decisão quanto à manutenção de um motor elétrico de um processo produtivo pode acarretar a parada do processo, gerando um custo para isto. Essa manutenção, entretanto, pode evitar um prejuízo muito maior, não só financeiro como humano.

Percebe-se um fato importante dentro da ciência da manutenção: **tomar decisão gera custo, mas não tomar, também pode gerar custo, e muitas vezes maior que o custo da tomada da decisão.** Então surge a pergunta: Até onde confiar na medida efetuada? Uma medida só tem valor para tomada de decisão, se o erro não compromete a citada medida. É muito difícil uma tomada de decisão acertada, se o erro é grande. Por exemplo, a partir de uma medida de tensão de uma bateria de carro de 10 V com um erro de 20%, não é possível decidir se a bateria está descarregada ou não, pois a tensão real da bateria pode assumir qualquer valor entre 8 V e 12 V. Em outras palavras, esta medição não tem muito valor para tomada de decisão. Obviamente que este exemplo é puramente didático, pois é pouco provável que exista um erro de 20% numa medição elétrica. O erro é, entretanto, um fator intrínseco ao processo de medição. Erro é a distância entre o valor medido e o valor esperado.

Não existe medição perfeita, sem erro. Ter uma estimativa desse erro é, no entanto, fundamental para o operador e para quem vai decidir sobre algo.

O erro na medição pode provir de dois fatores, pelo menos: do instrumento de medição e do método. No manual do instrumento de medição, é descrita sua precisão para várias grandezas, se o medidor for destinado à medição de várias delas. Esse tipo de erro é uma característica do medidor, do seu projeto e de sua fabricação. O operador que realiza a medição não tem controle sobre o instrumento. Já os erros provenientes do método, são aqueles relacionados com a maneira com que o operador realiza a medida. Os fatores metodológicos mais significativos são:

Utilizar o medidor para medir grandezas de características diferentes

- Se a grandeza é CA e se mede com o medidor em CC;
- Se a grandeza é CC e se mede com o medidor em CA;
- Se a grandeza possui harmônicos e se mede com medidor não TRUE RMS.

Esses equívocos geram erros muito grosseiros na medição. Isso pode ser visto, por exemplo, quando da medição da corrente de um grupo de capacitores, empregados para corrigir fator de potência, num ambiente com muitas fontes não lineares, utilizando para isto um medidor que não é TRUE RMS.

Utilizar a escala não apropriada para a grandeza a ser medida

Antes de toda medição, o operador responsável deve planejar o procedimento a ser seguido e conhecer o nível esperado da grandeza. Não é o valor, e sim a faixa esperada da grandeza. Por exemplo, se o sistema elétrico é 380 V (tensão de linha), deve-se esperar uma tensão de fase por volta de 220 V.

Obs.: Deve-se escolher uma escala com um fundo o menor possível, mas que não seja menor que a faixa esperada.

Vamos exercitar: Utilizando-se, por exemplo, um medidor com as escalas de medição descritas, qual a escala mais apropriada para medir na faixa de 220 V?

- a) 0 a 100 V
- b) 0 a 300 V
- c) 0 a 600 V

A escala de 0 a 100 V está descartada, pois tem seu fundo menor que a faixa de medição. A escala menor das duas que sobraram é 0 a 300 V.

Suponha que o medidor do exemplo tenha um erro relativo de 1%. Este erro, na faixa de 0 a 600 V, equivale a 6 V no máximo; na escala de 0 a 300 V, equivale a 3 V no máximo; e para a escala de 0 a 100, equivale a 1 V no máximo. Por isso se escolhe a escala com menor fundo possível.

Posicionamento físico do medidor

Existem medidores destinados à medição na posição horizontal, vertical ou com determinada inclinação. Não respeitar esses posicionamentos causa erros muito primários às medidas. O próprio medidor traz esta informação quanto à sua correta posição física. Esse fator de geração de erros no processo de medição é inerente aos medidores analógicos.

Paralaxe

Paralaxe é um erro proveniente da posição do observador. Vistos de duas posições diferentes, a posição do ponteiro nas escalas analógicas apresenta diferenças que produzem erros na medição. Obviamente que esse fator de geração de erros no processo de medição é também inerente aos medidores analógicos.

4.4 Erros relativo e absoluto

Como já foi mencionado, erro é a distância entre a medição e o valor esperado. Este erro pode ser abordado de forma absoluta ou de forma relativa. O erro absoluto, cuja expressão é mostrada em (4.6), é a distância, no valor da grandeza, entre o valor medido m_x e o valor esperado \bar{m} . O erro absoluto é muito importante para comparação entre várias medidas com o mesmo valor esperado. Quando, no entanto, há comparação entre dois procedimentos de medidas com valores esperados diferentes, o erro relativo é mais significativo na comparação entre as medidas. A expressão matemática do erro relativo é mostrada em (4.7). É muito comum expressar-se o erro relativo em percentual, ou seja, a expressão (4.7) multiplicada por 100.

$$\text{Erro Absoluto} = \text{Abs}(m_x - \bar{m}) \quad (4.6)$$

$$\text{Erro Relativo} = \text{Abs}\left(\frac{m_x - \bar{m}}{\bar{m}}\right) \quad (4.7)$$

Exemplo 4.1

Duas medições são realizadas para medir o valor de um resistor de 100 Ω . As duas medições são: $m_1 = 99,7 \Omega$; $m_2 = 100,4 \Omega$. Qual o maior erro absoluto m_1 ou m_2 ?

Solução:

A medição m_2 produziu erro absoluto maior de 0,4, enquanto a medição m_1 produziu 0,3.

Exemplo 4.2

Duas medições são realizadas para medir dois resistores de $100\ \Omega$ e $200\ \Omega$. As duas medições são: $m_{100} = 99,7\ \Omega$; $m_{200} = 199,7\ \Omega$. Qual o maior erro relativo m_{100} ou m_{200} ?

Solução:

Apesar de as duas medições terem produzidos erros absolutos iguais, a medição m_{100} produziu erro relativo duas vezes maior de 0,003 (0,3%), enquanto a medição m_{200} produziu 0,0015 (0,15%). Percebe-se que o erro relativo é influenciado pelo valor esperado e não apenas pela distância entre o valor esperado e a medição. Neste caso, a medida m_{200} é mais precisa que a m_{100} . O conceito de precisão será discutido ainda neste capítulo.

4.5 Médias como medida de tendência

O processo de medição de uma grandeza é, na sua essência, incerto – incerteza que tem origem no próprio procedimento e no instrumento de medição, como já foi mencionado. A Estatística é a ciência que lida com incertezas e é utilizada na medição com o intuito de as quantificar. Um dos métodos mais utilizados em estatística é a inferência.

“A inferência visa determinar parâmetros da população a partir de uma amostra daquela população, sem a necessidade de levantar todas as informações da referida população”.

A inferência estatística visa reduzir custos e tempo, não precisando assim obter informações de toda população.

Amostra: é um número de elementos extraídos de uma população de forma aleatória. Essa amostra deve retratar a população para que o processo de inferência seja eficiente. Quanto maior a população, mais próxima esta amostra está da população. Cabe dizer, no entanto, que, quanto maior a amostra, maior sua fidelidade em relação à população. No entanto, quanto maior a amostra, maior o custo de levantamento das suas características.

População: Total de elementos sobre os quais se quer obter informações.

Exemplo 4.3

População: Todos os resistores com valor de $1\ \text{k}\Omega$ da marca A.

Amostra: 30 medidores da marca A.

É possível, a partir de medições na amostra, inferir informações do fabricante.

A média é uma medida de tendência de uma amostra ou de uma população. A média pode ser determinada pela expressão (4.8). A média da amostra é uma inferência muito significativa da média da população. Isso implica que a média da amostra pode ser utilizada como a média da população, errando-se, na maioria das vezes, muito pouco. Quanto maior a

amostra, menor será esse erro. Existem procedimentos estatísticos que descrevem o tamanho da amostra para uma determinada população, para determinado erro. Tais procedimentos fogem ao escopo deste livro.

$$\bar{m} = \frac{m_1 + m_2 + m_3 + \dots + m_N}{N} \quad (4.8)$$

Onde

m_j – é a medição j ;

N – número de elementos da amostra.

Exemplo 4.4

Foram realizadas 10 medições de uma determinada indutância de precisão, sob determinadas circunstâncias. Determine a média dessas medições.

Medições	Valores (mH)
m1	22,120
m2	22,140
m3	22,150
m4	22,130
m5	22,150
m6	22,150
m7	22,120
m8	22,110
m9	22,150
m10	22,140
Média	22,136

Solução:

Observa-se que a média das medidas possui informações de todas as medições individuais. Esse valor médio é mais preciso para o valor da indutância, pois está baseado em 10 medições.

4.6 Medidas de dispersão

A média nem sempre é uma medida suficiente. A maneira como as medidas estão dispersas em torno da média é fundamental para tomada de decisão. Por exemplo, temos a seguir dois grupos de 3 medidas de uma mesma grandeza, sob condições iguais, com a mesma média: Amostra 1 = [10, 11, 9], Amostra 2 = [10, 13, 7]. Embora a média das amostras seja igual a 10, a Amostra 2 é mais dispersa em torno da média. A Amostra 2 possui erros, tanto

relativos quanto absolutos, maiores que a Amostra 1. A dispersão diferente aponta para uma diferença dos processos de medições ou e diferenças dos instrumentos de medição.

Uma das medições mais importantes da dispersão de dados é o desvio padrão. O desvio padrão da amostra é determinado pela expressão (4.9). O desvio padrão mostra quanto as medições estão longe da média. A expressão (4.9) é uma estimativa significativa do desvio padrão da população. Um baixo desvio padrão implica que as medições estão mais próximas da média.

$$s = \sqrt{\frac{(m_1 - \bar{m})^2 + (m_2 - \bar{m})^2 + \dots + (m_N - \bar{m})^2}{N - 1}} \quad (4.9)$$

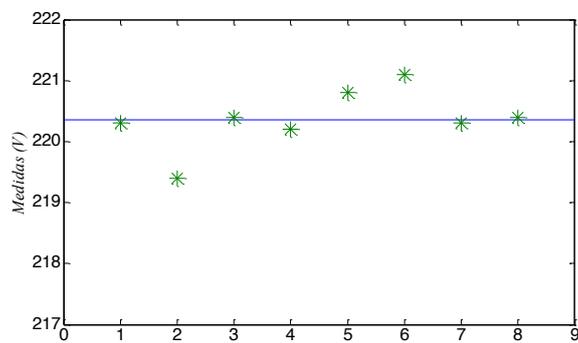
Exemplo 4.5

Duas amostras da tensão de uma concessionária foram extraídas em dois horários diferentes, com periodicidade de 1 minuto, utilizando o mesmo instrumento e o mesmo procedimento de medida.

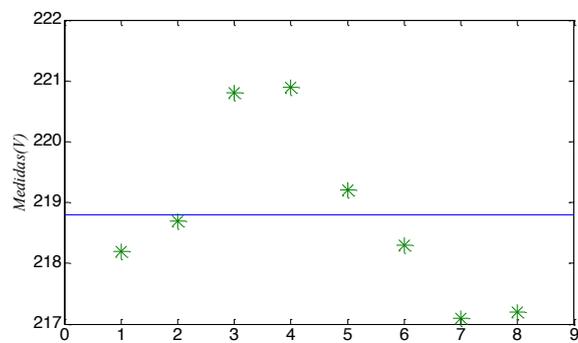
	Horário: 8:00 h	Horário: 17:00 h
m1	220,3	218,2
m2	219,4	218,7
m3	220,4	220,8
m4	220,2	220,9
m5	220,8	219,2
m6	221,1	218,3
m7	220,3	217,1
m8	220,4	217,2
Médias - \bar{m}	220,3625	218,8000
Desvio padrão - s	0,4926	1,4461

Pode-se concluir que, no horário das 17 horas, a tensão média da concessionária é menor. Também se conclui que a variação da tensão é maior que no horário de 8 horas. A Figura 4.10 mostra as medições nos gráficos. Os gráficos são muito úteis para verificar a média e a variabilidade em torno da média. Percebe-se claramente que as medidas no horário de 17 horas se afastam mais da média que a tensão no horário de 8 horas.

Figura 4.10 – Gráficos das medições das tensões das concessionárias em (a) 8h00; (b) 17h00



(a)



(b)

4.7 Precisão versus exatidão

As definições de precisão e exatidão são importantes para todos os processos de medição porque descrevem a qualidade das medidas.

Precisão: A precisão está ligada à dispersão das medidas em torno do valor esperado da grandeza medida. Quanto menor a dispersão em torno do valor esperado, mais precisa é a medição. A precisão está relacionada à variabilidade do processo de medição, em outras palavras, à variabilidade das pessoas e métodos.

Exatidão: A exatidão, por sua vez, está relacionada à proximidade da média das medições do valor esperado dessas medições. Quanto mais próximo à média das medições do valor esperado para a medida, maior a exatidão. A exatidão está, muitas vezes, associada à aferição do instrumento. Por exemplo, o método e o instrumento podem ser precisos, no entanto, o instrumento pode influenciar na exatidão.

É importante notar que a precisão não está relacionada ao valor esperado, mas somente à variabilidade, a dispersão em torno do valor esperado, enquanto que, no caso da exatidão, é levada em consideração a distância da média em relação ao valor esperado da medição.

Uma analogia muito útil para se entender os conceitos de precisão e exatidão é a dos resultados dos quatro arqueiros num alvo fixo, mostrada na Figura 4.11. É interessante notar o arqueiro 3 possui precisão, mas não exatidão. Essa falta de exatidão pode ter sido originada no arco ou na flecha, podendo ser corrigida, conseqüentemente, com ajustes. Conforme se vê no resultado do arqueiro 2, este possui exatidão em torno do alvo, mas não tem precisão. Seu resultado é influenciado por fatores aleatórios, como o vento, por exemplo.

Figura 4.11 – Analogia dos quatro arqueiros para descrever precisão e exatidão



PRÁTICAS NA SALA DE AULA

- De posse de um medidor analógico, descreva e anote todas as características para um processo de medição eficiente.
- Para um medidor digital, anote a precisão de cada grandeza a ser medida pelo instrumento.
- Compare o erro de duas medições de tensão com um medidor digital e um analógico.
- Realize dez medições de tensão na rede de baixa tensão da concessionária com periodicidade de 30 segundos. Com ajuda de uma planilha eletrônica, em um computador, trace o gráfico e determine sua média.
- Dois países, A e B, possuem três moradores cada um. Os salários dos moradores do país A são [5000, 6500, 4500], e o salário dos moradores do país B é [13000, 2000, 0]. Qual a média salarial dos dois países? Qual deles possui uma melhor distribuição de renda?
- Realize uma medição de corrente em um circuito com resistências elétricas. Compare 5 medidas realizadas por diferentes grupos de alunos. Qual a média das medidas? Qual a medida mais longe da média?

REFERÊNCIAS

BUSSAB, Wilton O.; MORETTIN, Pedro A. **Estatística Básica**. 8. ed. São Paulo: Editora Saraiva, 2013.

CABRAL, Paulo. **Erros e incertezas na Medição**. Matosinhos: IEP – Instituto Eletrotécnico Português; Porto: ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2004.

MEDEIROS FILHO, Solon. **Fundamentos de medidas elétricas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1995.

ROLDAN, José. **Manual de medidas elétricas**. 5. ed. São Paulo: Editora Hemus, 2007.

THE Physics Classroom. Fundamental Frequency and Harmonics. In: _____. **Physics Tutorial**. Disponível em: <<http://www.physicsclassroom.com/class/sound/Lesson-4/Fundamental-Frequency-and-Harmonics>>. Acesso em: maio 2017.

5 Circuitos elétricos de corrente contínua

Ao observar os elementos de circuito discutidos até agora neste livro, o leitor certamente deve ter se perguntado, em algum momento da leitura, qual seria a fundamentação teórica aplicada em situações nas quais esses elementos são combinados. Essa fundamentação teórica tem em vista a necessidade de entender e determinar os diferentes níveis de tensão e corrente ao longo de um circuito de modo que este circuito execute a função para a qual foi projetado. Diante desta realidade, este capítulo apresentará ferramentas de análise de circuitos em corrente contínua que são essenciais para o desenvolvimento de aplicações do cotidiano. Serão exploradas as leis de Ohm e as de Kirchhoff e suas derivações. Ademais, dois teoremas de simplificação de circuitos serão apresentados de modo a facilitar a compreensão e a análise de circuitos mais complexos. O leitor deve considerar que a teoria abordada neste capítulo está presente no seu dia a dia, por exemplo, nos circuitos elétricos automotivos, nos circuitos elétricos que compõem o seu celular, e em várias outras aplicações dos circuitos de corrente contínua.

5.1 Leis de Ohm e de Kirchhoff

Nos capítulos anteriores foram estudados conceitos fundamentais aplicados à eletricidade, tais como o potencial elétrico, a tensão elétrica, a corrente elétrica e a resistência elétrica. Este capítulo tem como objetivo fornecer ferramentas analíticas para a solução de circuitos em corrente contínua. Tendo em vista a variedade de aplicações com circuitos desse tipo, é de fundamental importância entender os conceitos que serão discutidos a seguir para que o leitor consiga realizar com destreza análises do comportamento desse tipo de circuito.

A palavra circuito significa um caminho fechado, que limita uma área. O conceito de circuito elétrico está associado a uma malha ou caminhos por onde a corrente circula. Dessa forma:

Circuito elétrico é um conjunto de malhas elétricas construídas a partir de fontes, resistores, capacitores, indutores e outros componentes elétricos.

Uma bateria de um veículo alimentando uma lâmpada do farol é um circuito elétrico. A bateria alimentando relés para acionar a buzina é outro exemplo de circuito elétrico. Vimos no Capítulo 2 que esses circuitos podem ser representados por circuitos elétricos simplificados ou esquemas elétricos. No estudo da teoria deste capítulo, são usados esses esquemas ou circuitos simplificados. Assim, uma lâmpada halógena pode ser representada simplificada por uma resistência elétrica, um interruptor pode ser representado por uma chave simples, uma bateria pode ser representada por uma fonte de tensão simples. Os símbolos elétricos que compõem os circuitos elétricos neste capítulo podem ser encontrados no Anexo 1.

A primeira correlação entre grandezas elétricas é expressa através da lei de Ohm, representada matematicamente pela equação (5.1):

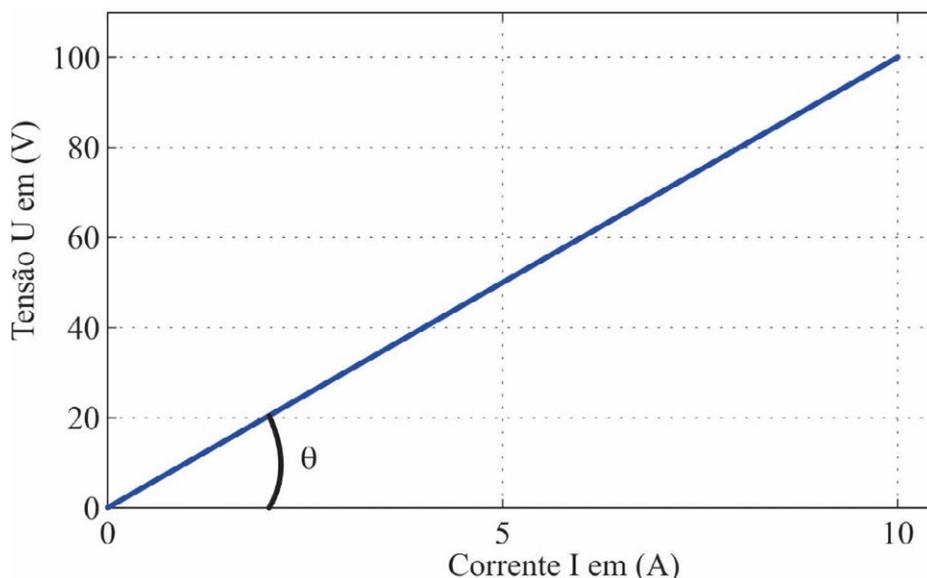
$$U = RI \quad (5.1)$$

Nessa equação, U representa o valor da tensão aplicada aos terminais da resistência, R é o valor numérico da resistência e I o valor da corrente elétrica que percorre a resistência. Em síntese, a lei de Ohm estabelece que:

A tensão (U) em um resistor (R) é igual ao produto de sua resistência pela corrente que a percorre.

Vale lembrar que a tensão U é medida em volt (V), a resistência em ohm (Ω) e a corrente em ampère (A). As relações de unidade são de fundamental importância para que a lei seja aplicada corretamente. Conforme abordado em capítulos anteriores, as unidades podem ser representadas na forma de múltiplos e submúltiplos umas das outras. A expressão (5.1) nos revela que a tensão nos terminais de uma resistência tem um comportamento linear com a evolução do valor da corrente que percorre essa resistência. Uma forma de comprovarmos essa relação de linearidade é estabelecermos um valor qualquer de resistência elétrica e atribuírmos uma sucessão de valores de correntes que percorreriam esta resistência; ao final, calculamos a tensão em função da resistência e dos valores de corrente. Os valores das tensões em função das correntes em um gráfico, nas coordenadas cartesianas, são mostrados na Figura 5.1.

Figura 5.1 – Relação entre a tensão e a corrente em uma resistência linear



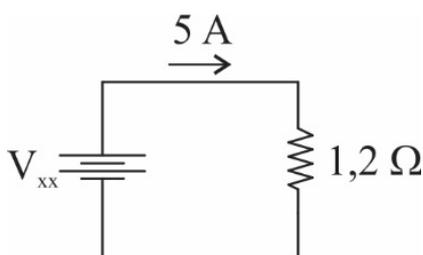
O leitor deverá perceber que a tensão U em função da corrente I é uma reta que passa na origem dos eixos coordenados. A passagem na origem indica que, se em uma resistência a corrente for zero, a tensão sobre essa resistência também deverá ser zero. Veja, também que, analisando o gráfico de $U \times I$, pode ser calculado o valor da resistência que deu origem aos valores das tensões em função das correntes, aplicando-se a lei de Ohm – no ponto onde

a tensão é igual a 100 V e a corrente é 10, a lei de Ohm nos informa que o valor da resistência é de 10 Ω . Existem, entretanto, materiais que não possuem resistência constante. Tais materiais já foram discutidos no Capítulo 2. Os materiais que possuem resistência constante são conhecidos como lineares, uma alusão à linearidade entre tensão e corrente. O filamento de uma lâmpada incandescente, por exemplo, não possui um comportamento linear entre tensão e corrente. O leitor perceba que, neste caso, a lei de Ohm ainda é satisfeita, ou seja, a expressão (5.1) é correta, apenas a resistência não é constante, a resistência é função da corrente. Neste capítulo, todos os exemplos serão abordados levando em consideração resistências constantes, que não variam com a corrente ou com a tensão.

Exemplo 5.1

Seja o circuito em corrente contínua mostrado na Figura 5.2, calcule o valor da tensão estabelecida nos terminais da resistência de 1,2 Ω .

Figura 5.2 – Circuito série para aplicação direta da lei de Ohm



Solução:

A solução do referido exemplo é dada aplicando-se diretamente a lei de Ohm, ou seja:

$$\begin{aligned}V_{xx} &= 5 \times 1,2 \\V_{xx} &= 6,0 \text{ V}\end{aligned}$$

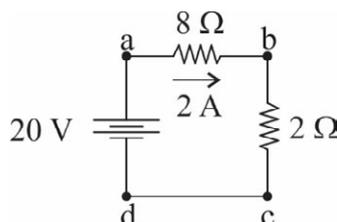
É interessante saber que nem todos os circuitos são simples como o do exemplo 5.1, pois os circuitos elétricos que correspondem a aplicações reais são bem mais elaborados e mais complexos. Para resolver problemas mais complexos, foram propostas duas leis de solução de circuitos, conhecidas como leis de Kirchhoff. A primeira delas está correlacionada com as tensões e a segunda com as correntes em um circuito elétrico. A lei Kirchhoff para as tensões estabelece que:

A soma das elevações e quedas de tensões num percurso fechado de um circuito elétrico é nula.

Em outras palavras, a soma das tensões sobre os terminais dos elementos passivos¹ deve ser igual à tensão que alimenta o circuito. Para um melhor entendimento da aplicação dessa lei, considere a Figura 5.3 a seguir.

Exemplo 5.2

Figura 5.3 – Circuito resistivo referente ao exemplo 5.2



Perceba que a aplicação da lei de Kirchhoff – para as tensões – estabelece que a soma das tensões nos componentes passivos, que são os resistores de $8\ \Omega$ e $2\ \Omega$, deve ser igual à fonte de tensão, nesse caso a tensão na resistência maior é de $16\ \text{V}$ ($U_{R8} = 8 \times 2 = 16\ \text{V}$) e na menor é de $4\ \text{V}$ ($U_{R2} = 2 \times 2 = 4\ \text{V}$). Observe ainda que a soma dessas duas quedas de tensão nos resistores corresponde à tensão de alimentação de $20\ \text{V}$.

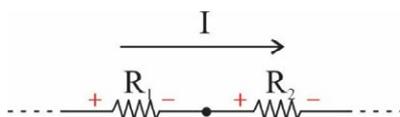
Nos circuitos elétricos, os resistores consomem energia, por isso dizemos que, sobre seus terminais, temos uma queda de tensão; as fontes de tensão fornecem energia, por isso dizemos que, sobre os seus terminais, há uma elevação de tensão. Do exposto, a soma das quedas de tensão em um circuito (no caso do exemplo 5.2, as quedas de tensão nos resistores de $8\ \Omega$ e $2\ \Omega$) é igual às elevações de tensão (no exemplo 5.2, só há uma elevação de tensão e esta é igual à fonte de tensão de $20\ \text{V}$).

O leitor pode utilizar outra analogia para fixar o conceito discutido aqui: uma caminhada. Ao caminhar e voltar ao mesmo ponto de partida, a energia potencial do caminhante é zero. É interessante perceber que a aplicação da lei de Kirchhoff das tensões nos dá um forte indicativo da conservação de energia presente em todos os sistemas elétricos de potência.

A outra lei de Kirchhoff está relacionada com as correntes dos nós nos circuitos elétricos. Um nó é um ponto de junção de dois ou mais elementos de circuito. Veja novamente o circuito do exemplo 5.2 e perceba que ele tem quatro nós (chamados de **a**, **b**, **c** e **d** – os nós em um circuito são referenciados por letras minúsculas). Dois desses nós correspondem a um único ponto, são os nós **c** e **d**, que são conectados por um fio – lembrar que nos circuitos elétricos um fio é representado por um traço. Aproveitando a discussão sobre os nós, temos que definir o que vem a ser a **conexão série** em um circuito elétrico: trata-se da união de dois elementos por apenas um nó, veja na Figura 5.4.

¹ Um elemento passivo é aquele elemento que, por si só, não fornece energia ao circuito elétrico; sua função é consumir energia no circuito. O resistor, por exemplo, é um elemento passivo porque ele não fornece energia ao circuito.

Figura 5.4 – Conexão de elementos em série



Na Figura 5.4, os resistores R_1 e R_2 estão unidos por apenas um nó (sem nomenclatura). Veja também que elementos em série são percorridos pela mesma corrente (neste caso a corrente I) caracterizando, portanto, a conexão em série dos resistores R_1 e R_2 .

A segunda lei partiu de uma observação que Kirchhoff fez nas correntes que circulam em circuitos elétricos. Dando uma olhada novamente na Figura 5.3, percebemos que se trata de um circuito do tipo série. Analisando um pouco mais quanto à corrente elétrica, é possível entender que a corrente que entra no nó b vindo da esquerda para a direita é a mesma que sai dele para percorrer o resistor de $2\ \Omega$. Foi a partir de observações como essa que Kirchhoff enunciou a segunda lei de solução de circuitos, a qual pode ser reproduzida aqui para fins didáticos:

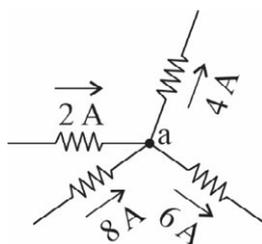
A soma das correntes que entram em um determinado nó é igual à soma das correntes que saem desse mesmo nó.

A aplicação direta da lei de Kirchhoff para as correntes em uma parte de circuito pode ser entendida com o auxílio do exemplo 5.3.

Exemplo 5.3

Seja a parte de um circuito mostrado na Figura 5.5, determine se o enunciado da lei de Kirchhoff para as correntes é atendida.

Figura 5.5 – Parte de um circuito para aplicação da lei de Kirchhoff para as correntes



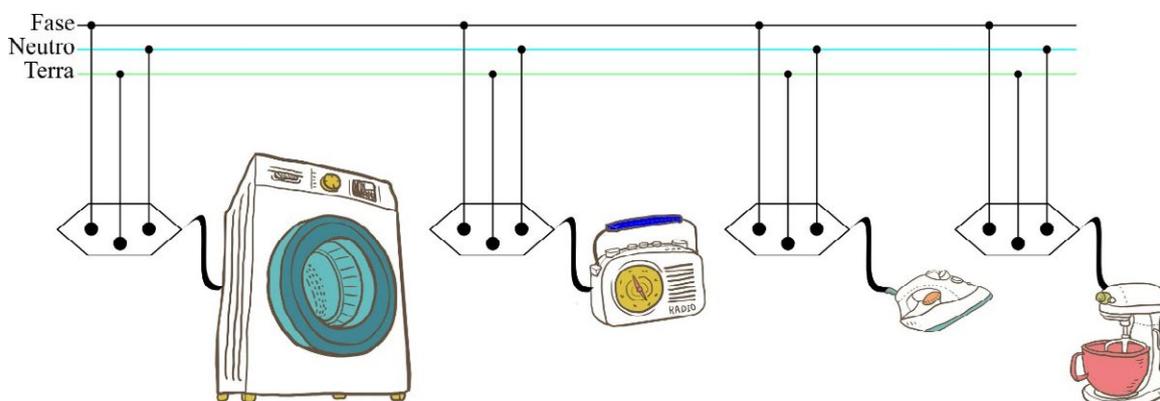
Solução:

A parte de circuito enfoca quatro resistores conectados pelo nó a . Observe que duas correntes entram no nó e duas saem dele. A soma das correntes que entram no nó – as correntes de $2\ \text{A}$ e $8\ \text{A}$ – deve ser igual à soma das correntes que saem (ou que deixam) o nó – neste caso as correntes de $4\ \text{A}$ e $6\ \text{A}$. Ao aplicar a lei de Kirchhoff para as correntes no nó a , percebemos que a soma das correntes que entram no nó é exatamente igual à soma das correntes que deixam o nó, portanto, verifica-se que a lei de Kirchhoff para as correntes foi plenamente atendida.

5.2 Divisor de corrente em circuitos de corrente contínua

Em muitas aplicações, as resistências e outras cargas estão sob o mesmo potencial, ou seja, alimentadas por uma mesma fonte. Por exemplo, nas nossas residências todas as cargas (máquina de lavar, aparelhos de som, ferro de passar e outras – veja a Figura 5.6) estão sendo alimentadas pela mesma fonte, neste caso, a rede elétrica residencial, caracterizada pelos condutores fase, neutro e terra, com pontos disponibilizados nas tomadas que alimentam cada equipamento elencado na Figura 5.6. Diz-se que as **cargas estão em paralelo**. Duas resistências estão em paralelo, se elas estão sendo alimentadas pela mesma fonte ou, alternativamente, conectadas por dois nós. A aplicação das leis de Kirchhoff para as correntes facilita a análise no caso de cargas conectadas em paralelo.

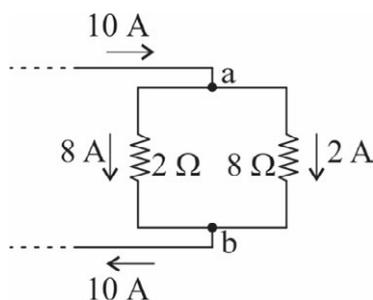
Figura 5.6 – Cargas em paralelo. A fonte* é constituída pelos condutores fase e neutro.



* Veja que existe uma única fonte, porém várias cargas alimentadas pela mesma fonte.

Estender a lei de Kirchhoff para as correntes, a fim de manipular circuitos com cargas em paralelo, facilita as operações. Existem situações na análise em circuitos nas quais é necessário conhecer as correntes em diversos ramos em paralelo, sem necessariamente ter que calcular a tensão, posto que a tensão é igual para todas as cargas e geralmente é conhecida. Nos casos de cargas em paralelo, um conceito derivado da lei das correntes é aplicado com relativa facilidade. Para um melhor entendimento, observe a Figura 5.7 e acompanhe as discussões que serão feitas em seguida.

Figura 5.7 – Circuito para conceituação do divisor de corrente

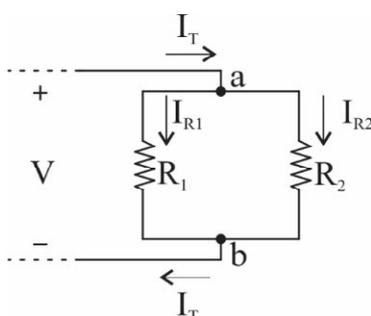


O leitor deve observar que existe uma corrente total de 10 A vindo de uma parte de circuito para o nó **a** (entenda que a parte de circuito é representada pelos condutores com pontilhado); desse nó, a corrente se divide entre as resistências de 2 Ω e 8 Ω , mas, quando chega ao nó **b**, ela novamente é combinada – neste caso somada – para perfazer a corrente total. A divisão da corrente permite prever, ou calcular, como a corrente que entra em um nó será dividida entre dois ou mais ramos em paralelo. De forma geral, o critério da divisão de corrente pode ser enunciado a seguir:

A corrente se divide nos ramos de um circuito de corrente contínua em paralelo, na relação inversa dos valores das resistências que compõem o circuito.

Voltando ao circuito da Figura 5.7, o leitor atente ao fato de que o maior valor de corrente percorreu a resistência de menor valor. Isso é entendido pelo próprio conceito de resistência que promove uma dificuldade para a circulação de corrente. Isso implica dizer que quanto maior for a resistência de um ramo em paralelo, menor será a corrente que circulará nesse ramo. A seguir será demonstrado, matematicamente, o divisor de correntes aplicado a duas resistências. Nos exercícios do final do capítulo, serão propostos e resolvidos exemplos que aprofundam a discussão feita nesta seção. Para um melhor entendimento da demonstração observe a Figura 5.8.

Figura 5.8 – Circuito para demonstração do divisor de correntes aplicado a duas resistências



É possível perceber que as duas resistências estão submetidas ao mesmo valor de tensão V . Perceba que a corrente total que entra no nó **a** é igual à tensão V dividida por R_T (valor da resistência equivalente vista por V). A corrente I_{R1} , por exemplo, é igual à tensão de entrada V dividida por R_1 . A resistência total vista pela fonte pode ser calculada usando-se o método de associação de resistores, visto no Capítulo 2. Assim, obtemos a equação (5.2).

$$R_T = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} \quad (5.2)$$

Com a resistência total R_T , podemos obter a equação (5.3), a qual representa a corrente total fornecida pela fonte V .

$$I_T = \frac{V}{R_T} \quad (5.3)$$

Aplicando-se o mesmo raciocínio para as correntes nas resistências do circuito da Figura 5.8, obtemos as expressões equivalentes para as correntes que circulam nas resistências R_1 e R_2 .

$$I_{R1} = \frac{V}{R_1} \quad (5.4)$$

$$I_{R2} = \frac{V}{R_2} \quad (5.5)$$

Da equação da corrente total, I_T , podemos isolar a tensão V e substituir nas equações das correntes I_{R1} e I_{R2} derivadas logo acima.

$$I_{R1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \times I_T \quad (5.6)$$

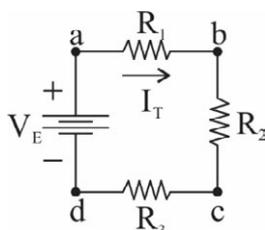
$$I_{R2} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \times I_T \quad (5.7)$$

As expressões (5.6) e (5.7) caracterizam a divisão de corrente em duas resistências associadas em paralelo. A sua aplicação para três ou mais resistências foge ao escopo deste livro. Como comentário final, enfatizamos que a aplicação do divisor de correntes deve ser feita em situações nas quais as resistências se encontram associadas em paralelo. Para situações nas quais elas estão associadas em série, existe uma outra conceituação, a qual será abordada a seguir.

5.3 Divisor de tensão em circuitos de corrente contínua

O divisor de tensão é o procedimento dual do divisor de corrente aplicado aos circuitos de corrente contínua em série. A sua função é determinar os valores de tensão estabelecidas nos terminais de um conjunto de resistores, tendo em vista tão somente o valor da fonte de tensão do circuito e os valores numéricos dos resistores associados em série com a fonte. Por esse método, é fácil entender que as maiores tensões são estabelecidas nos resistores com os maiores valores numéricos. Lembre-se da lei de Ohm, “quanto maior a resistência maior a tensão sobre ela”. A seguir serão abordados os conceitos matemáticos para a dedução generalizada do divisor de tensão para circuitos em série. Para um melhor entendimento, convidamos o leitor a observar a Figura 5.9.

Figura 5.9 – Circuito para demonstração do divisor de tensão



Na Figura 5.9, as três resistências que compõem o circuito estão em série e, portanto, são percorridas pela mesma corrente. A resistência equivalente vista pela fonte de tensão V_E pode ser calculada tão somente pela soma das resistências, assunto visto no Capítulo 2; logo, $R_E = R_1 + R_2 + R_3$. A corrente total do circuito (I_T) é calculada pela lei de Ohm aplicada à fonte de tensão V_E , ou seja: $I_T = \frac{V_E}{R_E}$.

Agora, por exemplo, suponha que a tensão sobre a resistência R_1 necessite ser calculada. Uma vez que o circuito está em série e a corrente total já é conhecida, obtemos a equação (5.8), ou seja:

$$V_{R1} = R_1 \times I_T = \frac{R_1 \times V_E}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (5.8)$$

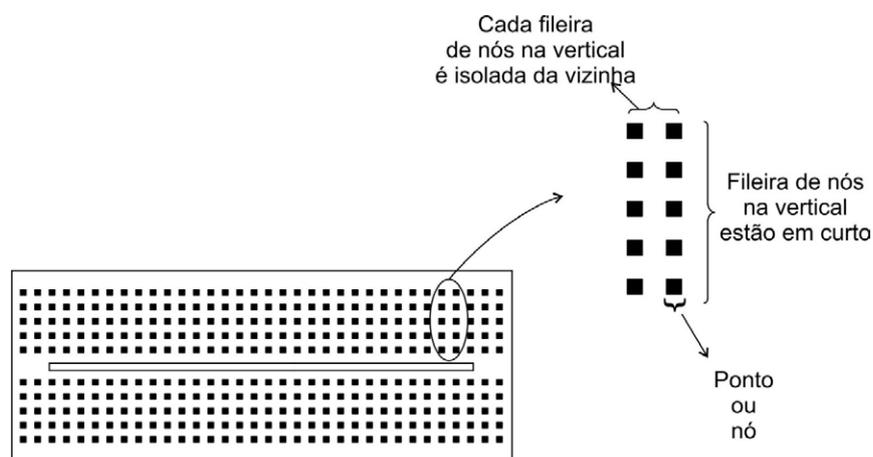
Se for necessário que a tensão sobre a resistência R_2 seja calculada, o procedimento é o mesmo e está caracterizado pela equação (5.9).

$$V_{R2} = R_2 \times I_T = \frac{R_2 \times V_E}{R_1 + R_2 + R_3} \quad (5.9)$$

Note que, para todas as resistências do circuito, o cálculo da tensão em cada uma delas pode ser feito conhecendo-se o valor da fonte de tensão de entrada, bastando tão somente multiplicar a resistência, da qual queremos calcular a tensão, pelo valor da fonte de tensão de entrada e dividir o resultado pela resistência equivalente à série do circuito. Este, em essência, é o método da divisão de tensão aplicado a circuitos de corrente contínua em série.

Quando estamos lidando com circuitos elétricos, muitas vezes queremos testar os conceitos em circuitos reais. As matrizes de contatos, ou *protoboard*, nos auxiliam na construção de circuitos protótipos para diversas finalidades, inclusive didática, a qual possui objetivo de consolidação dos conhecimentos teóricos. Uma matriz de contatos é uma placa, contendo furos que servem para a conexão de diversos elementos e fontes. Para as explicações a seguir, acompanhe a ilustração da Figura 5.10.

Figura 5.10 – Aspecto de uma matriz de contato ou *protoboard*



Os furos da matriz de contatos são organizados em fileiras ou colunas dispostas ao longo da superfície da placa. No centro da matriz de contatos, existe um sulco (em baixo relevo) para separar colunas de fileiras. Cada fileira vertical, composta de cinco furos, está em curto-circuito, e cada fileira, de cinco furos, está isolada da fileira vizinha. Abaixo serão propostas duas atividades que você mesmo pode executar em casa, bastando ter em mãos uma matriz de contatos, uma bateria de 9 V, fios e algumas resistências de 0,25 W, as quais podem ser facilmente adquiridas no mercado local de sua cidade ou na própria internet.

PRÁTICAS NA SALA DE AULA

Teste do divisor de tensão e do divisor de corrente

Material a ser utilizado

- Uma matriz de contatos
- Uma bateria de 9 V
- Um resistor de 1 k Ω com potência de 0,25 W
- Um resistor de 330 Ω com potência de 0,25 W
- Fios AWG 23 ou 22 (os quais podem ser adquiridos de cabos de rede para internet ou de fios de telefone)
- Multímetro

Práticas experimentais e teóricas

- Para testar o divisor de tensão, monte o circuito conforme Figura 5.11; em seguida, faça os cálculos das tensões nos resistores de 1 k Ω e 330 Ω , usando as equações (5.8) e (5.9). Depois, utilizando o multímetro, efetue as medições dessas tensões. O que você achou dos resultados? Foram muito diferentes dos cálculos efetuados? Some as tensões obtidas nos resistores de 1 k Ω e 330 Ω para comparar com a tensão da bateria de 9 V. Houve uma diferença, não foi? A que você pode atribuir essa diferença?
- Agora vamos testar o divisor de correntes e a lei de Kirchhoff para os nós. Para isso monte o circuito da Figura 5.12. Calcule a resistência equivalente entre os resistores de 1 kW e 330 W; em seguida calcule a corrente total teórica a ser fornecida pela bateria de 9 V e a resistência equivalente que você calculou. Utilizando as expressões (5.6) e (5.7), calcule as correntes nas resistências de 1 kW e 330 W; após esses procedimentos, utilize o multímetro para medir as correntes nessas resistências e compare com os valores calculados. Some as correntes medidas nas resistências e compare com o valor da corrente total que você calculou.

Figura 5.11 – Circuito da prática 1 para testar o divisor de tensão e a lei de Kirchhoff para as tensões

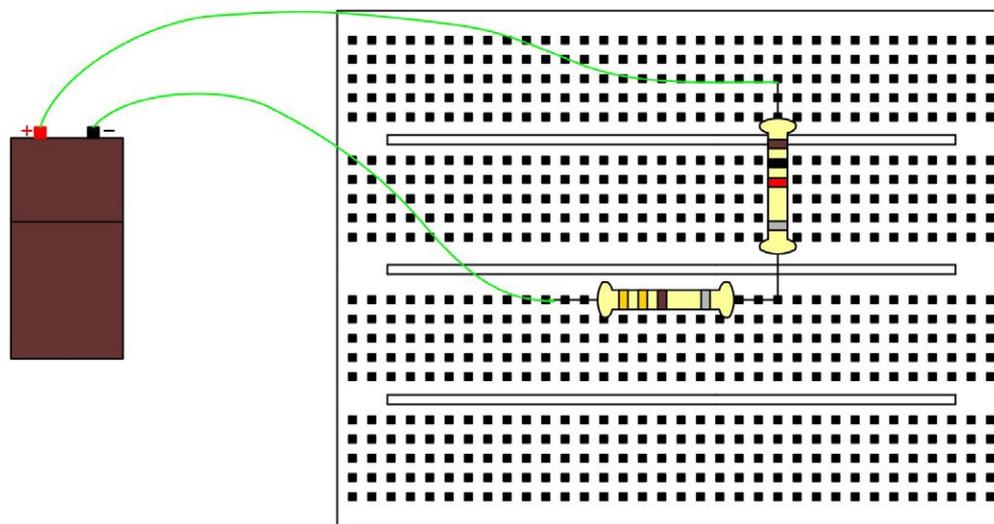
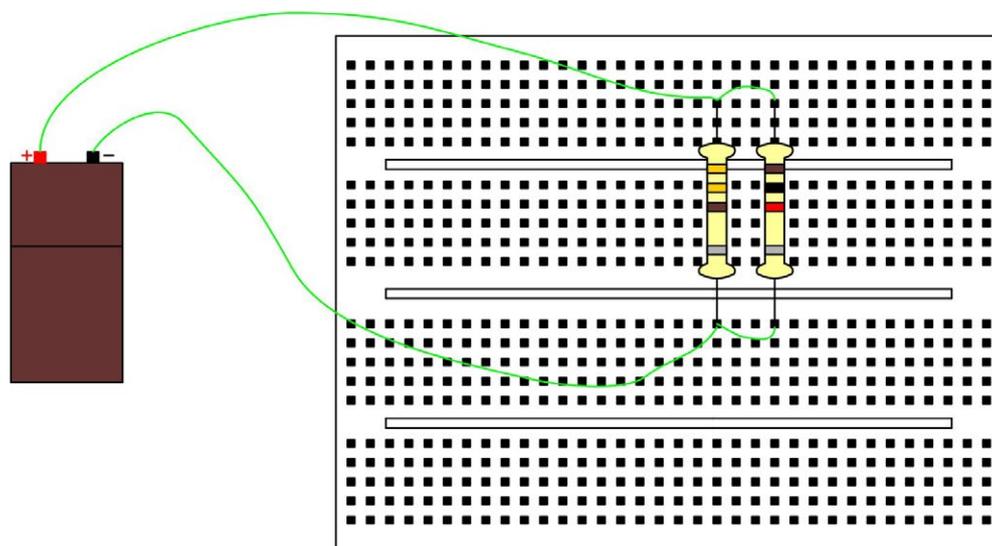


Figura 5.12 – Circuito da prática 2 para testar o divisor de corrente e a lei de Kirchhoff para os nós

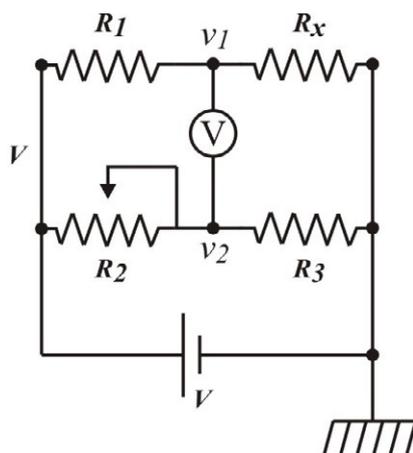


Ponte de Weathstone – Aplicação do divisor de tensão

Uma ponte é um arranjo de componentes, resistores, capacitores e indutores com a finalidade, na grande maioria das vezes, de realizar medições de algum dos componentes presentes na própria ponte. Com esses arranjos, é possível a medição desses componentes em faixas de valor que os medidores convencionais não alcançam, por exemplo, a resistência de um fio de cobre que pode estar na faixa de décimo de ohm. A ponte mais popular é a ponte de Weathstone, vista na Figura 5.13. O objetivo da ponte é medir a

resistência R_x , sendo a resistência R_2 um potenciômetro linear (resistência variável). Equilibrar a ponte é tornar $v_1 = v_2$, isto é, o potenciômetro variará seu valor até o voltímetro zerar. Se o voltímetro for analógico deverá ser de zero centrado. Neste caso, um voltímetro digital seria a melhor alternativa. Quando a ponte de Weathstone está equilibrada, há uma expressão que relaciona as quatro resistências, conseqüentemente o valor de R_x é determinado.

Figura 5.13 – Ponte de Weathstone para leitura do valor de R_x



Determinação da expressão da ponte de Weathstone equilibrada

A tensão no resistor R_x é o próprio v_1 , que é expressa em (5.10), com ajuda da expressão do divisor de tensão.

$$v_1 = \frac{R_x}{R_x + R_1} V \quad (5.10)$$

Já a tensão no resistor R_3 é v_2 , que é expressa por (5.11).

$$v_2 = \frac{R_3}{R_3 + R_2} V \quad (5.11)$$

Quando a ponte está equilibrada, temos $v_1 = v_2$ como já foi mencionado, logo, igualando-se (5.10) e (5.11), obtém-se (5.12). Manipulando-se algebricamente, tem-se a expressão (5.13), ou seja, o valor de R_x é determinado se R_1 , R_2 e R_3 são conhecidos:

$$\frac{R_x}{R_x + R_1} V = \frac{R_3}{R_3 + R_2} V \quad (5.12)$$

$$R_x = \frac{R_1 R_3}{R_2} \quad (5.13)$$

Exemplo 5.4

Uma ponte é formada por dois resistores fixos de valores iguais $R_1 = R_3 = 500 \Omega$ e um potenciômetro de $10 \text{ k}\Omega$ como R_2 . A ponte se equilibrou para um valor do potenciômetro igual a $8,5 \text{ k}\Omega$. Qual o valor de R_x ?

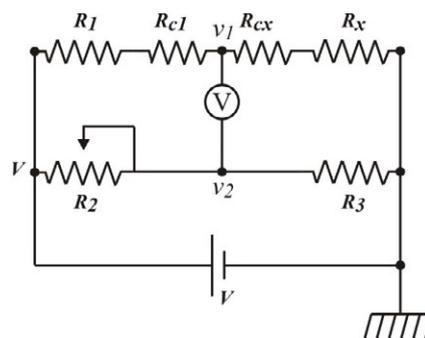
Solução:

$$R_x = \frac{500 \cdot 500}{8500} = 29,41 \Omega$$

O leitor seria capaz de mostrar os limites de leitura de resistência R_x que esta ponte do exemplo 5.4 é capaz de suportar. Observe que, fora desse limite, a ponte não atinge o equilíbrio.

A ponte de Weathstone é mais eficiente para a medição de valores médios de resistências, de dezenas de ohms até megaohm. Para valores de resistências pequenos, na faixa de décimo de ohms, a resistência de contato e dos fios interfere na precisão da ponte. Vemos na Figura 5.14 a ponte, com as devidas resistências de contato e fios R_{cx} e R_{c1} .

Figura 5.14 – Ponte de Weathstone para leitura do valor de R_x , com adição de resistências de contato



Neste caso, as tensões em v_1 e v_2 são respectivamente (5.14) e (5.15).

$$v_1 = \frac{(R_x + R_{cx})}{R_x + R_1 + R_{c1} + R_{cx}} V \quad (5.14)$$

$$v_2 = \frac{R_3}{R_3 + R_2} V \quad (5.15)$$

Igualando as expressões (5.14) e (5.15), para equilibrar a ponte, e manipulando-as algebricamente, chega-se à expressão (5.16). Isto implica dizer que as resistências de contatos e dos fios alteram o valor medido para mais ou para menos, provocando uma imprecisão grande se a resistência a ser medida for da mesma ordem da resistência de contato ou dos fios, décimo de ohms.

$$R_x = \frac{R_1 R_3}{R_2} + \frac{R_3 R_{c1} - R_2 R_{cx}}{R_2} \quad (5.16)$$

A ponte de Kelvin é uma modificação da ponte de Weathstone, com intuito de anular essas resistências de contato e dos fios, que são um grande empecilho na medição de resistências muito pequenas.

Existem mais de uma dezena de tipos de pontes que podem ser utilizados para diversas finalidades de medição. Dois exemplos desses tipos são a ponte de Schering, utilizada para medições de reatâncias capacitivas, e a ponte de Maxwell, destinada a medir reatâncias indutivas, ambas em corrente alternada.

5.4 Análise de circuitos pela lei das malhas

A lei das malhas é uma técnica de análise de circuitos utilizada para descobrir tensões e correntes em sistemas compostos por fontes e por resistências. A aplicação desta técnica de análise não se restringe aos circuitos em corrente contínua, seu domínio precoce implicará uma extensão natural para sistemas em corrente alternada. Ela é muito utilizada em Sistemas Elétricos de Potência (SEP) para que os engenheiros e técnicos calculem o valor de diversas grandezas de interesse, como, por exemplo, as tensões e correntes nas linhas de transmissão de energia elétrica.

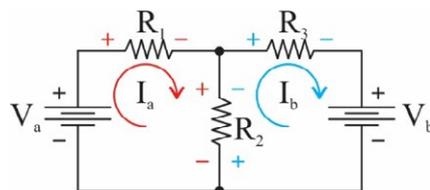
Essa técnica se baseia na lei de Kirchhoff para as tensões aplicadas a circuitos quaisquer, porém é necessário estabelecer alguns critérios como, por exemplo, a polaridade da tensão sobre as resistências. Neste caso, é bom lembrar que, em quaisquer circuitos, a polaridade da tensão sobre uma resistência é feita de modo que a corrente, ao percorrê-la, implique uma queda de tensão do terminal por onde entra a corrente em relação ao terminal por onde a corrente sai (veja Figura 5.4). Esse critério obedece à convenção passiva, a qual garante que existe uma perda de energia nas resistências ao serem percorridas por corrente elétrica.

De forma geral, essa técnica pode ser aplicada seguindo-se alguns passos, os quais o leitor pode entender como sendo um conjunto de procedimentos operacionais ou, caso queira, como um receituário. Se seguidos corretamente, isso resultará na solução correta de quaisquer circuitos que você eventualmente necessite manipular. Veja os passos a seguir:

- 1º passo** Determinar (arbitrar) o sentido das correntes das malhas.
- 2º passo** Determinar a polaridade das tensões sobre as resistências das malhas, levando em consideração os sentidos das correntes de malhas adotados no passo anterior.
- 3º passo** Aplicar a lei de Kirchhoff das tensões a cada uma das malhas. Lembrar que a polaridade das fontes de tensão já são determinadas, ou seja, independem dos sentidos das correntes que foram adotados.
- 4º passo** Resolver o sistema de equações das correntes resultante da aplicação do passo anterior, a fim de que os valores das correntes de malha sejam determinados.

Vejamos a aplicação dessa técnica de análise de circuitos em um sistema genérico de duas malhas, visto na Figura 5.15. O sentido das correntes das malhas, aqui chamadas de correntes I_a e I_b , foi determinado aleatoriamente (passo 1) como sendo, ambas, no sentido horário. Observe que as polaridades das tensões sobre as resistências são tais que obedecem ao sentido que as correntes de malhas percorrem (passo 2).

Figura 5.15 – Circuito de duas malhas para aplicação do método das correntes das malhas



Observe a corrente de malha I_a , da esquerda. A lei de Kirchhoff para as tensões aplicada a essa malha deve levar em consideração as polaridades adotadas no passo anterior e uma atenção especial deve ser dispensada à resistência R_2 . Ela é percorrida por duas correntes de malha (neste caso as correntes I_a e I_b); por este motivo a sua tensão deve levar em consideração a polaridade da malha em análise (malha de I_a), então, aplicando-se a lei de Kirchhoff para as tensões à malha da esquerda (passo 3), teremos:

$$V_a - R_1 I_a - R_2 I_a + R_2 I_b = 0 \quad (5.17)$$

A polaridade que foi levada em consideração, para o efeito da corrente I_b na resistência R_2 , foi a da malha em análise (por esse motivo foi adotada a cor vermelha). Observe, ainda, que, quando a corrente percorre uma resistência do maior para o menor potencial, trata-se de uma queda de tensão. Daí o sinal algébrico da tensão no elemento ser negativo. Quando a corrente elétrica percorre um elemento do menor para o maior potencial, estamos lidando com uma elevação de tensão (a adoção de uma queda ou elevação de tensão fica a critério de quem está analisando as equações, um sinal algébrico oposto ao explanado acima pode ser adotado também). Continuando com a aplicação do passo 3 para a malha onde circula a corrente de malha I_b , temos:

$$-V_b + R_2 I_a - R_2 I_b - R_3 I_b = 0 \quad (5.18)$$

Reordenando as duas equações derivadas do passo 3, ficamos com (5.19) e (5.20), que é um sistema de duas equações lineares em que as incógnitas são as duas correntes das malhas.

$$-(R_1 + R_2)I_a + R_2 I_b = -V_a \quad (5.19)$$

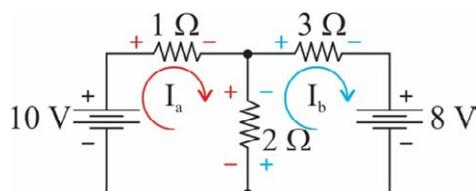
$$R_2 I_a - (R_2 + R_3)I_b = +V_b \quad (5.20)$$

O passo 4 finaliza o processo com a solução do sistema de equações lineares anterior para as correntes I_a e I_b . Para sedimentar de forma eficiente o que foi discutido na aplicação dos quatro passos propostos, um exemplo numérico será desenvolvido a seguir.

Exemplo 5.5

Seja o circuito da Figura 5.16, determine o valor da potência fornecida à resistência de 2Ω .

Figura 5.16 – Circuito para exemplo 5.5

**Solução:**

Para determinar a potência demandada pela resistência de 2Ω do circuito logo acima, temos que calcular a corrente que a percorre. No circuito já é possível ver que o passo 1 já foi aplicado, o nome e o sentido das correntes de malha foram arbitrados como sendo I_a e I_b , ambas no sentido horário, conforme visto anteriormente no detalhamento do método (passo 1). As polaridades sobre as resistências do circuito foram definidas em função do sentido adotado para as correntes de malha (passo 2). Quando executados os passos 3 e 4, o sistema de equações a seguir é obtido.

$$\begin{cases} -3I_a + 2I_b = -10 \\ 2I_a - 5I_b = +8 \end{cases}$$

A solução do sistema pode ser obtida de dois modos: o primeiro modo é pelo método da substituição e o segundo é pela regra de Kramer. O método de solução adotado para este problema específico é o da substituição, porém uma breve explanação da regra de Kramer será fornecida neste livro. Isolando-se a corrente I_a da segunda equação do sistema logo acima, teremos os seguintes passos até a completa determinação das correntes de malha do sistema de equações do problema:

$$\begin{aligned} \therefore I_a &= \frac{8 + 5I_b}{2} \\ \therefore -3\left(\frac{8 + 5I_b}{2}\right) + 2I_b &= -10 \\ \therefore -12 - 7,5I_b + 2I_b &= -10 \\ \therefore -5,5I_b &= 2 \\ \therefore I_b &= -0,3636 \text{ A} \\ \therefore I_a &= \frac{8 - 5 \times 0,36}{2} \\ \therefore I_a &= \frac{6,1820}{2} \cong 3,0910 \text{ A} \end{aligned}$$

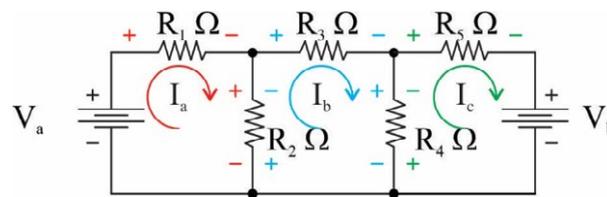
Observe que o sinal da corrente de malha I_b foi negativo. Isso quer dizer que o sentido adotado para a corrente de malha I_b é o oposto ao sentido real dessa corrente no circuito (ou seja, a corrente I_b possui o sentido anti-horário). Agora aplicando-se a lei de Kirchhoff para as correntes ao nó a que a resistência de 2Ω está conectada, concluímos que a sua corrente, na verdade, é de $3,4545 \text{ A}$ ($I_a + I_b$, considerando que foi corrigido o sentido da corrente I_b após a solução do sistema de equações). A potência nessa resistência pode ser calculada, portanto, como sendo:

$$P_{2\Omega} = 2 \times 3,46^2 = 23,94 \text{ W}$$

Observe que, se o circuito possuir mais de duas malhas, o sistema que determina a sua solução possuirá um número maior de equações (tantas equações quantas forem as malhas independentes do circuito). Por este motivo, o método é utilizado em sistemas de potência para o cálculo de tensões e correntes em pontos específicos desses sistemas. As malhas dos circuitos irão derivar equações que serão resolvidas com o auxílio de softwares especializados em simulações e cálculos matemáticos avançados.

É sempre interessante para o leitor, todavia, ter uma experiência no que diz respeito à solução de circuitos mais complexos, utilizando a lei das malhas. Suponha, por exemplo, que seja necessário determinar as correntes de malha no circuito da Figura 5.17.

Figura 5.17 – Circuito de três malhas para aplicação da lei das malhas de Kirchhoff



Após a aplicação dos quatro passos elencados nas discussões precedentes, são derivadas três equações para o circuito da Figura 5.17, quais sejam:

$$-(R_1 + R_2)I_a + R_2I_b + 0I_c = -V_a \quad (5.21)$$

$$+R_2I_a - (R_2 + R_3 + R_4)I_b + R_4I_c = 0 \quad (5.22)$$

$$0I_a + R_4I_b - (R_5 + R_5)I_c = V_b \quad (5.23)$$

O conjunto de equações (5.21)-(5.23) é um sistema de equações de três incógnitas. Existem diversas maneiras de solução para sistemas desse tipo. Uma delas é o método da substituição seguido da eliminação de variáveis, semelhante ao que foi feito no exemplo 5.5. Existe, entretanto, um outro método de solução de sistemas de equações, aplicável tanto a sistemas de duas variáveis quanto com três variáveis. Para tanto, é necessário conhecer o que vem a ser uma matriz bem como o cálculo de seu determinante, em seguida conhecer a regra de Cramer aplicada à solução de sistemas de equações de duas ou mais variáveis.

5.4.1 Matrizes e cálculo de determinantes

Uma matriz é uma coleção – conjunto – de números organizados em linhas e colunas. Um exemplo de matriz é mostrado logo a seguir.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$$

O elemento a_{11} recebe os subíndices 11 porque está na primeira linha e na primeira coluna; já o elemento a_{21} , está na segunda linha e na primeira coluna, por este motivo recebe o subíndice 21 . O número de linhas, de colunas e a forma de distribuição dos elementos de uma matriz são utilizados na sua classificação. Um tipo especial de matriz utilizada na solução de sistemas de equações lineares é a matriz quadrada. Uma matriz é quadrada quando possui o mesmo número de linhas e de colunas, e o número de linhas e de colunas determina a ordem da matriz quadrada. Por exemplo, a matriz logo acima possui duas linhas e duas colunas e é chamada de matriz quadrada de ordem 2 (matriz 2×2 , ou seja, uma matriz com duas linhas e duas colunas). Uma matriz quadrada de ordem três (matriz 3×3) é mostrada logo abaixo.

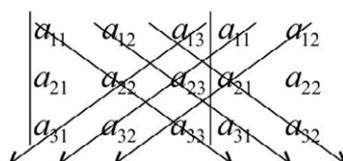
$$\begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix}$$

O determinante de uma matriz é um número associado à própria matriz e é obtido através de operações de multiplicação e somas algébricas entre os elementos da matriz. O determinante de uma matriz quadrada de ordem 2 é obtido multiplicando-se os elementos a_{11} e a_{22} e subtraindo o resultado pela multiplicação dos elementos a_{12} e a_{21} , ou seja:

$$a_{11} \times a_{22} - a_{12} \times a_{21} \quad (5.24)$$

Para uma matriz quadrada acima de ordem 3, existe um mnemônico conhecido como regra de Sarrus, desenvolvido pelo matemático francês Pierre Frédéric Sarrus (1798-1861). Esse método é extremamente rápido e fácil de ser executado (Ver Figura 5.18).

Figura 5.18 – Procedimento para cálculo de determinante de uma matriz 3×3 .



Para calcular o determinante de uma matriz de ordem 3, repita a primeira e a segunda colunas ao lado direito da matriz. Em seguida, multiplique os elementos que são percorridos pelas setas que apontam para a direita da página. Some algebricamente cada uma dessas multiplicações. O mesmo procedimento deve ser feito com os elementos que são percorridos pelas setas que apontam para a esquerda da página. O resultado da soma algébrica das multiplicações dos elementos percorridos pelas setas que apontam para a direita será igual ao valor x . O resultado da soma algébrica das multiplicações dos elementos percorridos

pelas setas que apontam para a esquerda será igual ao valor y . O determinante da matriz de ordem 3 ($D_{3 \times 3}$) será igual à subtração de x e y . As equações (5.18)-(5.20) demonstram matematicamente a descrição para a obtenção do determinante de uma matriz 3×3 .

$$(a_{11}a_{22}a_{33} + a_{12}a_{23}a_{31} + a_{13}a_{21}a_{32}) = x \quad (5.25)$$

$$(a_{13}a_{22}a_{31} + a_{11}a_{23}a_{32} + a_{12}a_{21}a_{33}) = y \quad (5.26)$$

$$D_{3 \times 3} = x - y \quad (5.27)$$

Os conceitos de matrizes e seus determinantes são aplicados em sistemas de equações. Vejamos como obter matrizes a partir de sistemas de equações e, em seguida, como aplicar os conceitos vistos aqui e na próxima subseção para obter a solução de sistemas de equações.

5.4.2 Sistemas de equações e matrizes

Seja o seguinte sistema de equações, representado pelas expressões (5.28)-(5.30) logo a seguir.

$$a_1x + b_1y + c_1z = A_1 \quad (5.28)$$

$$a_2x + b_2y + c_2z = A_2 \quad (5.29)$$

Esse sistema possui três incógnitas, ou variáveis, x , y e z . Cada uma das equações do sistema possui coeficientes associados às incógnitas. Por exemplo, a_1 é o coeficiente da variável x na equação (5.28); b_2 é o coeficiente da variável y na equação (5.29); e c_3 é o coeficiente da variável z na equação (5.30). Se o sistema for observado atentamente, verifica-se que é possível obter uma matriz constituída pelos coeficientes – M_{co} – de cada uma das equações do sistema, ou seja:

$$M_{co} = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & c_1 \\ a_2 & b_2 & c_2 \\ a_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \quad (5.31)$$

5.4.3 Regra de Cramer para a solução de sistemas de equações lineares

Um sistema de equações pode ser resolvido utilizando-se o conceito de determinantes. O método de solução de sistemas de equações a partir de determinantes foi desenvolvido por um matemático suíço chamado Gabriel Cramer (1704-1752). Por questões de simplicidade na descrição do método desenvolvido por Cramer, o sistema a ser considerado será o mesmo das equações (5.28)-(5.30). Cada variável tem uma matriz associada, essa matriz é obtida substituindo-se os coeficientes da coluna correspondente da variável pelos termos independentes (os termos A_1 , A_2 e A_3). As matrizes das variáveis x , y e z são M_x , M_y e M_z . Ou seja:

$$M_x = \begin{bmatrix} A_1 & b_1 & c_1 \\ A_2 & b_2 & c_2 \\ A_3 & b_3 & c_3 \end{bmatrix} \quad (5.32)$$

$$M_y = \begin{bmatrix} a_1 & A_1 & c_1 \\ a_2 & A_2 & c_2 \\ a_3 & A_3 & c_3 \end{bmatrix} \quad (5.33)$$

$$M_z = \begin{bmatrix} a_1 & b_1 & A_1 \\ a_2 & b_2 & A_2 \\ a_3 & b_3 & A_3 \end{bmatrix} \quad (5.34)$$

O método desenvolvido por Cramer consiste em calcular os determinantes das matrizes dos coeficientes e das variáveis e, em seguida, efetuar algumas divisões de determinantes. Por exemplo, o valor da variável será igual ao determinante de sua matriz dividido pelo determinante da matriz dos coeficientes, ou seja:

$$x = \frac{DM_x}{DM_{co}} \quad (5.35)$$

$$y = \frac{DM_y}{DM_{co}} \quad (5.36)$$

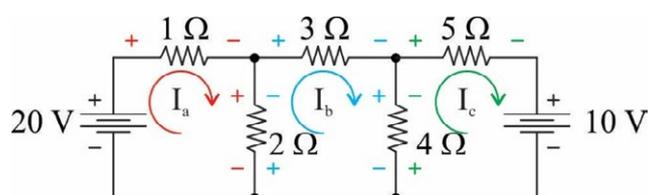
$$z = \frac{DM_z}{DM_{co}} \quad (5.37)$$

Como forma de aplicação dos conceitos apresentados nas subseções 5.4.1, 5.4.2 e 5.4.3, será proposto um problema de circuito cuja solução será obtida utilizando-se a lei das malhas. Após a determinação das variáveis, é interessante que elas sejam substituídas em uma das equações do sistema. Isso é importante porque, se existir algum erro, a equação na qual as variáveis foram substituídas não será verdadeira.

Exemplo 5.6

Seja o circuito da Figura 5.19, determine o valor das potências dissipadas nos resistores de $2\ \Omega$ e $4\ \Omega$.

Figura 5.19 – Circuito utilizado no exemplo 5.6



Solução:

Para determinar o valor das potências nos resistores de $2\ \Omega$ e $4\ \Omega$, é necessário saber quais são as correntes que os percorrem. Para obter essas informações, deve-se utilizar o método das correntes de malha para que suas representações I_a , I_b e I_c sejam calculadas.

O sistema de equações associado ao exemplo 5.6 é o seguinte:

$$-3I_a + 2I_b + 0I_c = -20$$

$$+2I_a - 9I_b + 4I_c = 0$$

$$0I_a + 4I_b - 9I_c = +10$$

Do sistema, podemos extrair as matrizes do coeficiente e das variáveis – correntes de malha – as quais são

$$M_{co} = \begin{bmatrix} -3 & 2 & 0 \\ 2 & -9 & 4 \\ 0 & 4 & -9 \end{bmatrix}$$

$$M_{I_a} = \begin{bmatrix} -20 & 2 & 0 \\ 0 & -9 & 4 \\ 10 & 4 & -9 \end{bmatrix}$$

$$M_{I_b} = \begin{bmatrix} -3 & -20 & 0 \\ 2 & 0 & 4 \\ 0 & 10 & -9 \end{bmatrix}$$

$$M_{I_c} = \begin{bmatrix} -3 & 2 & -20 \\ 2 & -9 & 0 \\ 0 & 4 & 10 \end{bmatrix}$$

O cálculo do determinante da matriz dos coeficientes M_{co} é feito do seguinte modo:

$$\begin{array}{ccc|ccc} -3 & 2 & 0 & -3 & 2 & \\ 2 & -9 & 4 & 2 & -9 & \\ 0 & 4 & -9 & 0 & 4 & \\ \hline 0 & -48 & -36 & -243 & 0 & 0 \end{array}$$

Em que $DM_{co} = -243 - (-48 - 36) = -159$.

Para o determinante de DM_{I_a} , tem-se o seguinte:

$$\begin{array}{ccc|ccc} -20 & 2 & 0 & -20 & 2 & \\ 0 & -9 & 4 & 0 & -9 & \\ 10 & 4 & -9 & 10 & 4 & \\ \hline 0 & -320 & 0 & -1620 & 80 & 0 \end{array}$$

Em que $DM_{I_a} = -1620 + 80 - (-320) = -1220$

De modo semelhante, para o determinante DM_{I_b} , tem-se:

$$\begin{array}{ccc|ccc} -3 & -20 & 0 & -3 & -20 & \\ 2 & 0 & 4 & 2 & 0 & \\ 0 & 10 & -9 & 0 & 10 & \\ \hline 0 & -120 & 360 & 0 & 0 & 0 \end{array}$$

Em que $DM_{I_b} = 0 - (-120 + 360) = -240$

Por fim, para DM_{I_c} , ter-se-á:

$$\begin{array}{ccc|ccc} -3 & 2 & -20 & -3 & 2 & \\ 2 & -9 & 0 & 2 & -9 & \\ 0 & 4 & 10 & 0 & 4 & \\ \hline 0 & 0 & 40 & 270 & 0 & -160 \end{array}$$

Com $DM_{I_c} = (270 - 160) - (40) = 70$.

Uma vez que os determinantes foram calculados, a regra de Cramer é utilizada para a determinação das correntes de malha. Sendo assim:

$$I_a = \frac{DM_{I_a}}{DM_{co}} = \frac{-1220}{-159} \cong 7,67 \text{ A}$$

$$I_b = \frac{DM_{I_b}}{DM_{co}} = \frac{-1220}{-159} \cong 1,51 \text{ A}$$

$$I_c = \frac{DM_{I_c}}{DM_{co}} = \frac{+70}{-159} \cong -0,44 \text{ A}$$

A corrente de malha I_c possui um valor negativo porque o sentido adotado para essa corrente é o oposto ao real. Uma vez que as correntes de malha foram encontradas, é prudente substituí-las em uma das equações do sistema. Suponha que a segunda equação do sistema seja a escolhida, ou seja, a equação:

$$+2I_a - 9I_b + 4I_c = 0$$

Ao se substituírem as correntes de malha calculadas através da regra de Cramer, obtém-se:

$$+2 \times 7,67 - 9 \times 1,51 + 4 \times (-0,44) = 0$$

$$15,34 - 13,59 - 1,76 = 0$$

A substituição das variáveis em qualquer das equações implicará o mesmo resultado. Se a primeira equação fosse utilizada, o resultado deveria ser igual a -20 ; se fosse a terceira equação, o resultado final deveria ser 10 .

Para finalizar o problema, a corrente que percorre a resistência de 2Ω será igual a $I_{2\Omega} = I_a - I_b = 7,67 - 1,51 = 6,16 \text{ A}$. A corrente na resistência de 4Ω será igual a $I_{4\Omega} = I_b + I_c = 1,51 + 0,44 = 1,95 \text{ A}$, logo as potências nessas resistências podem ser calculadas como sendo iguais a $P_{2\Omega} = 2 \times 6,16^2 \cong 75,89 \text{ W}$ e $P_{4\Omega} = 4 \times 1,95^2 \cong 15,21 \text{ W}$.

Com esse exemplo o leitor pode verificar a utilização da regra de Cramer para resolver um sistema de três equações aplicado a um problema de circuitos CC. Existem outras metodologias de solução de sistemas com três ou mais equações. O método de Cramer foi escolhido por ser o mais generalista e o mais simples de ser executado. O leitor deve reparar que o método das correntes de malha aplicado a circuitos com mais de três malhas irá produzir sistemas de ordem superior, o que irá demandar sistemas de ordem superior a três.

Para uma complementação prática dos conceitos vistos neste método de solução de circuito, vamos seguir para mais uma prática de sala de aula.

PRÁTICAS NA SALA DE AULA

Material a ser utilizado

- Uma matriz de contatos
- Uma bateria de 9 V
- Dois resistores de 1 k Ω
- Um resistor de 330 Ω
- Fios AWG 23 ou 22 (os quais podem ser adquiridos de cabos de rede para internet ou de fios de telefone)
- Multímetro

Práticas experimentais e teóricas

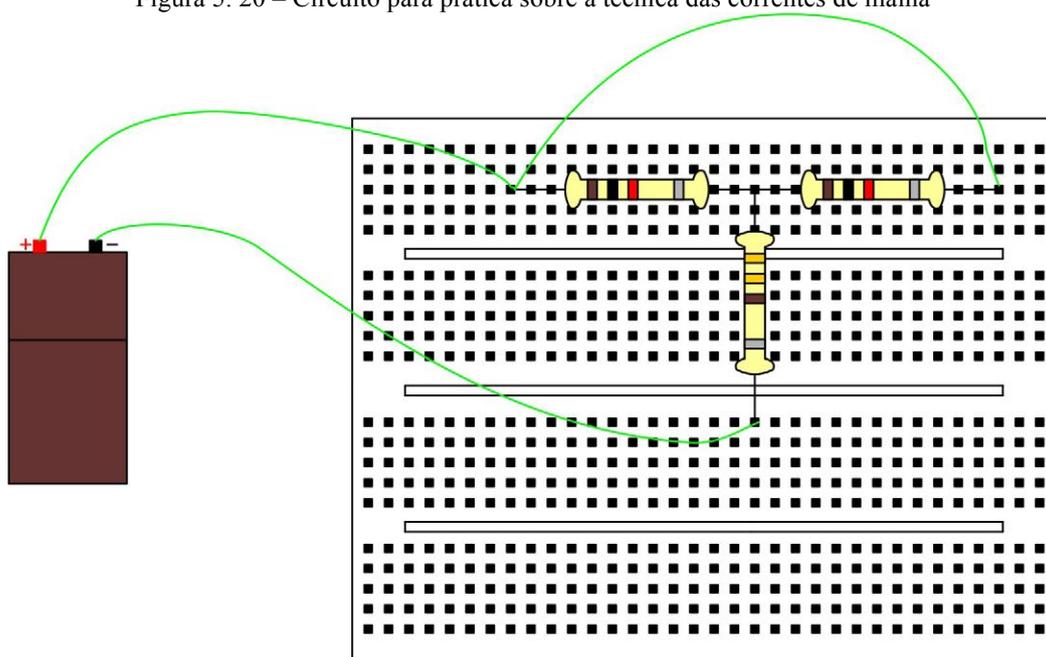
Monte o circuito da Figura 5.20; em seguida:

- a) efetue os cálculos teóricos para descobrir a potência dissipada no resistor de 330 Ω .
- b) utilize o multímetro e efetue a medição da tensão sobre os terminais dessa resistência bem como a corrente que a percorre.
- c) calcule o erro percentual entre o resultado que você obteve nos cálculos teóricos e nas medições com o multímetro.

Responda: Esse erro foi acima de 10%?

Costuma-se convencionar que, quando o erro entre os resultados teórico e experimental ultrapassa os 10%, existe a possibilidade de que um ou mais elementos do circuito tenha(m) um defeito.

Figura 5. 20 – Circuito para prática sobre a técnica das correntes de malha



5.5 Análise de circuitos pelo método das tensões nodais

Existem situações nas quais o método das correntes de malha deriva muitas equações, e a praticidade sempre foi um paradigma importante nas ciências tecnológicas. Diante disso, existe uma outra ferramenta de solução de circuitos usada em situações nas quais o número de equações possa ser reduzido. Esse método se baseia no número de ramos, aqui chamados de \mathbf{b} , e no número de nós, aqui chamados de \mathbf{n} . O número de equações independentes, obtidas pela lei de Kirchhoff para as correntes, é sempre igual a $\mathbf{n} - 1$. Já o número de equações de tensões necessárias, obtidas pela lei de Kirchhoff para as tensões, é sempre igual a $\mathbf{b} - (\mathbf{n} - 1)$. Assim como fizemos com o método das correntes de malha, iremos elencar os passos a serem aplicados para a solução de um circuito pelo método das tensões nodais. Tais passos são os seguintes:

- 1º passo** Identificar os nós essenciais do circuito.
- 2º passo** Desses nós essenciais selecionar um que seja o nó de referência.
- 3º passo** Para os nós essenciais que sobrarem, arbitrar que existem correntes saindo dos mesmos, tantas correntes quantos forem os ramos de circuito que componham aquele nó.
- 4º passo** Montar as equações das correntes e cada ramos aplicando a lei de Kirchhoff das correntes, usando a lei de Ohm das tensões. Isso implicará num sistemas de equações em função dos nós essenciais e do nó de referência (para todos os propósitos admita que a tensão do nó de referencia é de 0 volts).

Os passos descritos acima são melhor compreendidos quando aplicados a um exemplo real. Tomemos, mais uma vez, o circuito da Figura 5.16. Para executar o passo 1, é necessário identificar os nós essenciais do circuito. Veja definição de um nó essencial a seguir.

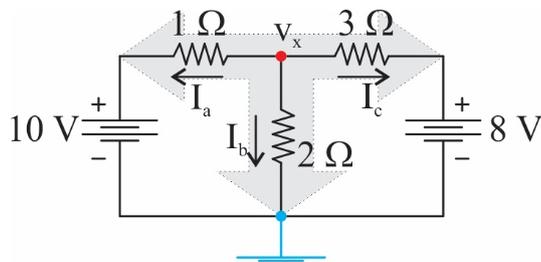
Um nó é chamado de essencial quando a ele estão conectados terminais de três ou mais elementos.

Quando aplicamos esse critério na figura supracitada, conseguimos identificar dois nós essenciais: um ao qual um dos terminais dos resistores de 1Ω , 2Ω e 3Ω está conectado e o outro no qual os terminais negativos das fontes de 10 V e 8 V estão conectados a um dos terminais do resistor de 2Ω . O passo 2 estabelece que devemos escolher o nó de referência. O nó de referência escolhido foi o segundo nó essencial do nosso circuito-exemplo – nesse caso, o nó no qual estão ligados os terminais negativos das fontes de alimentação e o segundo terminal do resistor de 2Ω . Para identificar que esse é o nó de referência, colocamos o símbolo de terra, destacado em azul. Para um melhor entendimento da aplicação dos passos necessários ao método de análise dos nós, verifique a Figura 5.21 do exemplo 5.7.

Exemplo 5.7

Seja o circuito da Figura 5.21, determine o valor das correntes I_a , I_b e I_c .

Figura 5.21 – Circuito com aplicação dos passos do método das tensões nodais

**Solução:**

Veja que o nó de referência também foi destacado em azul; o nó essencial que sobrou, e que não foi escolhido como nó de referência, foi destacado em vermelho. Notar que a aplicação do passo 3 foi executada junto ao nó v_x , e, como forma de destaque do arbítrio das correntes saindo desse nó, foram utilizadas três setas que sombreiam o sentido dessas correntes que saem desse nó, ou seja, as correntes I_a , I_b e I_c .

No passo 4, devem ser montadas as equações das correntes que saem das tensões nodais, lembrando que as equações dessas correntes devem ser armadas utilizando-se a lei de Ohm, com base na aplicação simultânea da lei de Kirchhoff para as correntes em cada nó. No nosso exemplo, restou aplicar este passo ao nó v_x . Vejamos, então, a aplicação do passo 4 para as correntes I_a , I_b e I_c .

$$I_a = \frac{v_x - 10}{1} \text{ A}$$

$$I_b = \frac{v_x}{2} \text{ A}$$

$$I_c = \frac{v_x - 8}{3} \text{ A}$$

Agora devemos aplicar a lei de Kirchhoff para as correntes ao nó v_x e, enfim, resolver a equação resultante para v_x , logo:

$$\frac{v_x - 10}{1} + \frac{v_x}{2} + \frac{v_x - 8}{3} = 0$$

Resolvendo para v_x , teremos:

$$\therefore 3v_x - 30 + 1,5v_x + v_x - 8 = 0$$

$$\therefore 5,5v_x - 38 = 0$$

$$\therefore v_x \cong 6,9091 \text{ V}$$

Quando o valor de v_x é substituído nas equações das correntes I_a , I_b e I_c , tem-se:

$$I_a = \frac{6,9091 - 10}{1} \cong -3,0910 \text{ A}$$

$$I_b = \frac{6,9091}{2} \cong 3,4545 \text{ A}$$

$$I_c = \frac{6,9091 - 8}{3} \cong -0,3636 \text{ A}$$

Os valores das correntes I_a e I_c foram negativos porque o sentido arbitrado para as correntes que saem do nó v_x não coincidiram com os sentidos reais. Observe, ainda, que os valores das correntes que foram obtidos com este método coincidem com os valores das correntes obtidos pelo método de solução de circuitos utilizando-se correntes de malha.

Outro aspecto importante é que, após a solução da tensão nodal v_x , obter as correntes do circuito foi mais simples. Assim, vê-se que a técnica das tensões nodais facilitou a obtenção das correntes e diminuiu o número de equações a ser resolvido. Essa observação é importante porque devemos escolher um método que diminua o número de equações.

Em tese, o método das tensões nodais diminui em uma equação a solução para um circuito de n malhas, ou seja, o método das tensões nodais pode resolver o circuito com $n - 1$ equações. Como nos casos anteriores, você será encorajado a colocar em prática os conhecimentos obtidos aqui por uma proposta de atividade em sala de aula.

PRÁTICAS NA SALA DE AULA

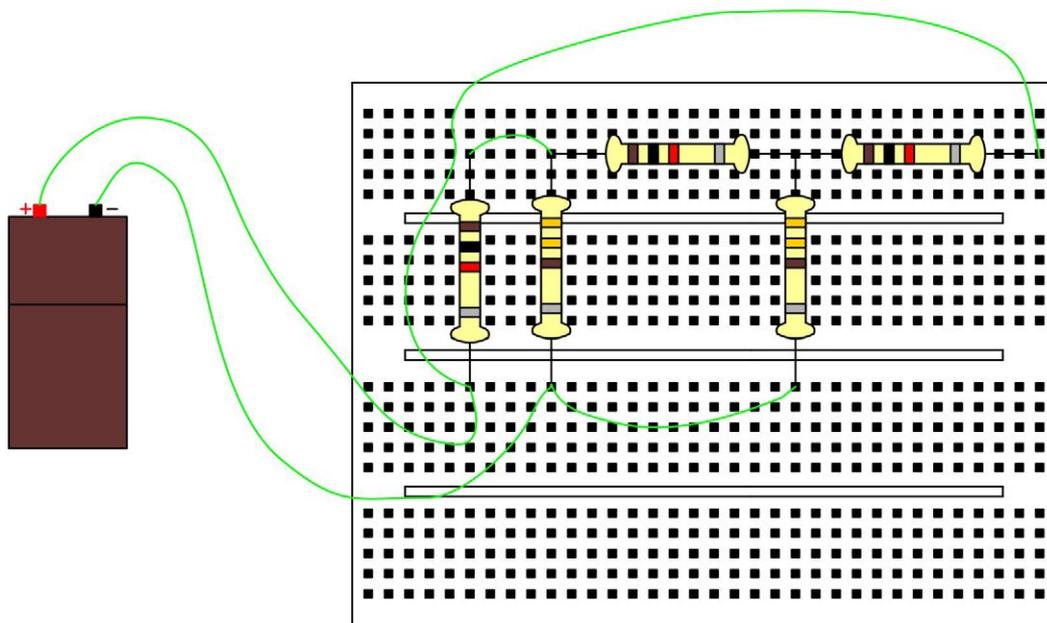
Material a ser utilizado

- Uma matriz de contatos
- Uma bateria de 9 V
- Três resistores de 1 kW
- Dois resistores de 330 W
- Fios AWG 23 ou 22 (os quais podem ser adquiridos de cabos de rede para internet ou de fios de telefone)
- Multímetro

Práticas experimentais e teóricas

Monte o circuito da Figura 5.22, em seguida utilize o método das tensões nodais para calcular as tensões dos nós essenciais e todas as correntes do circuito. Faça as medições das correntes que circulam pelos resistores de 1 kW e 330 W e compare com os resultados teóricos obtidos. tenha(m) um defeito.

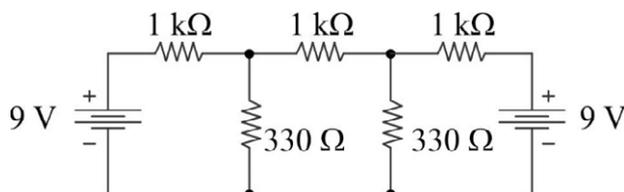
Figura 5.22 – Circuito para prática sobre o método das tensões nodais



Algumas vezes fica difícil entender o que estamos mostrando em termos de circuito nas montagens experimentais. Por este motivo, escolhemos esta prática um pouco mais elaborada, para expor a você, leitor, como relacionar um circuito elétrico a uma montagem física. Para um melhor acompanhamento das explicações a seguir, recorra à Figura 5.23.

Observe que, ao invés das duas fontes de 9 V, fizemos uma conexão do polo negativo da bateria no nó que une os dois resistores de 330 Ω e duas conexões do polo positivo da bateria nos terminais dos resistores de 1 k Ω . Atente, ainda, para o fato de que, tal como no circuito da montagem, existe uma resistência de 1 k Ω presente entre os resistores de 330 Ω . Perceba que, quando estamos fazendo uma montagem, estamos, na verdade, fazendo todas as conexões tal como no circuito representado pela simbologia dos elementos. Se o leitor sempre tiver isso em mente, as chances de erros em suas montagens serão bastante reduzidas.

Figura 5.23 – Circuito base utilizado para a prática sobre o método das tensões nodais



Como último comentário sobre a prática, o leitor irá observar que, se o circuito da Figura 5.23 fosse resolvido com o método das correntes de malha, seriam obtidas três equações correspondentes às três correntes de malha. Já com o método das tensões nodais, o mesmo circuito é resolvido com apenas duas equações, correspondentes às duas tensões nodais.

5.6 Métodos de simplificação de circuitos elétricos

Aplicar os métodos de solução de circuitos (correntes das malhas e tensões nodais) demanda um certo esforço por parte do quem faz a análise, pois pode haver complicadores – por exemplo, basta mudar um dos elementos ou ramos do circuito, para que seja necessária a aplicação sucessiva dos diversos passos discutidos anteriormente. Foi pensando neste fato que dois engenheiros eletricitas (Thèvenin e Norton) idealizaram procedimentos que simplificam a análise de circuitos elétricos.

É importante destacar que, de fato, existem situações nas quais um circuito com diversas malhas, ramos e elementos são analisados do ponto de vista de apenas dois terminais – em análise de sistemas de potência, por exemplo, a rede elétrica é subdividida em circuitos para a análise de tensões e correntes em pontos específicos desses sistemas. Essas análises são feitas tendo em vista que as cargas podem sofrer modificações do ponto de vista de dois terminais quaisquer.

Mais à frente, no texto, será discutida uma aplicação real dessa natureza; por ora serão introduzidos aqui os dois métodos de simplificação de circuitos. O domínio dos teoremas a seguir discutidos trará ao leitor a possibilidade de trabalhar em ferramentas utilizadas em diversas aplicações nos sistemas de eletrônica embarcada, eletrônica industrial, eletrônica de potência e em soluções de problemas diversos em aplicações com potências elevadas, tais como as fontes de geração de energia eólica e solar.

5.6.1 Teorema de Thèvenin

O teorema de Thèvenin foi um dos primeiros métodos desenvolvidos para a simplificação de circuitos elétricos. Em linhas gerais, Thèvenin estabeleceu que qualquer circuito linear pode ser simplificado do ponto de vista de dois terminais. Essa simplificação é feita por meio do cálculo de uma fonte de tensão equivalente em série com uma resistência (fonte e resistência de Thèvenin, respectivamente). Para esse teorema, alguns procedimentos são necessários. Vejamos quais são eles nos pontos abaixo, para calcular, respectivamente, a tensão e a resistência de Thèvenin.

- Esse passo é chamado de cálculo da tensão de circuito aberto e deve ser feito calculando-se a tensão de circuito aberto do ponto de vista dos terminais que se quer analisar;
- Após o passo anterior, devem-se ligar os terminais das fontes de tensão (um curto-circuito das fontes) e abrir as fontes de corrente; em seguida, calcular a resistência equivalente entre os dois terminais em análise.

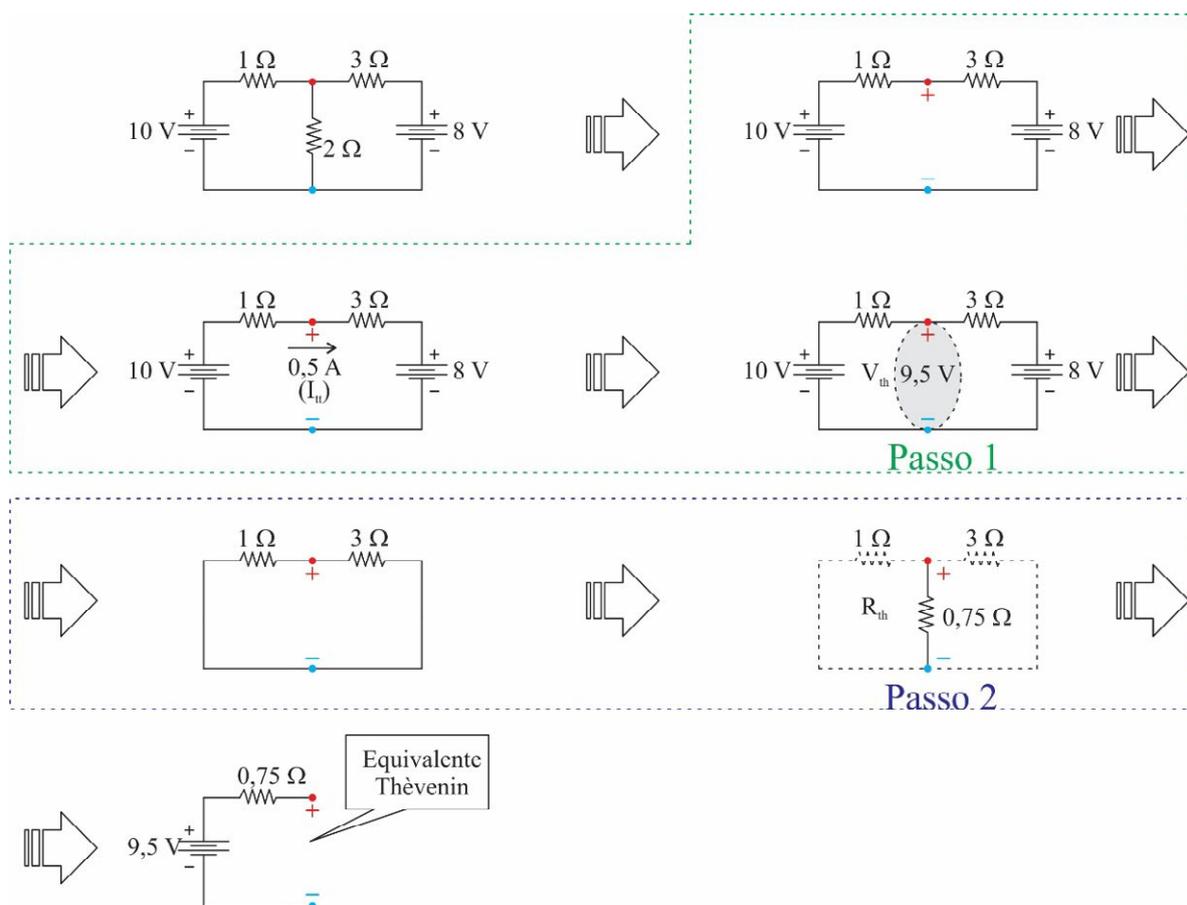
O teorema de Thèvenin é melhor compreendido a partir da sua aplicação a um circuito. Vejamos, então, como aplicá-lo em um circuito com duas malhas, como o da Figura 5.21, supondo-se, ainda, que os terminais em análise serão tomados como sendo os do resistor de $2\ \Omega$. A aplicação do primeiro passo indica que devemos calcular a tensão de circuito aberto do ponto de vista desses dois terminais. Ao fazer isso, veremos que temos um circuito simples em série, com duas fontes de tensão (a de 10 V e a de 8 V); o

posicionamento das duas fontes de tensão permite dizer que uma corrente circulará nesse circuito da fonte de 10 V para a fonte de 8 V. A resistência entre as duas fontes é o equivalente à série das resistências de 1 Ω e 3 Ω e, por meio da aplicação direta da lei de Ohm, veremos que a corrente que circulará entre as duas fontes supracitadas é de:

$$I_{tt} = \frac{10 - 8}{4} = 0,5 \text{ A}$$

Ao calcular a queda de tensão no resistor de 1 Ω , conectado em série com a fonte de 10 V, teremos a tensão no par de terminais em análise. De forma direta, teremos a seguinte tensão nesse par de terminais ($V_{th} = 10 - 0,5 = 9,5 \text{ V}$). Analogamente, após efetivar o curto-circuito dos terminais das fontes de tensão no circuito, a resistência de Thèvenin (R_{th}), do ponto de vista dos terminais em análise, será calculada pela associação do equivalente em paralelo das resistências de 1 Ω e 3 Ω . O passo a passo da aplicação do teorema de Thèvenin pode ser acompanhado na Figura 5.24.

Figura 5.24 – Passos executados na aplicação do teorema de Thèvenin, para simplificação de circuitos



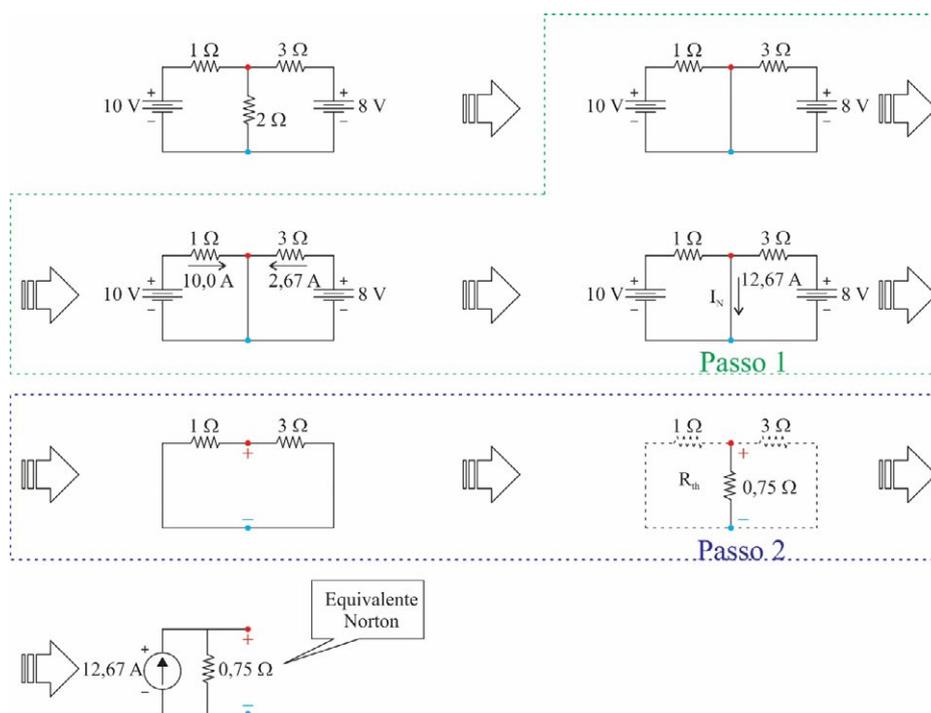
5.6.2 Teorema de Norton

O teorema de Norton foi desenvolvido levando-se em consideração uma análise complementar ao teorema de Thévenin, ou seja, a simplificação do circuito, a qual teria como objetivo a obtenção de uma fonte de corrente independente, em paralelo com uma resistência. O modelo de Thévenin e o modelo de Norton são configurações duais para representar o mesmo fenômeno. A fonte de corrente independente é a corrente de Norton (I_N) e a em paralelo com esta fonte de corrente é a resistência equivalente de Norton. Os passos para a aplicação do teorema em um circuito podem ser resumidos nos pontos abaixo:

- Efetivação do curto-circuito dos terminais em análise e realização do cálculo do valor da corrente de curto-circuito (I_N) do ponto de vista desse par de terminais. Usam-se, para isso, se for o caso, os métodos de solução de circuitos estudados anteriormente;
- Realização do cálculo da resistência de Norton, a partir do mesmo procedimento utilizado para a obtenção da resistência equivalente de Thévenin, ou seja, curto-circuito das fontes de tensão, abertura das fontes de corrente e, em seguida feita de cálculo do equivalente das resistências, vistas a partir do terminal em análise.

À semelhança do processo de entendimento do teorema anterior, veja que a aplicação do teorema de Norton implica a seleção dos terminais nos quais o circuito deve ser simplificado. Após a seleção, um curto-circuito deve ser implementado nesse par de terminais, para que a corrente de Norton (I_N) seja calculada. Veja, como exemplo, o mesmo circuito anterior, agora com os passos propostos para aplicação do teorema de Norton (ver Figura 5.25).

Figura 5.25 – Passos executados na aplicação do teorema de Norton, para simplificação de circuitos



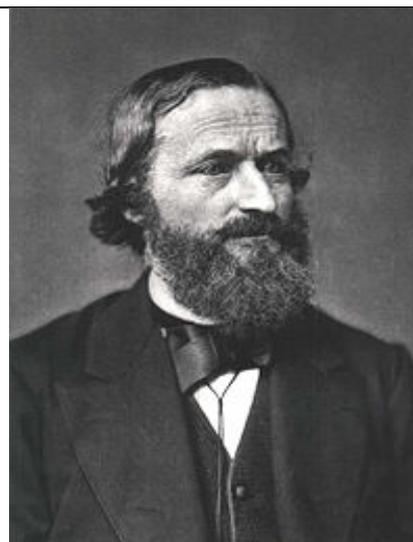
Os terminais em análise foram destacados com dois pontos em vermelho (acima) e azul (abaixo). Conforme dito no passo 1, é provocado um curto-circuito entre esses dois terminais, logo em seguida é calculada a corrente nesse curto. Observe no circuito da Figura 5.25 que a corrente de curto-circuito originou-se devido às contribuições individuais das fontes de tensão de 10 V e 8 V. Ao aplicar a lei dos nós ao nó destacado em vermelho, temos que a corrente de Norton $I_N = 12,67 \text{ A}$. O último passo, que é o passo 2, é executado para calcular a resistência equivalente vista dos dois terminais sob análise. Como as resistências de 1Ω e 3Ω estão associadas em paralelo do ponto de vista desses terminais, a resistência equivalente será $1 \times 3 / (1 + 3) = 0,75 \Omega$.

Um pouco de história

É importante conhecer um pouco dos precursores das técnicas de análise e de simplificação que discutimos até aqui. Mostrar ao leitor que toda teoria estudada neste livro é criação humana, feita por gente e para resolver problemas humanos, é também um dos objetivos deste livro.

Gustav Robert Kirchhoff (1824 – 1887)

Foi um físico alemão com contribuições em diversas áreas do saber, notadamente nas áreas dos circuitos elétricos, espectroscopia, emissão de radiação de corpos negros e na teoria da elasticidade. O curioso é que Kirchhoff estabeleceu as leis de circuitos estudadas nesse capítulo quando ainda era um estudante. Ganhou diversos prêmios acadêmicos durante a sua vida, seu legado extrapolou a análise de circuitos e foi muito além. Foi graças a Kirchhoff que se fundamentou um meio de analisar a composição das estrelas. Ele descobriu que no Sol existem os mesmos elementos que na Terra, porém em proporções diferentes. Na química, Kirchhoff deu a sua contribuição, descobrindo novos elementos químicos.



Léon Charles Thévenin (1857 – 1926)

Foi um engenheiro de telégrafos francês que estudou as leis de Ohm e sua correlação com a análise de circuitos complexos. O que motivou e direcionou seus estudos foi o problema que existia na análise de circuitos com vários nós e várias malhas. Ele se dedicou a entender qual a equivalência que um circuito completo poderia assumir ao ser reduzido a uma única fonte de tensão em série, com uma impedância. Seus trabalhos permitiram avanços significativos no campo do estudo de faltas em sistemas elétricos de grande porte.

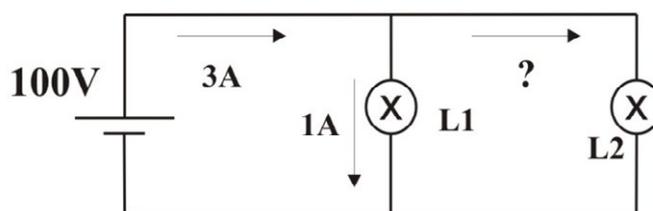


Exercícios propostos

5.1 Baseado no circuito que alimenta duas lâmpadas incandescentes da Figura 5.26, informe se as afirmativas são falsas (F) ou verdadeiras (V).

- A corrente da lâmpada 2 é 2 A. ()
- A potência da lâmpada 2 é 200 W. ()
- A tensão da lâmpada 1 é diferente da tensão da lâmpada 2. ()
- Se a lâmpada 1 queimar, a lâmpada 2 não funcionará. ()
- A potência fornecida pela fonte é 300 W. ()
- A resistência do filamento da lâmpada 2 é maior que a da lâmpada 1. ()

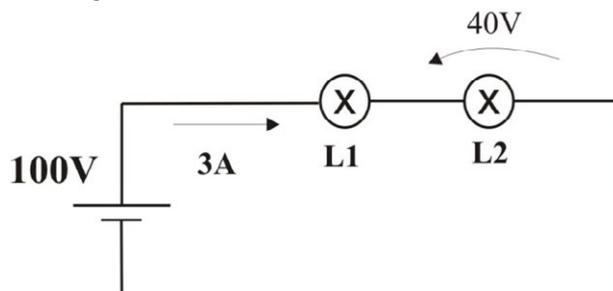
Figura 5.26 – Circuito referente ao exercício 5.1



5.2 Baseado no circuito com duas lâmpadas incandescentes em série da Figura 5.27, informe se as afirmativas são falsas (F) ou verdadeiras (V), se a tensão na lâmpada 2 é 40 V.

- As correntes que circulam pelas duas lâmpadas são diferentes. ()
- Se uma delas queimar (seu filamento romper), a outra continuará acesa. ()
- A potência que a fonte está fornecendo é de 300 W. ()
- A tensão na lâmpada 1 é 60 V. ()
- A potência consumida pela lâmpada 1 é de 180 W. ()
- A potência consumida pela lâmpada 2 é de 120 W. ()

Figura 5.27 – Circuito referente ao exercício 5.2



5.3 É comum, em veículos automotores, aeronaves e em alguns equipamentos, utilizar-se o polo negativo ligado à própria carcaça, criando uma referência única para todo o sistema. Obviamente que a carcaça deve ser condutora de eletricidade, na maioria dos casos metálica, e as conexões devem ser eficientes. Esta referência pode ser representada por um mesmo símbolo simplificando o circuito elétrico. Em algumas representações, é comum a utilização do símbolo terra para representar esta referência (Não se deve confundir, entretanto, esta referência com o “terra” dos sistemas elétricos). Utilizar a referência de polaridade negativa na carcaça dos veículos e equipamentos possui algumas vantagens:

I – Simplicidade quando se representa o circuito elétrico.

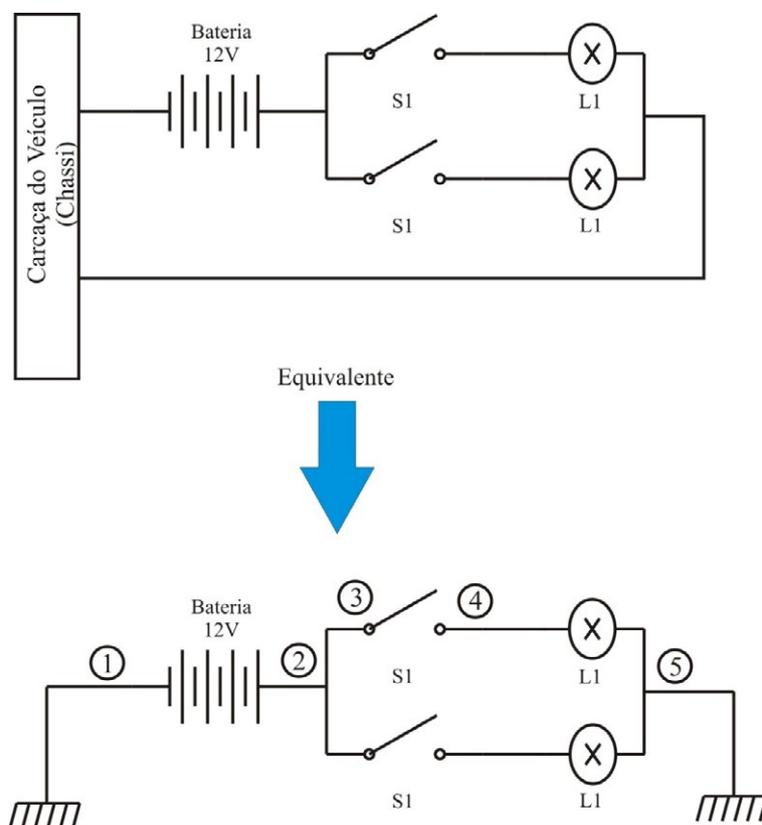
II – Economia de condutor elétrico.

III– Testes de tensão, com o objetivo de procurar defeitos, embora simples, posto que, basta ligar um terminal do voltímetro na carcaça e verificar a tensão, pontualmente, em relação à referência.

Admitindo-se todos os componentes da Figura 5.28 funcionando corretamente, responda:

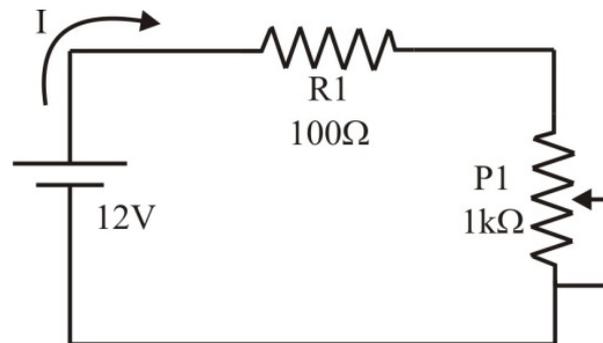
- Qual a tensão esperada, em relação à referência, dos pontos 1, 2 e 3?
- Qual a tensão esperada, em relação à referência, dos pontos 4 e 5, quando a chave está aberta?
- Qual a tensão esperada, em relação à referência, dos pontos 4 e 5, quando a chave está fechada?

Figura 5.28 – Circuito de alimentação de duas lâmpadas num veículo automotor



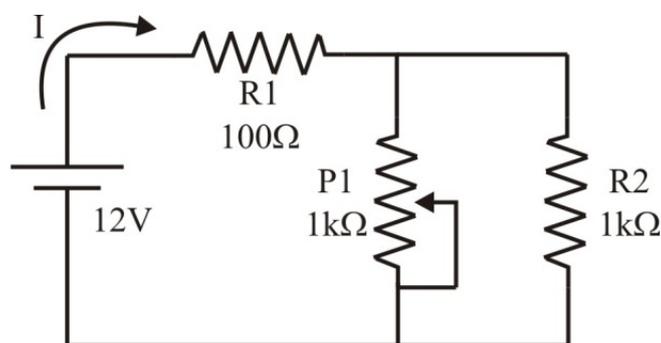
- 5.4 Seja um circuito de uma resistência de $100\ \Omega$, em série com um potenciômetro linear de $1\ \text{k}\Omega$, alimentado por uma fonte de corrente contínua de $12\ \text{V}$, conforme visto na Figura 5.29, qual a máxima e mínima resistências equivalentes em contato com os terminais da fonte? Elabore um gráfico de I versus Resistência equivalente.

Figura 5.29 – Circuito com potenciômetro 1



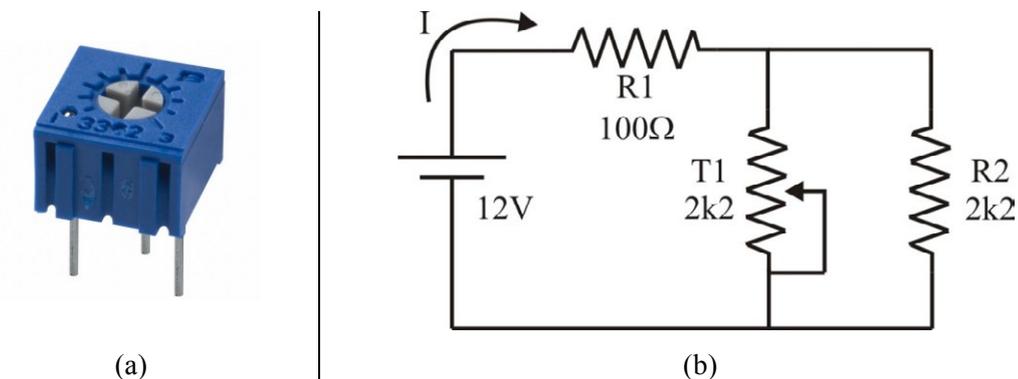
- 5.5 Seja um circuito de uma resistência de $100\ \Omega$, em série com um potenciômetro linear de $1\ \text{k}\Omega$, que, por sua vez, possui uma resistência em paralelo de $1\ \text{k}\Omega$, alimentado por uma fonte de corrente contínua de $12\ \text{V}$, conforme ilustrado na Figura 5.30, qual a máxima e mínima resistências equivalentes em contato com os terminais da fonte? Elabore um gráfico de I versus Resistência equivalente.

Figura 5.30 – Circuito com potenciômetro 2



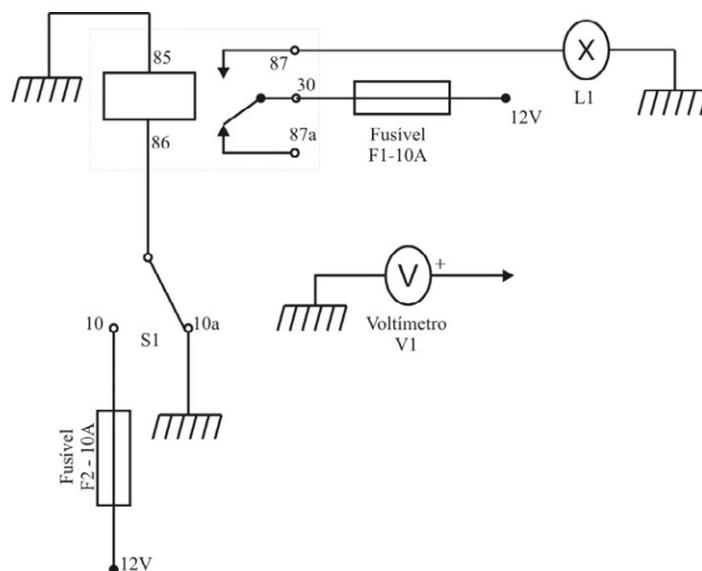
- 5.6 Uma categoria de potenciômetro muito comum nos circuitos eletrônicos são os “trimpots” – representado na Figura 5.31 (a) –, cujo nome é uma composição das palavras inglesas *Trimmer potentiometer*. Os trimpots são potenciômetros de pequeno porte a que o usuário final dos equipamentos não possui acesso. Em outras palavras, o trimpot é ajustado pelo montador do circuito, com auxílio de uma chave de fenda, para que o circuito alcance determinado ponto de operação. Depois desse ajuste não se varia mais sua posição. No circuito apresentado na Figura 5.31 (b), vê-se um trimpot de $2200\ \Omega$ em paralelo com uma resistência de também $2200\ \Omega$, ambos em série com uma resistência de $100\ \Omega$. A partir dessas informações e das imagens das figuras citadas, responda: Quais os limites da corrente na fonte? Qual o valor que deve ser ajustado à resistência do trimpot para a corrente na fonte ser $15\ \text{mA}$?

Figura 5.31 – (a) Trimpot comercial; (b) circuito com trimpot



- 5.7 O circuito apresentado pela Figura 5.32 é comum em muitos veículos automotivos, para acionamento de faróis, lâmpadas sinalizadoras. De acordo com a imagem da figura em referência, a lâmpada L1 não está ligando, o que pode ser um defeito nos fusíveis, no relé ou na própria lâmpada. Descreva um procedimento para testar cada componente utilizando o voltímetro V1.

Figura 5.32 – Circuito para acionamento de faróis em veículos automotivos.

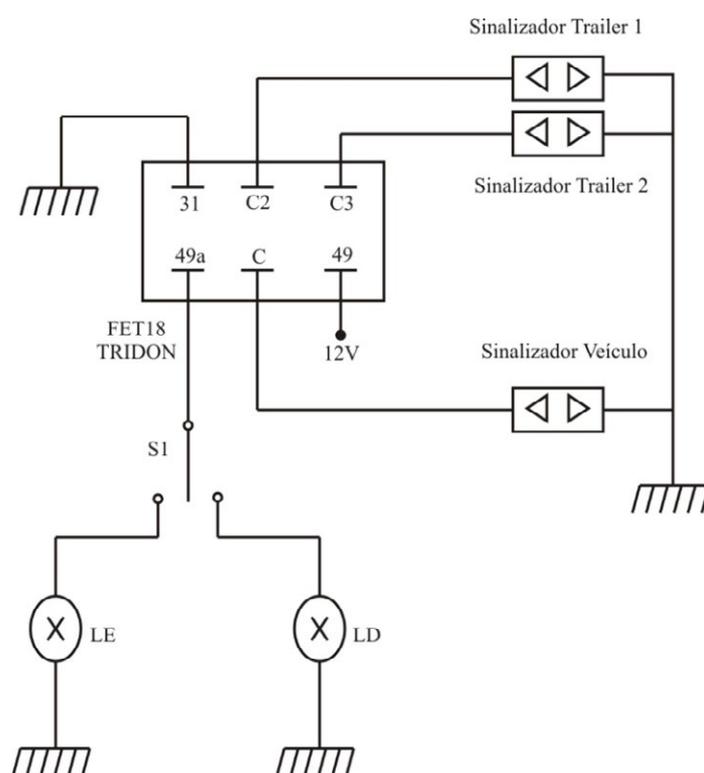


- Para testar F1.
- Para testar F2.
- Para testar o relé.
- Para testar a lâmpada.

5.8 Relés Flasher (relés de interrupção periódica) são relés para interrupção periódica da corrente de lâmpadas, especificamente de sinalização. São muito comuns em veículos automotores para acionamento de pisca alerta ou sinalização de mudança de direção. Os relés Flashers podem ser do tipo térmico (utilizando bimetálicos), eletromecânico e eletrônico. Tanto os flashers térmicos quanto os eletromecânicos não são mais utilizados em veículos desde a década de 1980. Hoje, os veículos empregam o tipo eletrônico por serem mais baratos, mais confiáveis e de menores perdas. Na Figura 5.33, é mostrado um circuito típico do Flasher FET18 da TRIDON. Observe que esse relé é sensível à carga, em outras palavras, reconhece a lâmpada esquerda ou direita presente no circuito para começar a piscar. Elabore um plano para testar este relé no veículo, com ajuda de um voltímetro.

- Para testar os terminais de alimentação 31 e 49.
- Para testar as saídas C, C2, C3 e 49a.

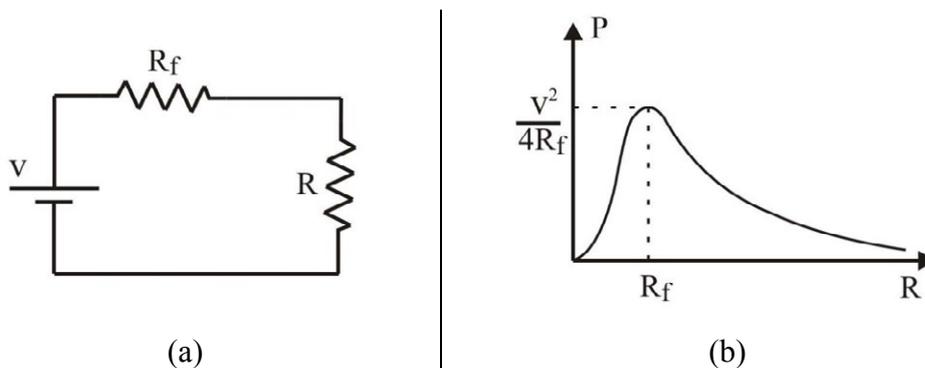
Figura 5.33 – Circuito típico do Flasher FET18 da TRIDON



5.9 A máxima transferência de potência entre uma fonte e uma carga é fundamental em muitas aplicações, tais como na transmissão de energia, na telefonia celular, nos roteadores, etc. Seja o circuito da Figura 5.34 (a), que consiste numa fonte de tensão contínua com uma resistência interna R_f , para que valor de carga R há a máxima transferência da potência por parte da fonte V ? A potência na carga é determinada a partir da corrente do circuito, veja expressão (5.38), aplicação direta da lei de Ohm. A potência na carga é conseguida com a substituição da corrente na expressão da lei de

Joule (5.39). Quando se determina o gráfico da potência dissipada na carga em função da carga R , temos o gráfico mostrado na Figura 5.34 (b). Observa-se que a máxima transferência de potência da fonte para a carga se dá quando a carga é igual à resistência interna da fonte – em outras palavras, $R = R_f$.

Figura 5.34 – (a) Circuito referente ao problema 5.9; (b) potência em função da resistência R

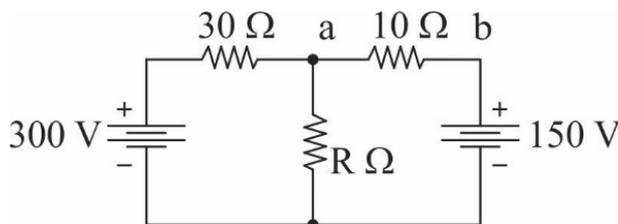


$$i = \frac{V}{R_f + R} \tag{5.38}$$

$$P = Ri^2 = \frac{RV^2}{(R_f + R)^2} \tag{5.39}$$

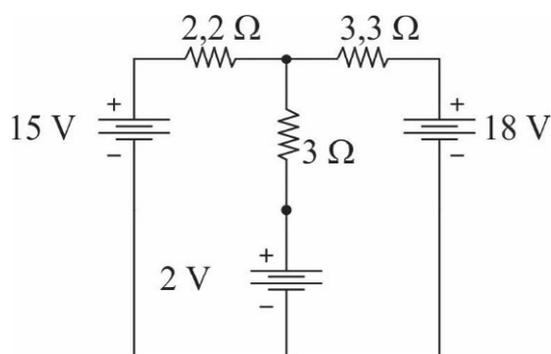
- 5.10 Um circuito paralelo é composto de três resistências: uma de 10 kΩ, outra de 820 kΩ e a terceira delas de 33 kΩ. A corrente que percorre a resistência de 33 kΩ é de 0,152 mA. Determine a potência total fornecida pela fonte de alimentação ao circuito paralelo.
- 5.11 Um resistor de 4,7 kΩ possui uma tolerância de 10% bem como uma potência nominal de 0,25 W. Quais os valores máximos e mínimos da tensão que pode ser conectada aos terminais do resistor?
- 5.12 No circuito da Figura 5.35, a tensão do nó principal é de 160,71 V. Determine o valor da resistência desconhecida R .

Figura 5.35 – Circuito para o exercício 5.12



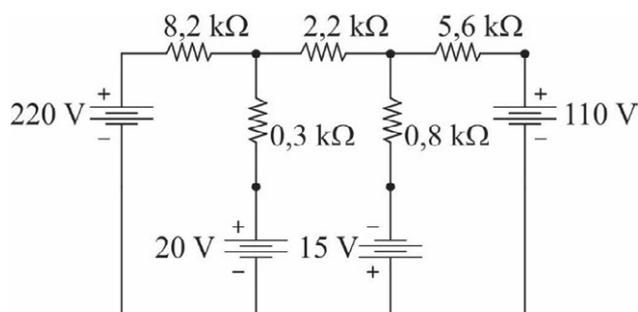
- 5.13** Utilizando o valor da resistência que você descobriu no exercício 5.10, determine a potência fornecida a essa resistência pelo circuito.
- 5.14** Ainda utilizando o circuito do exercício 5.10, suponha agora que o valor da resistência R seja de 90Ω . Determine o circuito equivalente de Thévenin, do ponto de vista dos terminais a e b assinalados na Figura 5.35.
- 5.15** Substituindo a resistência R da Figura 5.35 por uma de $22,5 \Omega$ e curto-circuitando a fonte de alimentação de 150 V , determine o valor da potência fornecida pela fonte de 300 V a todas as resistências que compõem o circuito.
- 5.16** No circuito da Figura 3.36 a seguir, determine todas as correntes que percorrem os elementos que o compõem.

Figura 5.36 – Circuito referente ao exercício 5.16



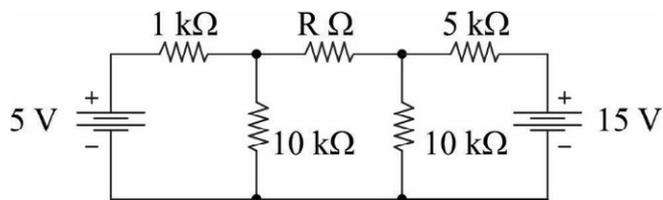
- 5.17** Ainda considerando o circuito da Figura 5.36, determine a potência demandada pela resistência de 3Ω .
- 5.18** Para o circuito da Figura 5.37, determine o sentido e a intensidade de todas as correntes de todos os elementos que compõem o circuito.

Figura 5.37 – Circuito referente ao problema 5.18



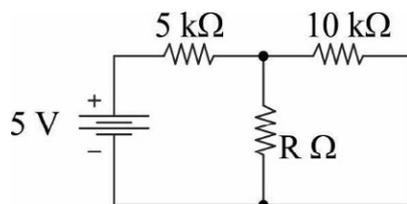
5.19 No circuito da Figura 5.38, substitua a resistência R por 1 kΩ, 5 kΩ e 10 kΩ, calculando e medindo, em cada substituição, a tensão sobre os terminais das resistências.

Figura 5.38 – Circuito referente ao problema 5.19



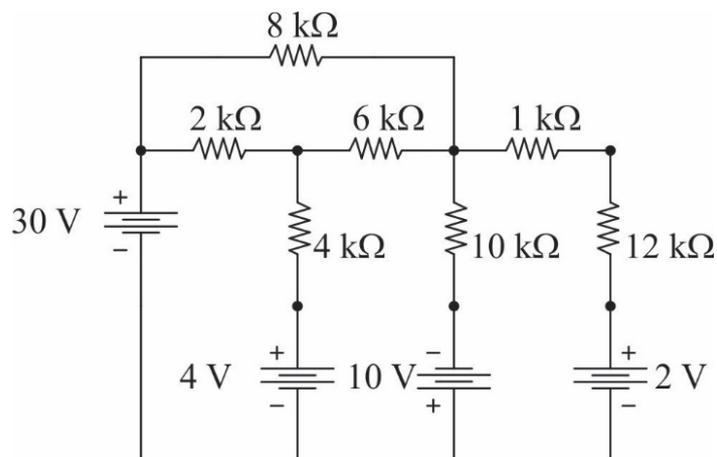
5.20 No circuito da Figura 5.39, calcule qual é a tensão esperada ao se conectarem as seguintes resistências no lugar da resistência genérica R: 33 kΩ, 1 kΩ e 47 kΩ.

Figura 5.39 – Circuito referente ao problema 5.20



5.21 Seja o circuito da Figura 5.40, determine as potências das fontes de 30 V e 4 V.

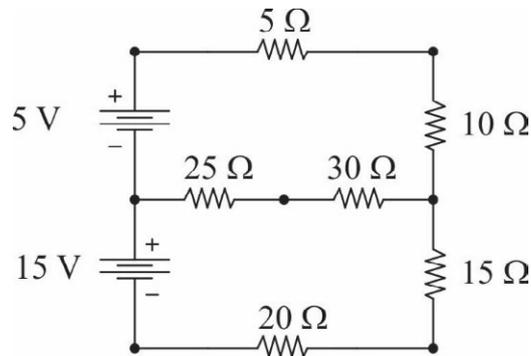
Figura 5.40 – Circuito para o problema 5.21



5.22 Um estudante do curso técnico em eletrotécnica propôs um desafio aos seus colegas. Observando o circuito da Figura 5.40, ele afirmou que, ao substituir a resistência de 2 kΩ pelas resistências de 10 kΩ e 15 kΩ, as tensões medidas nessas resistências seriam, respectivamente, 0,81 V e 0,76 V. A afirmação do aluno estava correta? Prove.

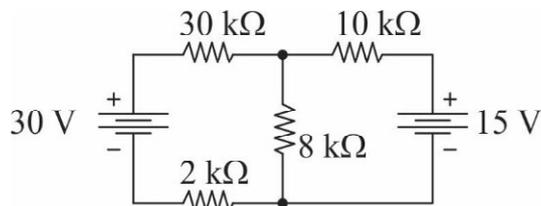
- 5.23** Determine o circuito equivalente de Thèvenin do ponto de vista dos terminais da resistência de $30\ \Omega$, com base na Figura 5.41. Em seguida, calcule qual será o valor da tensão estabelecido nos terminais de uma resistência de $10\ \Omega$ que seja conectada ao circuito no lugar do resistor de $5\ \Omega$.

Figura 5.41 – Circuito referente ao exercício 5.23



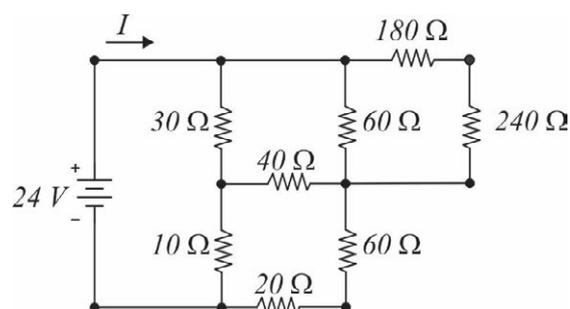
- 5.24** Seja o circuito da Figura 5.42, determine a potência fornecida pela fonte de 30 V .

Figura 5.42 – Exercício referente ao exercício 5.24



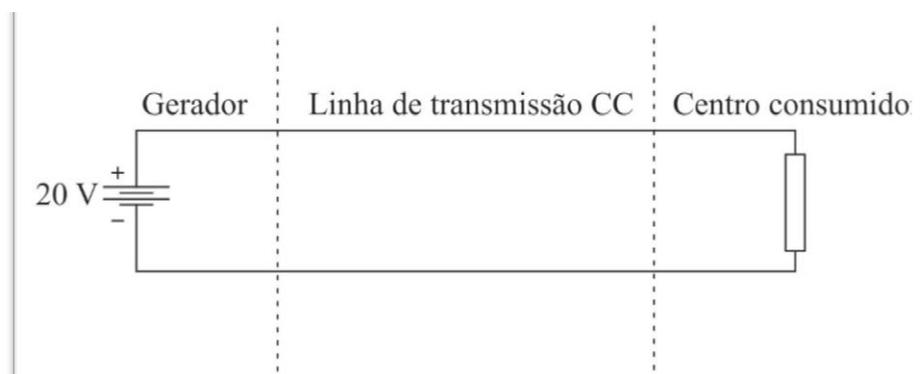
- 5.25** Considere ainda o circuito da Figura 5.40, determine a potência de cada uma das resistências que compõem o circuito.
- 5.26** Ainda considerando o circuito da Figura 5.42 faça o balanço de energia, ou seja, verifique se as potências consumidas pelas resistências correspondem às potências fornecidas pelas fontes de alimentação.
- 5.27** No circuito da Figura 5.43, calcule o valor da corrente I .

Figura 5.43 – Circuito referente ao problema 5.27



- 5.28** Considere ainda o circuito da Figura 5.43, determine o valor da potência dissipada na resistência de 240 Ω .
- 5.29** Os sistemas de transmissão em corrente contínua figuravam entre as possibilidades para a transmissão de energia no início do século XX. Naquela época, os geradores em corrente contínua forneciam tensões de aproximadamente 120 V em seus terminais. Os sistemas de transmissão de correntes alternadas – correntes CA objeto de estudos do Capítulo 6 – possuem linhas de transmissão quilométricas. Para uma melhor exemplificação, verifique a Figura 5.44.

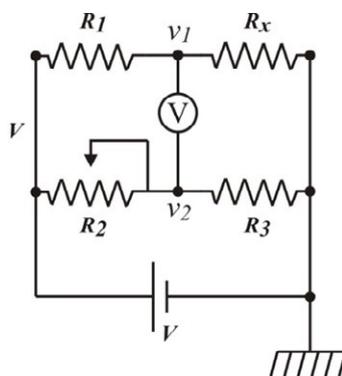
Figura 5.44 – Sistema de transmissão CC



Admitindo que o cobre possua uma resistividade de $\rho = 1,72 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$ e que a resistência de uma linha de transmissão necessariamente deverá ter, no máximo, 0,005 Ω , determine o valor do diâmetro dos condutores dipolares que deverão fazer parte do sistema de transmissão CC, sabendo que a linha deve ter 22 km de comprimento.

- 5.30** Determine a forma matricial das equações das tensões nodais para os dois nós, v_1 e v_2 , da ponte de Weathstone, mostrada na Figura 5.45.

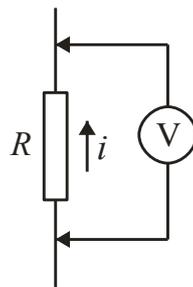
Figura 5.45 – Ponte de Weathstone



- 5.31** Um secador de cabelo é composto, na verdade, por um conjunto de três resistências, sendo cada uma dedicada a uma determinada intensidade de calor que é configurada no aparelho. Suponha que um determinado secador comercial possa ser admitido como estando sendo alimentado por uma fonte de tensão CC de 220 V. Para a posição 1, a

que gera a menor quantidade de calor, há uma resistência com capacidade de dissipação de potência de 250 W. Na posição 2, responsável por gerar uma dissipação média de calor do aparelho, possui uma resistência de 500 W e, finalmente, a que gera a maior quantidade de calor possui uma resistência que consegue dissipar 1000 W. Nos três casos, faça um esboço de como seria o circuito do secador bem como os valores de cada uma das resistências responsáveis pelas três intensidades de calor do secador.

- 5.32** Os pequenos motores de corrente contínua, utilizados em carrinhos de controle remoto, possuem uma resistência interna de, aproximadamente, $7,5 \Omega$. Admita que um pequeno motor CC será alimentado com duas pilhas de 1,5 V, associadas em série. Isto posto, desenhe o circuito representativo das pilhas alimentando o referido motor. Em seguida, calcule o valor da corrente que circula no circuito, tendo em vista a resistência interna do motor.
- 5.33** Com base na lei de Ohm, marque a alternativa correta, em cada série (a, b, c), determinando o que se pede a respeito do circuito a seguir apresentado:



- a) Se $R = 2 \Omega$ e a corrente $i = 5 \text{ A}$, a tensão medida no voltímetro é
 zero V 2 V 5 V 10 V NRA
- b) Se $i = 2 \text{ A}$ e a tensão lida no voltímetro é 5 V, a resistência R é
 $2/5 \Omega$ $5/2 \Omega$ 10 Ω 7 Ω NRA
- c) Se $R = 3 \Omega$ e o voltímetro mede $V = 10 \text{ V}$, logo a corrente é
 30 A $3/10 \text{ A}$ 13 A 7 A NRA
- 5.34** Ainda sobre o circuito da questão anterior, determine o que se pede:
- a) Se $R = 2 \Omega$ e a corrente $i = 5 \text{ A}$, a potência dissipada no resistor é
 zero W 10 W 20 W 50 W NRA
- b) Se $i = 2 \text{ A}$ e a tensão lida no voltímetro é 5 V, a potência dissipada no resistor é
 zero W 10 W 20 W 50 W NRA
- c) Se $R = 3 \Omega$ e o voltímetro mede $V = 10 \text{ V}$, a potência dissipada no resistor é
 zero W 10 W 20 W 50 W NRA

Referências

ALEXANDER, Charles K.; SADIKU, Matthew N. O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. Porto Alegre: McGraw Hill, 2013.

DORF, Richard C.; SVOBODA, James A. **Introdução aos Circuitos Elétricos**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2012.

GUSSOW, Milton. **Eletricidade Básica**. Porto Alegre: Bookman, 2009. (Coleção Schaum).

MENDES, P. J. **Fundamentos de Eletrotécnica**. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2012.

NAHVI, Mahmood; EDMINISTER, Josheph A. **Circuitos Elétricos**. Porto Alegre: Bookman, 2014. (Coleção Schaum).

NILSSON, James W.; RIEDEL, Susan A. **Circuitos Elétricos**. São Paulo: Pearson, 2009.

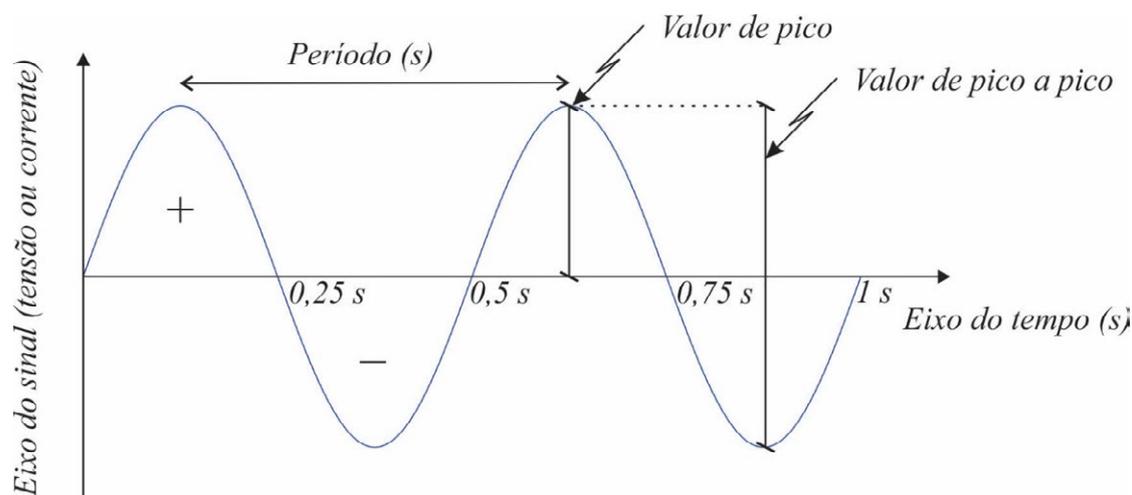
6 Circuitos elétricos de corrente alternada

Vimos no capítulo anterior os métodos utilizados na análise de circuitos alimentados por fontes de tensão contínua. O leitor deve ter observado que a análise se restringiu a circuitos nos quais só existiam fontes de tensão e resistores, todavia as tomadas de energia das nossas residências não fornecem tensões contínuas. Elas fornecem tensões *alternadas*. A definição mais simples do que vem a ser uma fonte de tensão pode ser vista a seguir:

Uma fonte de tensão alternada é aquela fonte cujo valor de tensão em seus terminais varia periodicamente no decorrer do tempo.

As fontes de tensão alternadas também são chamadas de fontes de tensão *AC* (do inglês *Alternating Current*) ou *CA* (corrente alternada). Na Figura 6.1, apresentamos um sinal alternado com algumas definições importantes, as quais serão explicadas logo em seguida.

Figura 6.1 – Sinal alternado



Antes de começar as explicações dos conceitos destacados na Figura 6.1, convém informar o que significam os sinais de “+” e de “-” na referida figura. O sinal de “+” representa o semiciclo positivo, ou seja, aquele conjunto de valores do sinal que são – todos – maiores ou iguais a zero e acima do eixo do tempo. O sinal de “-” representa o semiciclo negativo, ou seja, aquele conjunto de pontos do sinal que estão – todos – abaixo do eixo do tempo ou que possuem valor menor ou igual a zero. Convém um breve comentário sobre a distinção entre *período* e *frequência*. Diz-se do período um dado intervalo de tempo, necessário (ou suficiente), para que todos os valores do sinal CA ocorram apenas uma vez. Quanto à frequência, esta indica a quantidade de períodos que cabem em apenas um segundo de tempo. Se chamarmos o período de T , então a frequência f_{fr} vale $f_{fr} = 1/T$.

Na Figura 6.1 atente para um detalhe: o período está indicado entre dois “picos” do sinal; veja, ainda, que esses dois picos possuem o mesmo valor numérico (observe com atenção o eixo do sinal) e que, no caso específico dessa figura, o período equivale a 0,5 segundos. O **valor de pico** representa os valores máximos ou mínimos – na nossa Figura 6.1, esse valor foi apontado como sendo o máximo. Já o **valor de pico a pico** representa a diferença entre dois valores de pico; assim, se o valor de pico do sinal no semiciclo positivo for de “+100” e o valor de pico do sinal no semiciclo negativo for de “-100”, é fácil entender que o valor de pico será $100 - (-100) = 200$. Um sinal de tensão ou corrente CA também pode ser representado matematicamente (no caso da Figura 6.1 a representação do sinal genérico CA se deu no tempo, na forma de um gráfico). Independentemente do sinal, se de tensão ou de corrente, a representação genérica na forma de equação é tal como mostrada na expressão (6.1).

$$f(t) = A \times \text{sen}(\omega t + \varphi) \quad (6.1)$$

Nesta expressão (6.1), **A** é o valor da **amplitude** do sinal (seja de tensão ou corrente, não importa), ω é o valor da **frequência angular** (ou seja, vale $\omega = 2\pi f$ com f sendo igual à frequência do sinal e t representando o tempo transcorrido do sinal em segundos) e φ é o valor do **ângulo de fase**. Uma vez estabelecidos esses conceitos iniciais, podemos avançar para as análises CA, propriamente ditas, nos elementos básicos de circuitos, ou seja, resistor, indutor e capacitor.

Além do exposto sobre fontes de alimentação senoidais, convém estabelecermos o que é valor **RMS**. Este nada mais é do que o **valor médio quadrático** (do inglês *Root Mean Square*) ou, em termos matemáticos, é igual valor de pico da grandeza (tensão ou corrente), dividido por raiz quadrada de dois. Veja a aplicação do conceito a um sinal de tensão e a um sinal de corrente nas expressões (6.2) e (6.3).

$$v_{RMS} = \frac{v_p}{\sqrt{2}} \quad (6.2)$$

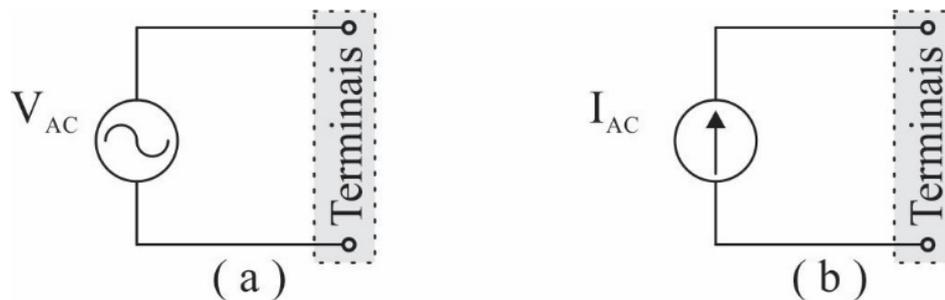
$$i_{RMS} = \frac{i_p}{\sqrt{2}} \quad (6.3)$$

Entendemos que o conhecimento desse conceito é algo de grande valor para seu trabalho como técnico dessa área, uma vez que os equipamentos elétricos que são conectados à rede elétrica das nossas casas, dos estabelecimentos comerciais e das indústrias possuem os seus valores de tensão e corrente expressos em valores **RMS**. Por exemplo, a tensão de sua geladeira, micro-ondas ou TV é expressa em um valor **RMS**. Perceba também que isso implica dizer que, se a tensão de sua TV for 220 V **RMS**, na verdade, você estará diante de um equipamento que suporta um valor de pico de tensão de aproximadamente $220 \times \sqrt{2} \cong 311$ V.

6.1 Simbologia das fontes em corrente alternada

Todos os elementos de circuitos possuem uma simbologia própria que os caracteriza; essa simbologia permite que o profissional identifique imediatamente se está lidando com uma fonte de tensão CA ou com uma fonte de corrente CA. Abaixo, na Figura 6.2, estão ilustradas as simbologias de uma fonte de tensão e de uma corrente CA, ambas independentes. Para mais detalhes das simbologias utilizadas neste livro, o leitor pode recorrer ao Anexo 1 – Símbolos elétricos utilizados no escopo deste livro.

Figura 6.2 – Simbologias das fontes CA: (a) fonte de tensão CA; (b) fonte de corrente CA

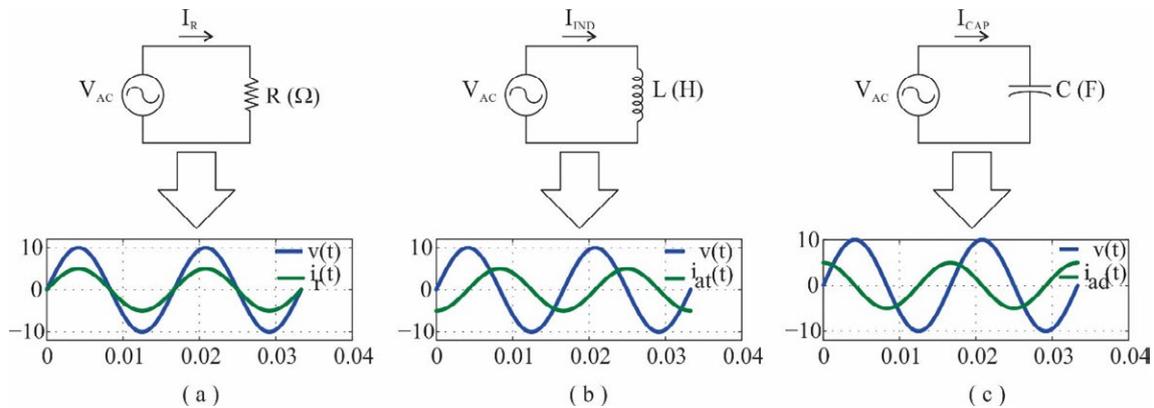


Uma fonte de tensão independente CA deve manter um valor de tensão fixo em seus terminais, independentemente do valor de corrente que circula entre eles. Já uma fonte de corrente independente CA, esta deve manter um valor fixo de corrente circulando em seus terminais, independentemente do valor de tensão ali presente. Existem fontes de tensão e de corrente CA *dependentes*, as quais estão fora do escopo deste livro. As fontes de corrente independentes, embora tenham figurado na explicação acima, não serão abordadas no decorrer do texto a seguir, pelo fato de envolver assuntos fora do nosso objeto de interesse. As simbologias adotadas para os elementos passivos permanecem as mesmas, ou seja, aquelas simbologias atribuídas a resistores, indutores e capacitores são as já estudadas em capítulos anteriores.

6.2 Grandezas em corrente alternada em elementos de circuitos e relações de fase

O propósito desta seção é o de estudar o comportamento da tensão e da corrente CA em circuitos com elementos básicos. Para um melhor entendimento do assunto, vamos começar observando a Figura 6.3 a seguir.

Figura 6.3 – Relações de tensões e correntes nos elementos básicos de circuitos:
(a) circuito resistivo; (b) circuito indutivo; (c) circuito capacitivo

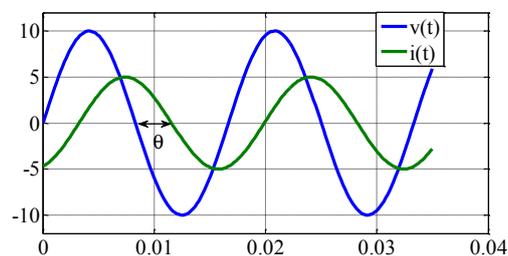


Vamos começar a análise pelo circuito puramente resistivo da Figura 6.3 (a). Observe que as passagens da tensão e corrente por zero, pelos valores máximos e pelos valores mínimos ocorrem sempre ao mesmo tempo, caracterizando, portanto, que **a tensão e a corrente em um circuito puramente resistivo estão em fase**. Em um circuito puramente indutivo (Figura 6.3 (b)), o comportamento da tensão e da corrente mudam – observe que a tensão sempre passa pelos zeros, pelos máximos e pelos mínimos antes da corrente; desse modo, dizemos que **em um circuito puramente indutivo, a corrente está atrasada em relação à tensão**. Quando, entretanto, se trata de um circuito puramente capacitivo (Figura 6.3 (c)), a corrente passa pelos zeros, máximos e mínimos **antes** da tensão; desse modo, dizemos que, **em um circuito puramente capacitivo, a corrente está adiantada em relação à tensão**. Feitas essas discussões, vale um primeiro comentário sobre relações de fase:

Relações de fase especificam quanto tensões e correntes estão adiantadas ou atrasadas entre si – essas defasagens são relacionadas a ângulos de fase.

Outra forma de visualizar de forma mais clara o que foi discutido anteriormente no texto é o que se representa na Figura 6.4 a seguir.

Figura 6.4 – Relação de fase entre sinais senoidais



Observe que θ indica o distanciamento entre os sinais de tensão e corrente – a representação do sinal de tensão está em azul com legenda $v(t)$, enquanto que a representação do sinal de corrente está em verde e com legenda $i(t)$. A este distanciamento chamamos de **defasagem**. Se θ for zero, recairemos no caso do circuito resistivo. Se θ for diferente de zero, estaremos diante de um circuito indutivo ou capacitivo. O valor de θ também é medido em graus ou em radianos.

Uma dúvida que começa a surgir agora é como será o comportamento de tensões e correntes em circuitos com combinações de elementos, por exemplo, em circuitos com resistores e indutores ou em circuitos com resistores e capacitores. Adiante iremos perceber que a análise contida na Figura 6.3 é a base para o entendimento desse comportamento. Outra dúvida que pode começar a surgir é sobre a representação do comportamento das defasagens entre tensões e correntes – seria muito inconveniente ter de desenhar os circuitos e suas características de tensão e corrente todas as vezes que as análises das defasagens fossem necessárias. Enquanto você pensa nisso, iremos abordar outras características essenciais desses circuitos CA, para que as questões levantadas aqui sejam retomadas.

6.3 Lei de Ohm em circuitos em corrente alternada e conceito de impedância

Quando trabalhamos na análise de circuitos CC, fomos apresentados às diversas leis, uma delas foi a lei de Ohm (ver Capítulo 5). Em análise de CA, informamos que a lei de Ohm é aplicada integralmente; agora precisamos apresentar a dependência dos elementos elétricos com a frequência. Vamos analisar resistores, indutores e capacitores nas suas relações com a frequência.

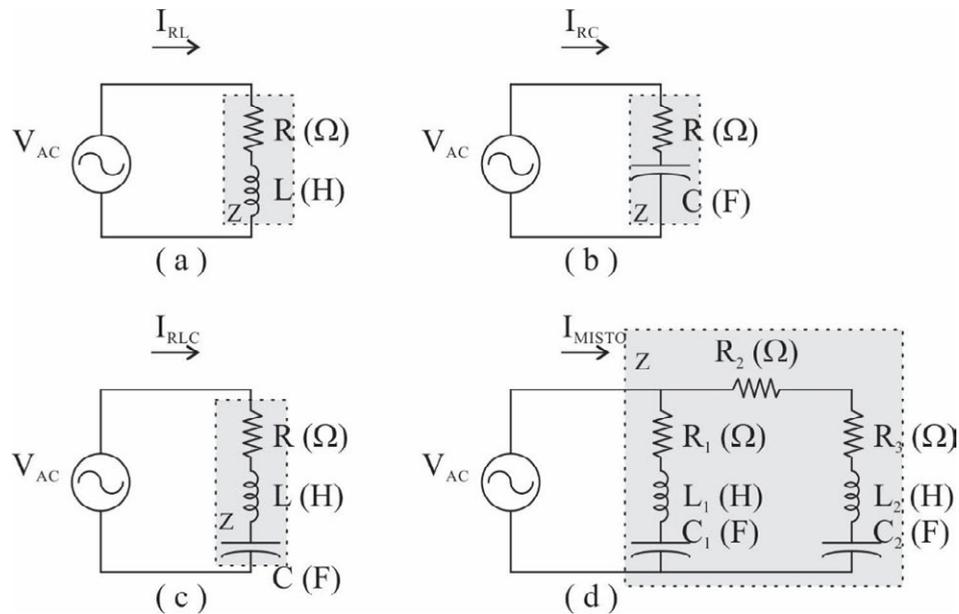
6.3.1 Impedância

Recorde o Capítulo 3, quando estudamos que a resistência representa a dificuldade da passagem de corrente elétrica por um condutor em um circuito CC. Recorde também que a corrente elétrica é formada por elétrons livres e, quando esses elétrons livres se chocam com elétrons não livres da eletrosfera de diversos átomos do condutor, estamos diante da origem da resistência elétrica. Esse comportamento é similar em elementos percorridos por correntes CA, logo, de forma genérica, a impedância em um circuito CA pode ser enunciada do seguinte modo:

A impedância em circuitos CA representa a dificuldade que a corrente alternada encontra para percorrer elementos de circuitos, como resistores, indutores e capacitores. Assim, da mesma maneira que a resistência, a unidade da impedância é o ohm $[\Omega]$.

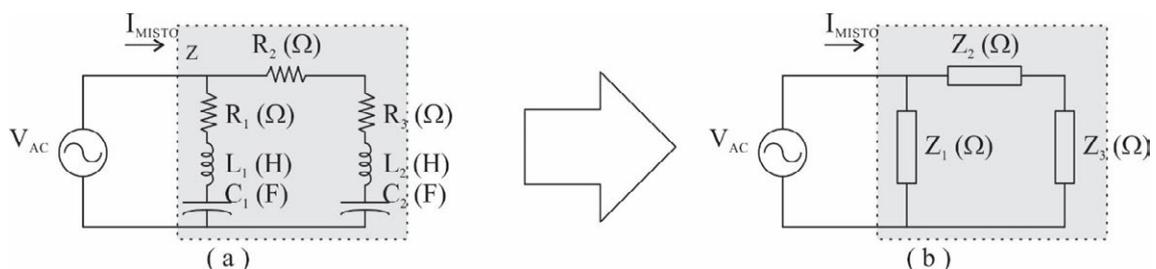
De um modo geral a impedância é representada pela letra **Z**, podendo ser utilizada para um elemento individual ou para a combinação de vários elementos. Essas combinações de elementos podem ser RL, RC e RLC ou mistas. Veja a Figura 6.5, para um melhor entendimento.

Figura 6.5 – Exemplos de combinações de elementos de circuitos: (a) circuito RL; (b) circuito RC; (c) circuito RLC; (d) circuito misto com vários R, L e C



Veja que as combinações entre resistores, indutores e capacitores são inúmeras. Na Figura 6.5 (a), temos uma resistência e uma indutância em série, por isso o nome circuito RL; na Figura 6.5 (b), temos uma resistência em série com um capacitor, por isso circuito RC; na Figura 6.5 (c), temos uma combinação de resistência, indutor e capacitor, por isso circuito RLC; e, por fim, uma combinação série/paralelo de diversos resistores, indutores e capacitores, por isso o nome de circuito misto. Observe o leitor que todos os elementos em destaque do circuito são codinominados. O destaque serve para você perceber que a associação dos diversos elementos também pode ser chamada de **Z**, ou seja, o equivalente entre as resistências, indutâncias e capacitâncias. Isso não exclui a possibilidade de o conceito de impedância ser aplicado a um único elemento de circuito, desde que as devidas considerações sobre a frequência de alimentação sejam estabelecidas. Agora que o conceito de impedância foi definido e que as diversas combinações entre esses elementos foram apresentadas, vejamos a aplicação da lei de Ohm em cada elemento em particular e suas impedâncias também em particular. Para simplificar ainda mais a representação de impedâncias em um circuito qualquer, foi convencionado o uso de retângulos no lugar dos elementos passivos. Esta representação está melhor exemplificada na Figura 6.6.

Figura 6.6 – Representação simplificada de elementos de impedância



6.3.2 Lei de Ohm aplicada a resistências em circuitos em corrente alternada

A lei de Ohm aplicada a um resistor em circuitos CA é definida tal como na expressão (6.4).

$$V_R = Z_R I_R \quad (6.4)$$

Na expressão (6.4) o valor da impedância devido, unicamente, ao resistor é estabelecida em (6.5).

$$Z_R = R \quad (6.5)$$

A equação (6.5) mostra que a impedância em circuitos puramente resistivos equivale ao valor da(s) resistência(s) sem nenhuma dependência com a frequência da fonte de alimentação. Essa equação, em termos práticos, é importante, pois, se houver a necessidade, por exemplo, de limitar a corrente em um circuito CA qualquer, podemos utilizar resistências, tal como faríamos em um circuito CC.

6.3.3 Lei de Ohm aplicada a indutores em circuitos em corrente alternada

Para os indutores, a lei de Ohm é bastante semelhante ao que vimos na subseção anterior. Veja na expressão (6.6).

$$V_L = Z_L I_L \quad (6.6)$$

A impedância aplicada a indutâncias é definida de acordo com (6.7).

$$Z_L = j2\pi fL \quad (6.7)$$

Veja que a impedância dos indutores – também chamados de elementos indutivos – é diretamente proporcional à frequência f de alimentação da fonte de tensão CA e também diretamente proporcional ao valor da indutância L (medida em Henry $[H]$). É interessante perceber que, sendo a frequência das fontes contínuas (fontes CC) zero, a impedância de indutores em circuitos alimentados por fontes CC também é zero, ou seja, o indutor em circuitos CC se comporta exatamente igual a um fio e não oferece dificuldade à passagem da corrente CC. Outro fator muito interessante é que a impedância dos indutores é, na verdade, um número complexo imaginário puro – a presença da parte imaginária j indica isso. Alternativamente a impedância indutiva é conhecida na literatura técnica como reatância indutiva e representada por $Z_L = jX_L$ onde $X_L = 2\pi fL$.

6.3.4 Lei de Ohm aplicada a capacitores em circuitos em corrente alternada

Para os capacitores a lei de Ohm assume a forma da expressão (6.8).

$$V_C = Z_C I_C \quad (6.8)$$

A impedância aplicada aos capacitores é definida na expressão (6.9).

$$Z_C = \frac{-j}{2\pi f C} \quad (6.9)$$

Perceba que a impedância capacitiva é inversamente proporcional à frequência da fonte de alimentação e ao valor da capacitância (a capacitância é medida em farad [F]). Em circuitos CC, a frequência de alimentação é zero, e isso implica dizer que a impedância capacitiva – ou reatância capacitiva – em circuitos CC tende a ser altíssima, de modo tal que, se colocarmos um capacitor em uma determinada parte de um circuito em corrente contínua, isso significará que esse capacitor se comportará como sendo um circuito aberto. A impedância capacitiva pode ser alternativamente representada por $Z_C = -jX_C$ com $X_C = \frac{1}{2\pi f C}$ e é conhecida na literatura técnica como reatância capacitiva.

Para resumir o que foi discutido até aqui sobre a análise de elementos em circuitos CA, veja a Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Elementos de circuito e suas respectivas impedâncias

	R	L	C
Nome	Resistência	Reatância indutiva	Reatância capacitiva
Expressão	$Z_R = R$	$X_L = 2\pi f L$	$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$

Após finalizarmos as considerações que norteiam a aplicação da lei de Ohm para os diversos elementos de circuito alimentados em AC, podemos partir para a aplicação das leis de Kirchhoff em circuitos AC. Ao leitor, porém, é recomendado recorrer ao quadro de revisão sobre números complexos presente neste capítulo. Essa revisão é importante para que seu aproveitamento do assunto seja maior.

6.4 Fasores

Um importante conceito a ser introduzido neste capítulo é o de fasores. Lembremo-nos de que, conforme visto nas discussões anteriores, uma fonte senoidal é caracterizada plenamente pela *amplitude*, pela *frequência* e pelo *ângulo de fase*. Fasor é uma ferramenta para facilitar operações matemáticas com grandezas senoidais.

Os fasores são utilizados para caracterizar, em termos de amplitude e ângulo de fase, as tensões e correntes em um circuito AC.

Em outras palavras, os fasores é uma forma de representação de uma grandeza senoidal, que tem como objetivo a simplificação de operações matemáticas.

Para entender melhor a expressão em negrito acima, considere as tensões e correntes no domínio do tempo a seguir.

$$v(t) = 220\text{sen}(\omega t + 120^\circ)$$

$$i(t) = 10\text{sen}(\omega t + 120^\circ)$$

A representação fasorial da tensão $v(t)$ e $i(t)$ é feita do seguinte modo:

$$\mathbf{V} = 220\angle 120^\circ$$

$$\mathbf{I} = 10\angle 120^\circ$$

Veja que, na representação fasorial, as variáveis relativas à tensão e à corrente são representadas em maiúsculo e em negrito. Como a frequência angular ω é conhecida e é a mesma tanto para a tensão quanto para a corrente, na representação fasorial ela não aparece, ou seja, a frequência angular é uma grandeza conhecida e implícita. Observe, também, que a representação fasorial expressa claramente quais são as amplitudes e os ângulos de fase da tensão e da corrente. A ideia central para o uso dos fasores não passa apenas pela simplificação da representação matemática das grandezas envolvidas mas também serve para simplificar os processos de multiplicação e divisão entre grandezas no domínio da frequência. Os fasores também são relacionados com os números complexos. No quadro da revisão sobre esses números, foi apresentada a forma retangular dos números complexos na forma $z = a + bj$, de modo que um complexo qualquer pode ser representado na forma fasorial.

Vejamos como fazer isso de forma simples e direta.

Seja um fasor qualquer $\mathbf{F} = A\angle\varphi$ e um número complexo na forma supracitada. Para obter a amplitude A e o ângulo φ , procedemos da seguinte forma:

$$A = \sqrt{a^2 + b^2} \quad (6.10)$$

$$\varphi = \text{acos}\left(\frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}\right) \quad (6.11)$$

O leitor também deve se perguntar se é possível passar uma grandeza qualquer na sua representação fasorial para a representação complexa retangular. A resposta é sim, e isso é feito de forma bastante simples, como podemos ver nas expressões (6.12)-(6.13).

$$a = A \times \cos(\varphi) \quad (6.12)$$

$$b = A \times \sin(\varphi) \quad (6.13)$$

Feitas essas considerações iniciais sobre os fasores, convém explorarmos as operações matemáticas utilizando a representação fasorial.

6.4.1 Multiplicação entre fasores

Sejam os fasores $F_1 = A_1 \angle \varphi_1$ e $F_2 = A_2 \angle \varphi_2$, a multiplicação entre esses dois fasores é igual a:

$$F_{1 \times 2} = A_1 \times A_2 \angle (\varphi_1 + \varphi_2) \quad (6.14)$$

Ou seja:

Para multiplicar dois fasores, basta multiplicar as amplitudes e somar os ângulos de fase.

6.4.2 Divisão entre fasores

Sejam os mesmos fasores utilizados na subseção anterior, a divisão entre esses dois fasores é igual a:

$$F_{1 \div 2} = \frac{A_1}{A_2} \angle (\varphi_1 - \varphi_2) \quad (6.15)$$

Ou seja:

Para dividir dois fasores, basta dividir as amplitudes e subtrair os ângulos de fase.

Observe também a seguir o que ocorre quando somamos ou subtraímos os fasores.

6.4.3 Soma entre fasores

Vamos lançar mão novamente dos fasores F_1 e F_2 expressos anteriormente. Para efetuarmos a soma entre esses dois fasores, temos que, primeiro, fazer a transformação de ambos da forma fasorial para a forma retangular e efetuar a soma entre dois complexos da forma convencional, ou seja:

$$F_1 \rightarrow z_1 = a_1 + b_1j$$

$$F_2 \rightarrow z_2 = a_2 + b_2j$$

$$z_1 + z_2 = (a_1 + a_2) + (b_1 + b_2)j \quad (6.16)$$

Após a soma na forma retangular, podemos transformar novamente para a forma fasorial, logo:

$$F_{1+2} = \sqrt{(a_1 + a_2)^2 + (b_1 + b_2)^2} \angle \cos \left(\frac{(a_1 + a_2)}{\sqrt{(a_1 + a_2)^2 + (b_1 + b_2)^2}} \right) \quad (6.17)$$

Do exposto, podemos afirmar que:

Para somar fasores, temos que transformá-los para a sua forma retangular ($z = a + bj$), efetuar a soma das partes real e imaginária e transformar a soma resultante da forma retangular para a forma fasorial.

6.4.4 Subtração entre fasores

Vamos tomar os mesmos fasores utilizados na soma logo acima e, à semelhança do que foi feito para a soma, vamos transformar ambos para a sua forma retangular, deste modo:

$$F_1 \rightarrow z_1 = a_1 + b_1j$$

$$F_2 \rightarrow z_2 = a_2 + b_2j$$

$$z_1 - z_2 = (a_1 - a_2) + (b_1 - b_2)j \quad (6.18)$$

Após a subtração na forma retangular, podemos transformar novamente para a forma fasorial, logo

$$F_{1-2} = \sqrt{(a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2} \angle \cos \left(\frac{(a_1 - a_2)}{\sqrt{(a_1 - a_2)^2 + (b_1 - b_2)^2}} \right) \quad (6.19)$$

À semelhança do que fizemos para a soma, o seguinte conjunto de marcações ajuda a entender a subtração entre fasores.

Para subtrair dois fasores, devemos convertê-los para a sua forma retangular ($z = a + bj$), efetuar a subtração das partes real e imaginária e transformar a subtração resultante da forma retangular para a forma fasorial.

A essa altura, o leitor deve perceber que qualquer grandeza senoidal pode ser representada por um fasor e que tal fasor pode ser expresso na sua forma retangular ou polar. Para operações de multiplicação e divisão a forma polar é a melhor opção. Para operações de soma e diminuição a forma retangular é mais apropriada. Além disso, o leitor deve perceber que impedâncias com resistores e elementos reativos, como indutores e capacitores, e fontes alternadas podem ser representadas numa forma semelhante aos fasores, para facilitar os cálculos. Em discussões que se seguirão, o leitor terá a oportunidade de observar soluções de circuitos com fontes (e impedâncias) na sua forma fasorial.

6.5 Leis de Kirchhoff usando fasores

As leis de Kirchhoff para as tensões e correntes podem ser utilizadas juntamente com os fasores, incluindo-se aí todas as técnicas subsequentes, como, por exemplo, a divisão de tensão, a divisão de corrente e a associação de impedâncias. Nesta subseção o nosso objetivo é mostrar isso a você, leitor, utilizando exemplos numéricos.

6.5.1 Lei de Kirchhoff para as tensões

A lei de Kirchhoff para as tensões pode ser utilizada utilizando-se fasores, porém o processo de prova matemática dessa afirmação está além do objetivo deste livro. Podemos, entretanto, afirmar o seguinte:

A lei de Kirchhoff para as tensões pode ser utilizada no domínio CA, desde que as tensões sejam substituídas pelos fasores correspondentes.

6.5.2 Lei de Kirchhoff para as correntes

À semelhança do que foi afirmado para a lei de Kirchhoff para as tensões contínuas, podemos afirmar que:

A lei de Kirchhoff para as correntes pode ser utilizada no domínio CA, desde que as correntes sejam substituídas pelos fasores correspondentes.

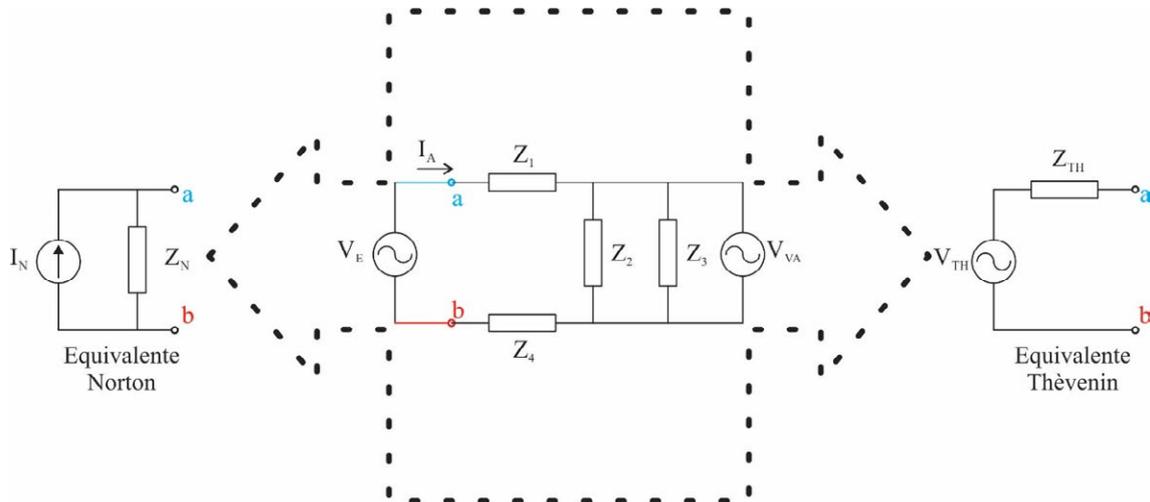
O leitor deve ficar atento neste ponto para perceber que todas as técnicas de análise de circuitos estudadas no Capítulo 5 são aplicadas integralmente na análise de circuitos CA, incluindo-se aí: as simplificações de Thévenin e Norton, a divisão de tensão, a divisão de corrente, correntes de malha, etc. A diferença é que serão utilizados números complexos (e toda a álgebra envolvida desse conjunto numérico) para resolver os problemas de circuito.

Outra observação a ser feita é que a representação das impedâncias pode estar na forma retangular ou na forma polar; a preferência por uma ou por outra representação depende do tipo de problema que você resolverá – muitas vezes essa representação será indiferente na complexidade da solução do circuito.

Para tentar fixar apropriadamente essas discussões, serão apresentados a você, leitor, alguns problemas de fixação. Começamos por explicar que a simplificação de Thévenin consiste em obter um circuito mais simples do ponto de vista de dois terminais quaisquer de um circuito mais complexo. No caso do domínio CA, transformamos um circuito composto de fontes CA, e suas impedâncias, em um único circuito composto de uma fonte de tensão CA em série, com uma impedância; já a simplificação de Norton consiste em simplificar o circuito do ponto de vista dos terminais escolhidos em uma fonte de corrente, em paralelo

com uma impedância. Abaixo está uma pequena ilustração para demonstrar o que foi lembrado aqui.

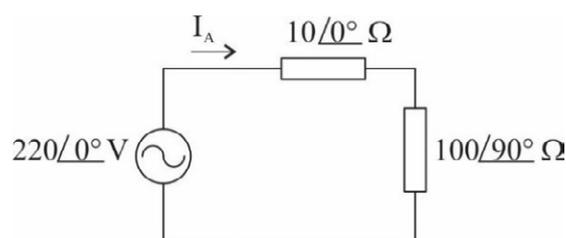
Figura 6.7 – Simplificações de Norton e Thèvenin em circuito no domínio AC



Exemplo 6.1

Seja o circuito da Figura 6.8, com a representação da fonte na forma fasorial e das impedâncias na forma polar, admita que a fonte de tensão possua uma frequência de 60 Hz. Determine a tensão nos terminais da impedância $100\angle 90^\circ \Omega$, a qual pode ser chamada de z_2 para fins de nomenclatura e simplicidade de notação.

Figura 6.8 – Exemplo 6.1



Solução:

Nós podemos solucionar o problema utilizando diversos métodos (rever Capítulo 5, se preferir). Um deles é lançando mão da divisão de tensão, e é exatamente por este método que iremos prosseguir para a determinação do que foi pedido no exemplo. Sendo assim, teremos:

$$V_{z_2} = 220\angle 0^\circ \times \frac{100\angle 90^\circ}{10\angle 0^\circ + 100\angle 90^\circ}$$

Podemos multiplicar o fasor $220\angle 0^\circ$ pela forma polar de z_2 . Fazendo isto, nós obteremos:

$$V_{z_2} = \frac{22000\angle 90^\circ}{10\angle 0^\circ + 100\angle 90^\circ}$$

Como foi nas subseções acima, para somar as formas polares $10\angle 0^\circ$ e $100\angle 90^\circ$ devemos transformar as duas para a forma retangular, somá-las e transformar o resultado da soma para a forma polar. Deste modo, ficaremos com:

$$\therefore 10\angle 0^\circ + 100\angle 90^\circ$$

$$\therefore 10 + 0j + 0 + 100j$$

$$\therefore 10 + 100j$$

$$\therefore 100,5\angle 84,3^\circ$$

Colocando o resultado da soma de $10\angle 0^\circ$ com $100\angle 90^\circ$ no denominador da fração inicial, teremos o seguinte:

$$V_{z_2} = \frac{22000\angle 90^\circ}{100,5\angle 84,3^\circ}$$

Prosseguindo com o que foi dito sobre a divisão de fasores (ou divisão de números complexos na forma polar), enfim teremos:

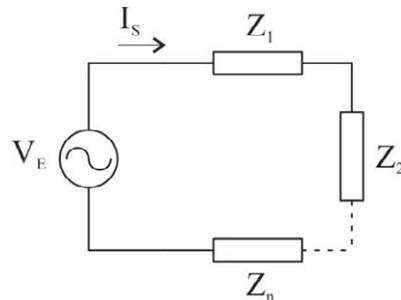
$$V_{z_2} = 218,9\angle 5,7^\circ \text{ V}$$

6.6 Associação de impedâncias

É conveniente abordar as questões sobre associações com impedâncias, uma vez que esse pormenor é uma fonte frequente de dúvidas dos profissionais que lidam direta e indiretamente com circuitos no domínio AC.

6.6.1 Associação de impedâncias em série

A associação de impedâncias em série obedece ao mesmo critério utilizado na associação de resistores em série. Na Figura 6.9, está representado um circuito com n impedâncias em série (observe que o pontilhado nos fios do circuito indicam muitas impedâncias após Z_2 até chegar a Z_n).

Figura 6.9 – Circuito CA em série genérico composto por n impedâncias

A impedância equivalente, vista pela fonte de tensão V_E , é composta pela associação das n impedâncias em série do circuito e, à semelhança do que é feito para os resistores associados em série, a soma dessas n impedâncias corresponde ao valor da impedância equivalente. Em termos matemáticos, teremos a seguinte expressão genérica para a associação em série de impedâncias, mostrada na expressão (6.20).

$$Z_s = Z_1 + Z_2 + \dots + Z_n \quad (6.20)$$

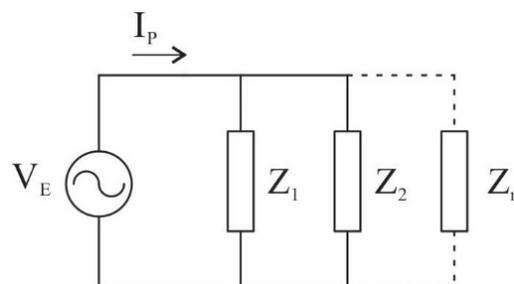
Cabe comentar que a associação de impedâncias obedece aos critérios de soma de números complexos, semelhante ao que foi mostrado na expressão (6.14). Uma revisão mais elaborada sobre números complexos será abordada ao final deste capítulo.

6.6.2 Associação de impedâncias em paralelo

De maneira semelhante ao que foi abordado na subseção acima, a associação de impedâncias em paralelo obedece aos mesmos critérios da associação de resistores abordada no Capítulo 5. Seja o circuito CA com n impedâncias associadas em paralelo, conforme Figura 6.10, podemos dizer que a impedância equivalente em paralelo vista pela fonte de tensão V_E pode ser calculada segundo a expressão (6.21), ou seja:

$$\frac{1}{Z_p} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \dots + \frac{1}{Z_n} \quad (6.21)$$

Figura 6.10 – Circuito CA com impedâncias associadas em paralelo

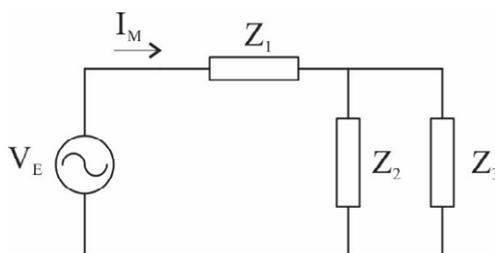


De maneira semelhante ao que foi abordado na subseção anterior, a associação de impedâncias em paralelo envolve a divisão e a soma de impedâncias. Como as impedâncias são representadas por números complexos, essas operações exigem a abordagem dos problemas do gênero lançando mão da álgebra dos números complexos. Se as impedâncias estiverem na sua representação polar, cada membro da expressão acima pode ser resolvido de acordo com o que foi mostrado na expressão (6.15).

6.6.3 Associação de impedâncias mistas

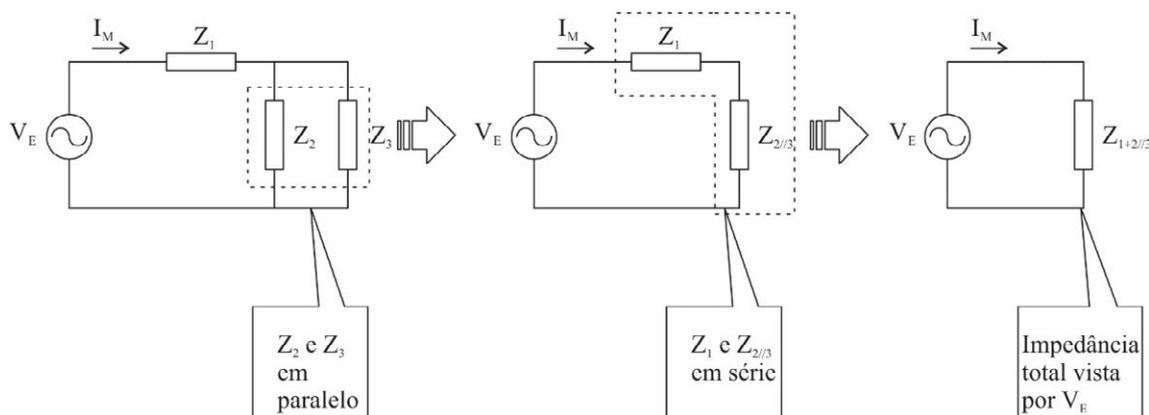
A associação mista de impedâncias obedece aos preceitos vistos nas duas subseções anteriores. Ora estaremos trabalhando com impedâncias em série, ora estaremos trabalhando com impedâncias em paralelo. Para um melhor entendimento deste fato, observe a Figura 6.11.

Figura 6.11 – Circuito CA com associação mista de impedâncias



Veja que Z_2 e Z_3 estão associados em paralelo. A impedância equivalente, paralelo de Z_2 e Z_3 , estará em série com a impedância Z_1 . Na Figura 6.12 está o conjunto de associações feitas até o resultado da impedância equivalente final, vista pela fonte de tensão V_E .

Figura 6.12 – Conjunto de associações de impedâncias em um circuito AC

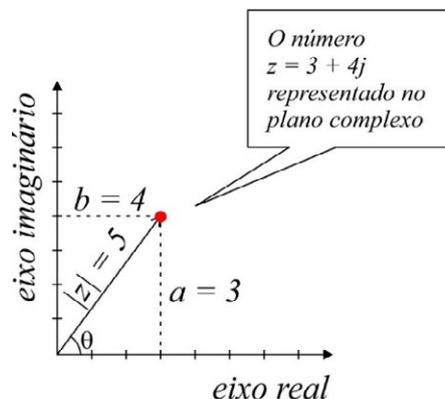


Um circuito com exemplos numéricos contextualizados será abordado logo mais para uma melhor fixação do que foi discutido.

6.7 Representação fasorial

Até aqui foi discutido, basicamente, que os fasores servem para representar as tensões e correntes no domínio da frequência (ou no domínio CA). Você pode entender, também, como uma metodologia para representar as funções temporais de tensão e corrente de uma forma simplificada, a qual deixa implícita a frequência do sinal com o foco na informação da amplitude e do ângulo de fase dos sinais alternados. Em alguns momentos, é importante ter uma percepção espacial mais apurada das relações de fase entre as grandezas tensão e corrente. Para isto, foi criada a *representação fasorial*. Essa representação usa o fato de os números complexos poderem ser representados por um ponto no plano complexo. Veja a Figura 6.13.

Figura 6.13 – Representação de um número complexo no plano complexo



Na Figura 6.13 estão presentes algumas informações da grandeza. A primeira delas é que o eixo de coordenadas do domínio complexo é dividido em eixo real, onde estão localizados os pontos relativos à parte real do número complexo, e o eixo imaginário, onde estão localizados os pontos relativos à parte imaginária do número complexo. A distância da origem do sistema de coordenadas até a intersecção dos pontos real e imaginário corresponde ao módulo do número complexo, e a angulação entre o eixo real e a reta da origem ao ponto corresponde à fase do número complexo. O módulo do ângulo complexo é calculado de acordo com a expressão (6.8) e a fase conforme a expressão (6.9). Observe, também, que, com o módulo e a fase, podemos calcular as partes real e imaginária com as expressões (6.10) e (6.11) respectivamente.

Como os fasores também são números complexos, podemos tomar emprestada a representação no plano complexo, para estabelecermos, de forma visual, relações de módulo e fase entre fasores. Então podemos estabelecer o seguinte enunciado:

A representação fasorial é uma metodologia gráfica para estabelecer relações de módulo e fase entre tensões e correntes em um circuito CA.

A seguir, faremos alguns esclarecimentos sobre alguns assuntos os quais, frequentemente, são fontes de dúvidas comuns entre aqueles que estão tendo o primeiro contato com a representação fasorial.

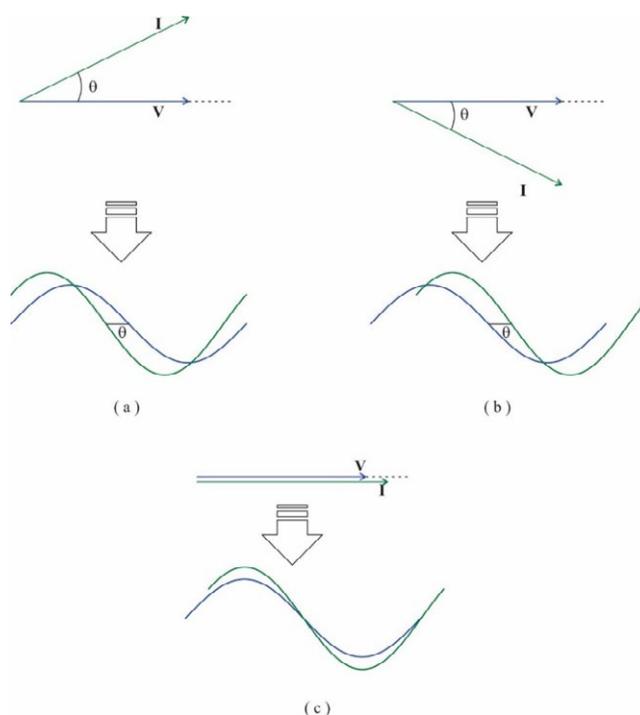
É bom notar que...

O operador j representa matematicamente $j = \sqrt{-1}$. Este operador, ou seu valor, não pode ser representado no conjunto dos números reais, posto que não existe $\sqrt{-1}$. Apesar de as impedâncias, entretanto, serem representadas por uma parte, chamada imaginária, essas reatâncias, tanto capacitivas como indutivas, são bem reais. Elas estão presentes em diversos circuitos elétricos. As impedâncias não são mais como uma simples resistência nos circuitos CC que necessitavam de somente uma informação – as impedâncias necessitam de duas informações, como um vetor em duas dimensões. As operações que envolvem impedâncias levam em consideração essas duas informações, as quais, por convenção, são intituladas de real e imaginária, embora pudessem ser chamadas de dimensão 1 e dimensão 2.

6.7.1 Representação fasorial entre tensões e correntes

Frequentemente somos confrontados com situações nas quais queremos saber quais são as relações de fase e de ângulo entre uma tensão e uma corrente em um determinado elemento de circuito. Veja a Figura 6.14 para acompanhar de forma mais detalhada as discussões seguintes. Atente para o detalhe de que os fasores e sinais de tensão estão em azul e que os fasores e sinais de corrente estão em verde.

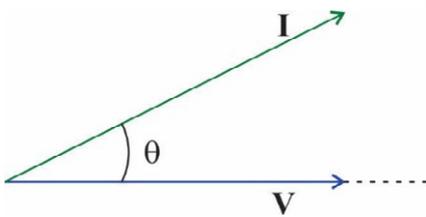
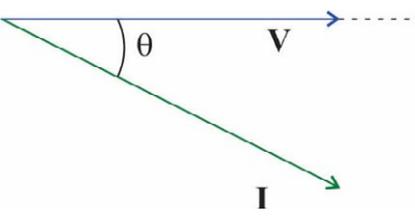
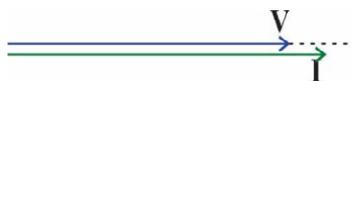
Figura 6.14 – Relações de fase entre correntes e tensões



Basicamente existem três possibilidades de defasamento entre correntes e tensões, as quais foram ilustradas na Figura 6.14. Dependendo da impedância que estará conectada à fonte de tensão, a corrente pode vir à frente da tensão, ou seja, a corrente poderá estar adiantada em relação à tensão, como é o caso da Figura 6.14 (a). Veja que, na Figura 6.14 (a), o fasor corrente I está logo acima do fasor tensão V . *Em circuitos CA, o que provoca o adiantamento da corrente em relação à tensão que alimenta um circuito é uma impedância com característica capacitiva.*

No domínio do tempo, o que caracteriza o adiantamento da corrente em relação à tensão é que os valores de pico da corrente ocorrem antes dos valores de pico da tensão. Para visualizar esse processo, observe os sinais de corrente e tensão na Figura 6.14 (a). A outra possibilidade de relação de fase é quando a corrente está atrasada em relação à tensão. Observe a Figura 6.14 (b): o fasor da tensão está por cima do fasor da corrente, por um ângulo; isso indica que a corrente está atrasada em relação à tensão. *Em circuitos CA, o que provoca o atraso da corrente em relação à tensão que alimenta um circuito é uma impedância com característica indutiva.* Observe que, no domínio do tempo, os valores de pico das tensões ocorrem sempre antes dos valores de pico das correntes. Veja esse comportamento na Figura 6.14 (b). Por fim, a última possibilidade do defasamento de que tratamos acontece quando os fasores de tensão e de corrente estão num mesmo sentido e numa mesma direção, o que caracteriza que ambos estão em fase. *Em circuitos CA, o que provoca um comportamento em fase da corrente em relação à tensão que alimenta um circuito é uma impedância com caráter puramente resistivo.* Observe que, no domínio do tempo, os valores de pico das tensões ocorrem sempre no mesmo instante dos valores de pico das correntes, caracterizando, portanto, que os sinais estão em fase (em outras palavras, o ângulo θ entre a corrente e a tensão é zero). Para resumir o que acabamos de discutir, observe a tabela e figuras a seguir.

Tabela 6.2 – Impedâncias dominantes e suas relações fasoriais

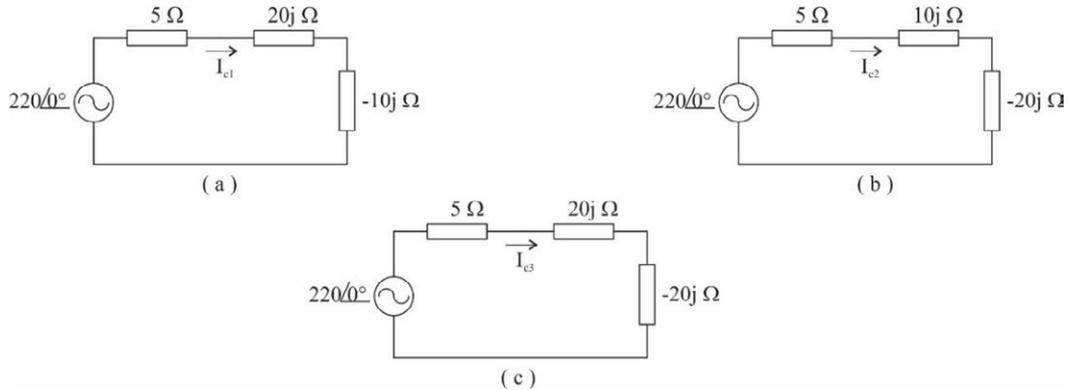
Tipo de impedância dominante e suas representações fasoriais		
Capacitivo	Indutivo	Resistivo
		

Para entender melhor o que acabamos de discutir nesta subseção, vamos resolver os três circuitos do exemplo a seguir.

Exemplo 6.2

Sejam os circuitos mostrados na Figura 6.15, calcule o valor da corrente que percorre cada circuito e, em seguida, represente, de forma fasorial, as tensões da fonte e a corrente dos circuitos.

Figura 6.15 – Circuitos para o exemplo 6.2

**Solução:**

Para facilitar os nossos cálculos, iremos resolver a impedância equivalente para cada um dos circuitos. Atente que são circuitos do tipo série. Chamando de z_1 a impedância do circuito da Figura 6.15 (a), de z_2 a impedância do circuito da Figura 6.15 (b) e de z_3 a impedância da Figura 6.15 (c), teremos que $z_1 = 5 + 10j \cong 11,2 \angle 63,4^\circ \Omega$, $z_2 = 5 - 10j \cong 11,2 \angle -63,4^\circ \Omega$ e $z_3 = 5 + 0j \cong 5 \angle 0^\circ \Omega$. As correntes I_{c1} , I_{c2} e I_{c3} podem ser calculadas utilizando-se a lei de Ohm, ou seja, $I_{c1} = 220 \angle 0^\circ / 11,2 \angle 63,4^\circ \cong 19,7 \angle -63,4^\circ A$.

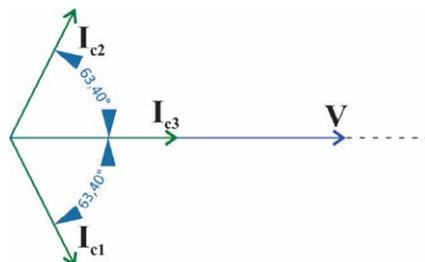
$$I_{c1} = \frac{220 \angle 0}{11,2 \angle + 63,4^\circ} \cong 19,7 \angle - 63,4^\circ A$$

$$I_{c2} = \frac{220 \angle 0}{11,2 \angle - 63,4^\circ} \cong 19,7 \angle + 63,4^\circ A$$

$$I_{c3} = \frac{220 \angle 0}{5 \angle 0^\circ} \cong 44 \angle 0^\circ A$$

A representação fasorial de cada corrente em relação à tensão pode ser vista na Figura 6.16, abaixo.

Figura 6.16 – Representação fasorial das correntes e tensão do exemplo 6.2



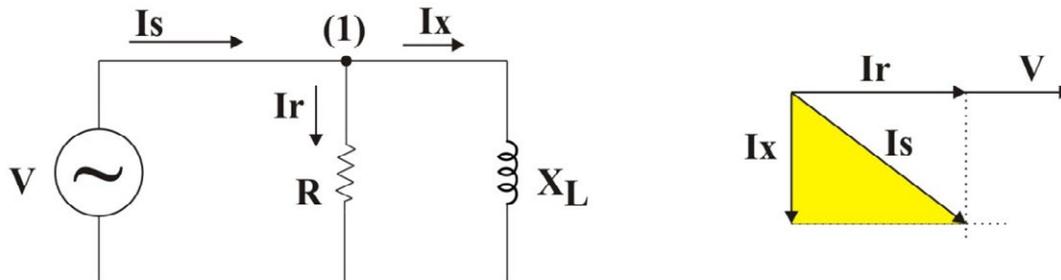
O leitor deve ter observado que, embora existam um indutor e um capacitor no circuito da Figura 6.15 (c), a corrente I_{c3} está em fase com a tensão. Esse comportamento resistivo do circuito ocorre devido a um fenômeno chamado de **ressonância**, o qual acontece quando o indutor e o capacitor trocam energia entre si na mesma proporção. Em outras palavras, a impedância reativa e a impedância capacitiva, quando somadas, são anuladas. Isso faz com que a corrente aumente (o valor de I_{c3} é maior que I_{c2} e I_{c1}) e tenha um comportamento resistivo, ficando em fase com a tensão, mesmo com a presença de indutores e capacitores.

Quando a soma de 3 mais 4 é igual a 5...

O leitor deve achar estranho que, por exemplo, num laboratório, no circuito da Figura 6.17, a medição da corrente no resistor tenha sido 4 A, no indutor tenha sido 3 A e a corrente total no nó (1) tenha sido 5 A. Deveríamos estar esperando um somatório igual a 7 A, já que $3 + 4 = 7$. De fato, a lei de Kirchhoff para as correntes ainda é aplicada aqui, só que a soma não é mais escalar, e sim fasorial. Observe o diagrama fasorial ao lado do circuito. Observe ainda que a corrente no resistor está em fase com a tensão, mas a corrente no indutor está defasada em 90° em relação à tensão. A soma fasorial das correntes é determinada, resolvendo-se o triângulo retângulo hachurado em amarelo, a partir do teorema de Pitágoras. Assim,

$$i_s = \sqrt{i_r^2 + i_x^2} = \sqrt{4^2 + 3^2} = 5$$

Figura 6.17 – Diagrama fasorial de um resistor em paralelo com um indutor



6.8 Potência em circuitos de corrente alternada

Nos capítulos anteriores, foi-nos apresentado o conceito de potência ativa, normalmente associado a sistemas com cargas resistivas. Você entendeu que a potência ativa em um circuito elétrico representa a quantidade de energia que efetivamente é utilizada para realizar trabalho, como, por exemplo, o aquecimento de um resistor e o acendimento de um LED. Também em capítulos anteriores, você aprendeu que existem elementos de circuito que necessitam de energia para funcionar plenamente, como é o caso dos indutores e dos capacitores, mas esses componentes não consomem energia. Em outras palavras, os indutores e capacitores necessitam de energia para criarem campo magnético e campo elétrico, respectivamente. Nos circuitos CC, porém, a impedância de um indutor é zero, enquanto que a de um capacitor é infinita, o que faz com que esses elementos se comportem,

respectivamente, como um curto-circuito e como um circuito aberto, respectivamente. Por essas características de comportamento, iremos estudar como os indutores e capacitores influenciam na potência em circuitos alimentados por fontes de tensão CA.

6.8.1 Potência instantânea em circuitos de corrente alternada

Vimos em capítulos anteriores que a potência elétrica pode ser calculada simplesmente multiplicando-se a tensão pela corrente. Suponha um sinal de tensão senoidal $v(t)$ e $i(t)$ em seus valores RMS, conforme equações abaixo:

$$v(t) = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \cos(\omega t + \theta_v) \quad (6.22)$$

$$i(t) = \frac{I_p}{\sqrt{2}} \cos(\omega t + \theta_i) \quad (6.23)$$

Ao efetuarmos a multiplicação dos sinais de tensão e de corrente, iremos obter a expressão (6.24), com dois termos.

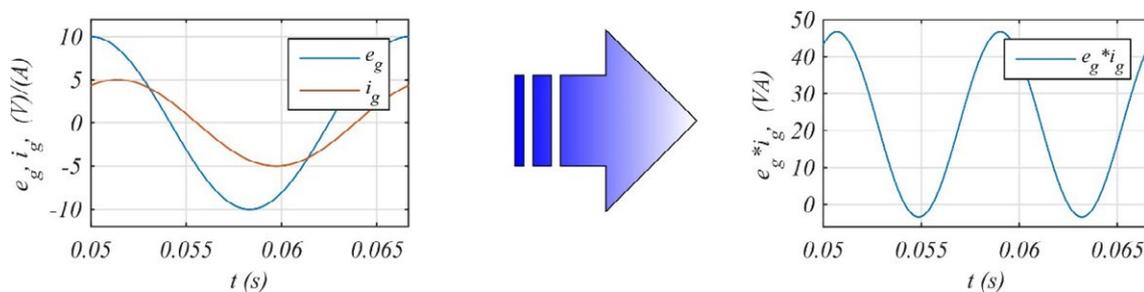
$$p(t) = \frac{V_{rms} I_{rms}}{2} \cos(\theta_v - \theta_i) + \frac{V_{rms} I_{rms}}{2} \cos(2\omega t + \theta_v + \theta_i) \quad (6.24)$$

Lembremo-nos de que a multiplicação de duas funções cossenoidais segue da relação trigonométrica obtida de $\cos(a) \times \cos(b) = \frac{\cos(a-b)}{2} + \frac{\cos(a+b)}{2}$.

Um dos termos é independente do tempo, enquanto que o outro possui duas vezes a frequência da rede de alimentação.

Para entender melhor as discussões, observe a Figura 6.18 logo a seguir.

Figura 6.18 – Tensão e corrente num circuito CA qualquer e potência associada a esses sinais

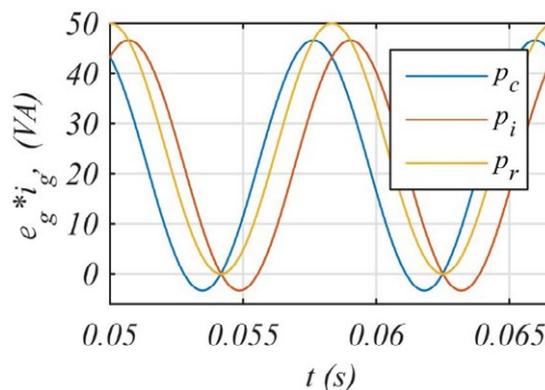


O sinal de tensão, aqui chamado de e_g , possui um valor RMS de 10 V, a corrente, aqui chamada de i_g , possui um valor RMS de 5 A. Quando esses dois sinais são multiplicados, obtém-se o valor da potência instantânea, conforme se representa na Figura 6.18. Observe que o comportamento no tempo da potência instantânea é oscilatório, com uma frequência,

conforme vimos na equação (6.24), que é duas vezes a frequência dos sinais de tensão e corrente – uma forma de observar isso é verificando que, no gráfico da tensão e da corrente, existe apenas um período de ambos, e, no gráfico da potência instantânea, para o mesmo intervalo de tempo observado, existem dois períodos do sinal de potência. Além disso, observe que o sinal da potência oscila em torno de um valor médio. Outro fato curioso é que a potência instantânea apresenta valores menores que zero.

O valor médio em torno do qual o sinal de potência instantânea oscila é o que chamamos de **potência média** ou, tal como vimos em capítulos anteriores, de **potência ativa**. O motivo pelo qual a potência instantânea varia com duas vezes a frequência dos sinais de tensão e corrente é devido à ocorrência do que se expressa no segundo termo da equação (6.24). Quando existem capacitores ou indutores no circuito CA, é necessária uma parcela de potência adicional chamada de **potência reativa**. A potência reativa é a responsável por abastecer os campos elétricos e magnéticos de capacitores e indutores, respectivamente. **A potência reativa não é utilizada para a realização de trabalho efetivo** (iluminar um ambiente, fazer girar um motor, etc.). A potência reativa está presente em todos os circuitos CA com cargas capacitivas ou indutivas. O comportamento capacitivo ou indutivo dos circuitos CA reflete-se na potência instantânea apenas adiantando (caso capacitivo) ou atrasando (caso indutivo) onde ocorrem os máximos e mínimos dessa potência. Quando o circuito CA apresenta um comportamento resistivo puro, a potência instantânea ainda é oscilatória, porém não existem mais parcelas negativas, o que, em circuitos monofásicos, indica que as parcelas negativas da potência instantânea ocorrem devido à potência reativa necessária para abastecer os campos eletromagnéticos dos elementos presentes nesse circuito. Para entender apropriadamente as discussões acima, recorra à Figura 6.19.

Figura 6.19 – Potências instantâneas com diferentes cargas: capacitiva (p_c), indutiva (p_i) e resistiva (p_r)



Nessa figura, o sinal p_r representa a potência instantânea em um circuito resistivo puro, o sinal p_i representa a potência instantânea em um circuito com características indutivas e o sinal p_c representa a potência em um circuito com características capacitivas. Veja que o sinal p_c está adiantado quando comparado ao sinal de p_i . A unidade da potência instantânea é o VA , justamente porque foram multiplicados os sinais de tensão e corrente. Continuando a nossa análise sobre a potência em circuitos CA, vejamos o comportamento da potência instantânea em três situações distintas: um circuito resistivo puro, um circuito capacitivo puro e um circuito indutivo puro.

Figura 6.20 – Potência instantânea em um circuito resistivo puro

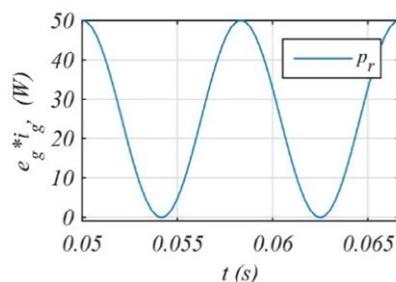


Figura 6.21 – Potência instantânea em um circuito capacitivo puro

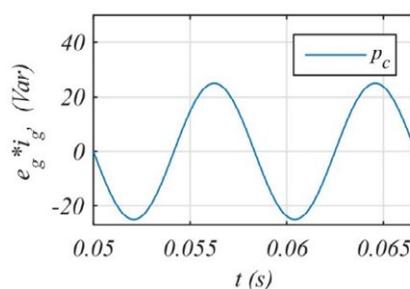
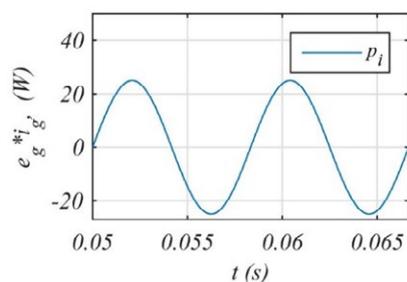


Figura 6.22 – Potência instantânea em um circuito indutivo puro



Quando o circuito é **puramente resistivo**, podemos perceber, ao observarmos a Figura 6.20, que **existe um valor de potência médio diferente de zero** no qual o sinal da potência instantânea oscila. Quando, entretanto, estamos diante de um circuito **puramente capacitivo**, Figura 6.21, ou **puramente indutivo**, Figura 6.22, podemos perceber que o **valor médio da potência instantânea é nulo** e que os sinais das potências instantâneas nos circuitos capacitivos e indutivos são defasados de 180° . Duas conclusões importantes podem ser tiradas quanto ao que se apresenta nas Figuras 6.21 e 6.22:

- O gráfico da potência instantânea é simétrico em relação ao zero. Isso mostra que existe uma parcela de potência instantânea positiva e negativa de igual valor. O fluxo de potência é, ora no sentido do componente, ora no sentido da fonte, sem haver consumo de energia.
- A defasagem de 180° entre os sinais de potência instantâneos nos circuitos capacitivos e indutivos puros indica que os fluxos de energia do capacitor e do indutor são complementares. Em outras palavras, quando o fluxo de energia acontece no sentido de um componente, no outro, ocorre no sentido contrário, o que se permite pensar na troca de energia entre os dois, sem a necessidade de solicitar a energia da fonte.

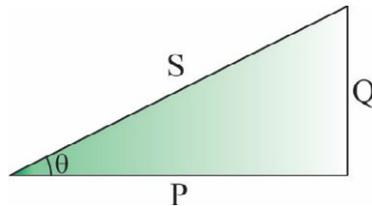
6.8.2 Potências aparente, ativa, reativa

Do ponto de vista da análise de potência em circuitos CA monofásicos, a decomposição dos dois tipos de potência, ativa e reativa, leva a um melhor entendimento. A **potência aparente** é a composição das duas potências já estudadas, a qual pode ser definida como no quadro a seguir:

A potência aparente em um circuito CA é o produto da tensão pela corrente RMS, e sua unidade é o volt-ampère [VA].

Agora que você já foi apresentado formalmente às potências em circuitos CA, vejamos a relação trigonométrica que existe entre elas. Essa relação nos ajudará a entender as derivações de expressões importantes, mostradas na Figura 6.23.

Figura 6.23 – O triângulo de potências



Com o auxílio da Figura 6.23 podemos perceber que as três potências, a aparente (S), a ativa (P) e a reativa (Q), podem ser relacionadas por meio de um triângulo retângulo conhecido como **triângulo de potências**. Nesse triângulo, os catetos são formados pela potência ativa (P) e reativa (Q) e a hipotenusa pela potência aparente (S). Existe um ângulo θ entre a potência aparente e a potência ativa. Essa representação trigonométrica das três potências em circuitos CA é útil porque podemos utilizar as relações trigonométricas em um triângulo retângulo para determinar quais são as relações entre as três potências estudadas. Do triângulo retângulo, podemos perceber e extrair o seguinte conjunto de relações de potências.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (6.25)$$

$$P = S \times \cos(\theta) \quad (6.26)$$

$$Q = S \times \sin(\theta) \quad (6.27)$$

$$S = VI \quad (6.28)$$

$$\cos(\theta) = \frac{P}{S} \quad (6.29)$$

$$P = VI \times \cos(\theta) \quad (6.30)$$

$$Q = VI \times \sin(\theta) \quad (6.31)$$

Para extrair as expressões (6.25) – (6.27) foram utilizados o teorema de Pitágoras, a relação de cosseno e a relação de seno em um triângulo retângulo. Um destaque especial deve ser feito com relação à expressão (6.29), a qual representa o fator de potência. A definição do fator de potência é como segue:

O fator de potência é a relação entre a potência ativa e a potência aparente; numericamente é igual ao cosseno do ângulo entre a potência aparente e a potência ativa. Por ser uma função cossenoidal, o fator de potência só pode variar de 0 até 1.

A expressão (6.28) é extraída da definição de potência aparente, enquanto que as expressões (6.30) e (6.31) são derivações naturais obtidas assim que a expressão (6.28) é formalizada. Observando a Figura 6.23, também podemos inferir algumas informações importantes. A primeira delas é que, se o **circuito for resistivo** puro, o **ângulo θ é igual a zero**, o **fator de potência é unitário**, a potência reativa é também igual a zero e toda a potência aparente é igual à potência ativa. Por outro lado, **se o ângulo θ for igual a 90°** , o **fator de potência é zero**, a potência ativa também é zero e toda a potência aparente é igual à potência reativa – observe que neste caso estamos diante de um circuito puramente capacitivo ou puramente indutivo. As unidades das potências ativa, reativa e aparente são mostradas na Tabela 6.3 a seguir.

Tabela 6.3 – Unidades dos três tipos de potências em um circuito AC

Potência ativa	Potência Reativa	Potência aparente
[W]	[Var]	[VA]

6.8.3 Potência expressa em variável complexa

A potência complexa é um artifício para simplificar os cálculos envolvendo os três tipos de potências estudados. A potência complexa é definida como sendo a soma complexa da potência ativa e da potência reativa, ou seja:

$$S = P + jQ \quad (6.32)$$

A unidade da potência complexa é a mesma da potência aparente, ou seja, VA (volt-ampère). Uma vantagem do uso da potência complexa é a sua interpretação geométrica, ou seja, quando você estiver trabalhando com ela, imagine P , Q e $|S|$ como os lados do triângulo de potências, conforme apresentado na Figura 6.23. Outra vantagem do uso da potência complexa é que a relação entre a potência reativa e a potência ativa pode definir o ângulo de fase da potência. Para exemplificar melhor, vamos destacar essa relação na forma da equação a seguir.

$$\tan \theta = \frac{Q}{P} \quad (6.33)$$

O ângulo θ presente na equação (6.33) é o mesmo ângulo do fator de potência. Existem formas alternativas bastante úteis da potência complexa, principalmente se as representações

de tensões e correntes forem em valor RMS na forma fasorial. Ela é melhor definida com o uso da equação a seguir:

$$S = V_{ef} I_{ef}^* \angle(\theta_v - \theta_i) \quad (6.34)$$

A corrente eficaz na equação (6.34) é o conjugado complexo da corrente eficaz fasorial.

Se substituirmos a tensão eficaz acima pelo produto da impedância pela corrente, teremos que:

$$V_{ef} = Z I_{ef} \quad (6.35)$$

$$S = Z I_{ef} I_{ef}^* \quad (6.36)$$

$$S = |I_{ef}|^2 (R + jX) \quad (6.37)$$

Ao associarmos a equação (6.37) com a equação (6.32), veremos que:

$$P = |I_{ef}|^2 R \quad (6.38)$$

$$Q = |I_{ef}|^2 X \quad (6.39)$$

Outras duas representações possíveis são obtidas quando colocamos a equação de corrente em função da relação entre a tensão eficaz e a impedância, e, à semelhança do que foi feito nas equações (6.35) – (6.37), veremos que a potência média e reativas serão iguais a:

$$P = \frac{|V_{ef}|^2}{R} \quad (6.40)$$

$$Q = \frac{|V_{ef}|^2}{X} \quad (6.41)$$

6.9 Análise de circuitos trifásicos em corrente alternada

O estudo dos circuitos trifásicos é de extrema importância, porque toda nossa geração de energia, transmissão e distribuição é trifásica. Em outras palavras, todo nosso sistema elétrico é CA e trifásico. Na Figura 6.24, são mostradas torres de transmissão trifásica, elemento fundamental para levar a energia elétrica desde a geração até as cidades. Nas nossas residências utilizamos monofásicos para alimentar nossas cargas elétricas. Observe, que o sistema monofásico, no entanto, deriva do sistema trifásico. Na realidade, ao final deste capítulo, chegaremos à conclusão de que mesmo o sistema monofásico faz parte do sistema trifásico.

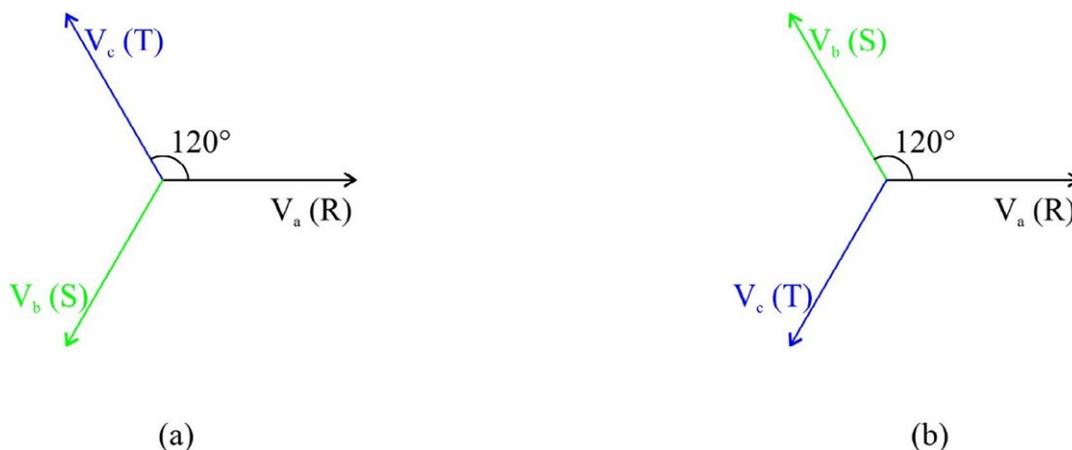
Figura 6.24 – Torre de transmissão trifásica



6.9.1 Sistema trifásico equilibrado

Os sistemas trifásicos são circuitos compostos por três fontes de tensão de igual amplitude, porém defasadas de 120° elétricos umas das outras. Veja a Figura 6.25 para um melhor entendimento fasorial.

Figura 6.25 – Sequências de fase. (a) Sequência *abc* (ou sequência positiva). (b) Sequência *acb* ou *cba* (ou sequência negativa).



Do ponto de vista de equações, e apenas considerando os valores de pico, temos que as tensões trifásicas para a sequência *abc* são representadas por:

$$V_a = V_m \angle 0^\circ \quad (6.42)$$

$$V_b = V_m \angle -120^\circ \quad (6.43)$$

$$V_c = V_m \angle 120^\circ \quad (6.44)$$

Já para a sequência acb, as tensões trifásicas são representadas por:

$$V_a = V_m \angle 0^\circ \quad (6.45)$$

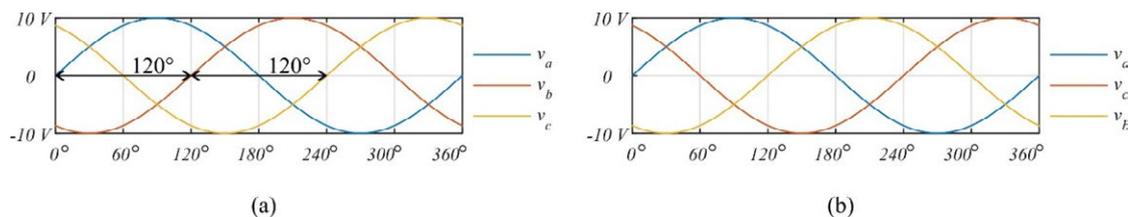
$$V_b = V_m \angle 120^\circ \quad (6.46)$$

$$V_c = V_m \angle -120^\circ \quad (6.47)$$

No domínio do tempo, as curvas da Figura 6.26 representam um conjunto de tensões do sistema trifásico convencional e equilibrado. Veja, por exemplo, que as tensões da Figura 6.26 (a) são as tensões das fases $v_a(t)$, $v_b(t)$ e $v_c(t)$ no tempo. Veja que a tensão $v_b(t)$ está com uma defasagem – um atraso – em relação a $v_a(t)$ de exatamente 120° . O mesmo ocorre com a fonte de tensão $v_c(t)$ em relação a $v_b(t)$.

Figura 6.26 – Sequências de fase no domínio do tempo.

(a) Sequência abc (ou sequência positiva). (b) Sequência acb ou cba (ou sequência negativa).



Feitas essas breves exposições das tensões no que diz respeito a suas equações fasoriais e representações fasoriais, além de suas representações temporais, convém que definamos o que vem a ser um conjunto de tensões equilibradas:

Dizemos que um conjunto de tensões trifásicas são equilibradas entre si quando estas tensões estão defasadas de 120° umas das outras e possuem o mesmo valor de amplitude e frequência.

Para um sistema trifásico e equilibrado, sempre valem as seguintes relações:

$$V_a + V_b + V_c = 0 \quad (6.48)$$

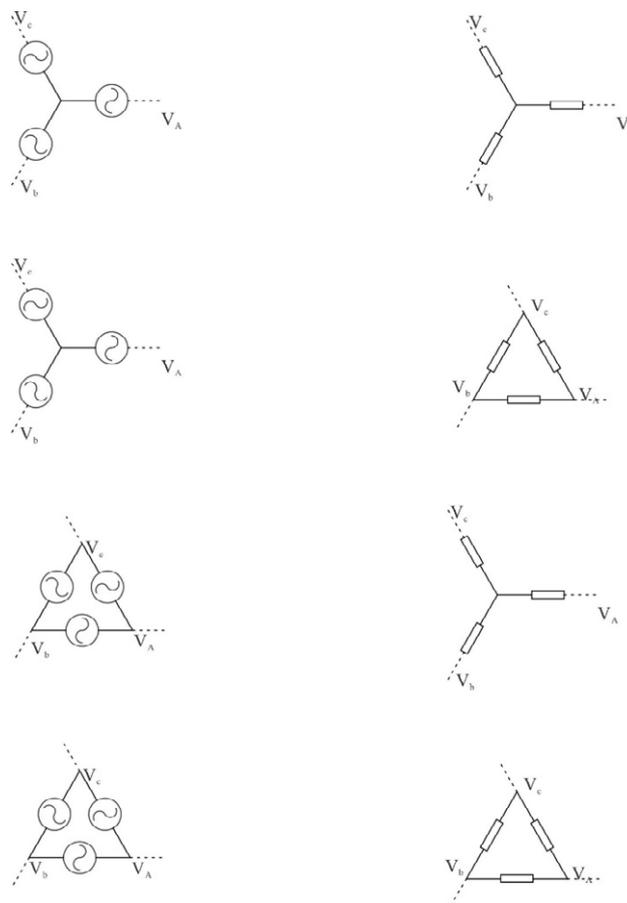
A equação (6.48) é válida tanto para tensões quanto para correntes e sua aplicação não se restringe apenas ao domínio da frequência mas também ao do tempo¹. Ou seja:

$$v_a(t) + v_b(t) + v_c(t) = 0 \quad (6.49)$$

¹ Sendo os sinais de tensão – ou de corrente – no tempo expressos como $v_a(t) = V_m \sin(\omega t)$, $v_b(t) = V_m \sin(\omega t - 2\pi/3)$ e $v_c(t) = V_m \sin(\omega t + 2\pi/3)$, a soma temporal dos mesmos equivale a $v_{abc}(t) = V_m \sin(\omega t) + V_m \sin(\omega t - 2\pi/3) + V_m \sin(\omega t + 2\pi/3) = V_m \sin(\omega t) + V_m \sin(\omega t) \cos(2\pi/3) - \sin(2\pi/3) \cos(\omega t) + V_m \sin(\omega t) \cos(2\pi/3) + \sin(2\pi/3) \cos(\omega t) = 0$

Uma vez que foram apresentadas as definições fasoriais e temporais, convém que façamos algumas observações importantes a respeito dos circuitos trifásicos, notadamente no que se refere às conexões entre a fonte e a carga. Os sistemas trifásicos podem ser do tipo Y – Y, Y – Δ , Δ – Y ou Δ – Δ . Para que você tenha uma noção plena do que estamos abordando, verifique a Figura 6.27. Atente para a conexão da fonte trifásica em Y. Esta conexão permite a utilização do centro da estrela, criando o sistema trifásico a quatro fios: 3 fases + neutro. É esse sistema trifásico a quatro fios que gera os sistemas monofásicos para alimentação da energia elétrica das nossas residências.

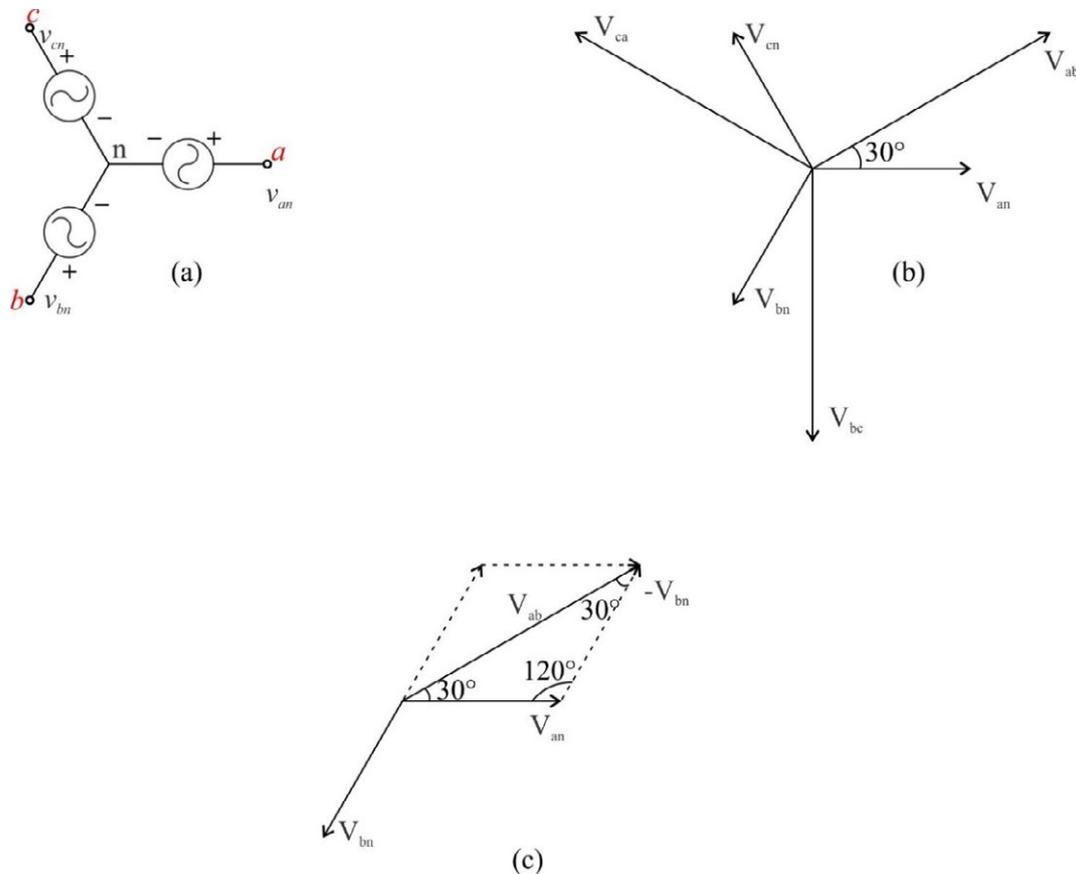
Figura 6.27 – Conexões entre fonte e carga em circuitos trifásicos



6.9.2 Grandezas de fase e de linha

Quando estamos lidando com circuitos trifásicos, devemos fazer uso de uma nomenclatura própria a estes atribuída. Dois conceitos importantes se referem ao valor de **fase** e ao valor de **linha**. Na Figura 6.28, são mostrados os diagramas fasoriais onde estão expostos os valores de fase e de linha. Observe, nesta figura, a defasagem natural entre os dois fasores de fase e de linha. As tensões de fase estão atrasadas de 30° em relação às tensões de linha.

Figura 6.28 – Relações entre grandezas de fase e de linha



Quando estamos trabalhando com uma grandeza de fase, estamos dizendo que o valor de trabalho envolve apenas a contribuição de uma única fase. Quando estamos trabalhando com um valor de linha, estamos afirmando que aquele valor envolve a contribuição de duas fases. Na Figura 6.28 (a) é mostrada uma fonte de tensão trifásica equilibrada, ligada em Y, com um ponto central denominado **n** – a definição matemática entre valores de fase e de linha passa, em primeiro lugar, pelo entendimento do significado dos subíndices da Figura 6.28. Cada subíndice implica uma subtração entre um ponto e outro do circuito. Observe, por exemplo, na Figura 6.28 (a), a tensão v_{an} . Esta significa, na verdade, a diferença de tensão entre o ponto **a** – grafado em vermelho, para indicar o ponto do terminal da fonte que estamos analisando – e o ponto **n**, ou seja:

$$v_{an} = v_a - v_n \quad (6.50)$$

Quando as grandezas são tratadas entre dois terminais de fase distintos, teremos uma tensão de linha. Para o fasor representativo da tensão entre os terminais **a** e **b**, temos:

$$v_{ab} = v_{an} - v_{bn} \quad (6.51)$$

$$v_{ab} = v_a - v_n - (v_b - v_n) \quad (6.52)$$

$$v_{ab} = v_a - v_b \quad (6.53)$$

Há uma correlação entre os módulos e os ângulos e entre os valores de fase e os valores de linha. Do ponto de vista das tensões, por exemplo, verificamos que as tensões de linha estão adiantadas em relação às tensões de fase em exatamente 30° , como já mencionado anteriormente – veja a Figura 6.28 (b). Com relação ao valor das amplitudes de uma tensão de linha em relação a uma tensão de fase, podemos estudá-las considerando a Figura 6.28 (c). Considerando a amplitudes dos fasores V_{an} e V_{bn} como sendo iguais a V e utilizando a lei dos cossenos², podemos concluir que a amplitude da tensão de linha V_{ab} é igual a:

$$V_{ab} = \sqrt{V_{an}^2 + V_{bn}^2 - 2V_{an}V_{bn} \cos 120^\circ} \quad (6.54)$$

$$V_{ab} = \sqrt{V^2 + V^2 - 2VV \cos 120^\circ} \quad (6.55)$$

$$V_{ab} = \sqrt{V^2 + V^2 + V^2} \quad (6.56)$$

$$V_{ab} = \sqrt{3}V \quad (6.57)$$

A expressão (6.57) afirma que o módulo da tensão de linha é $\sqrt{3}$ vezes maior que o módulo da tensão de fase. Alguns estados do Brasil possuem tensão de linha 380 V (ver Tabela 7.1). O leitor poderia determinar a tensão de fase nesses estados?

6.9.3 Cargas ligadas em Y e Δ

Após expor as relações entre grandezas de linha e de fase utilizando fasores, é interessante contextualizar essas definições nas duas formas de conexões de carga: Y ou em Δ . Para isso, observe a Figura 6.29 a seguir.

Em cargas conectadas em Y, Figura 6.28 (a), as tensões de fase (medidas entre a extremidade dos terminais e o ponto m) são iguais às tensões de fase da rede³. Os módulos das tensões de linha da carga são iguais às tensões de linha da rede. As correntes de fase de uma carga em Y são as mesmas que as correntes provenientes da rede. Expressando matematicamente essas afirmações, teremos:

$$v_{amY} = v_{an} \quad (6.58)$$

$$v_{acY} = v_{ac} \quad (6.59)$$

$$i_{anY} = i_{an} \quad (6.60)$$

² A lei dos cossenos é utilizada em triângulos para que seja possível determinar os valores dos lados de um triângulo, como na Figura 6.28 (c). A lei dos cossenos estabelece que seja um triângulo de lados a , b e c e considerando o ângulo oposto ao lado c como sendo igual a θ , teremos que o lado c será regido por $c = \sqrt{a^2 + b^2 - 2ab \cos \theta}$

³ Isso considerando que não existe diferença entre as tensões do ponto n da rede e do ponto m da carga.

Observe que as cargas conectadas em Y possuem o mesmo valor (z), tratando-se, portanto, de uma carga equilibrada. Admitindo que o circuito é equilibrado, a soma das correntes nos pontos **n** ou **m** deve ser igual a zero, ou seja:

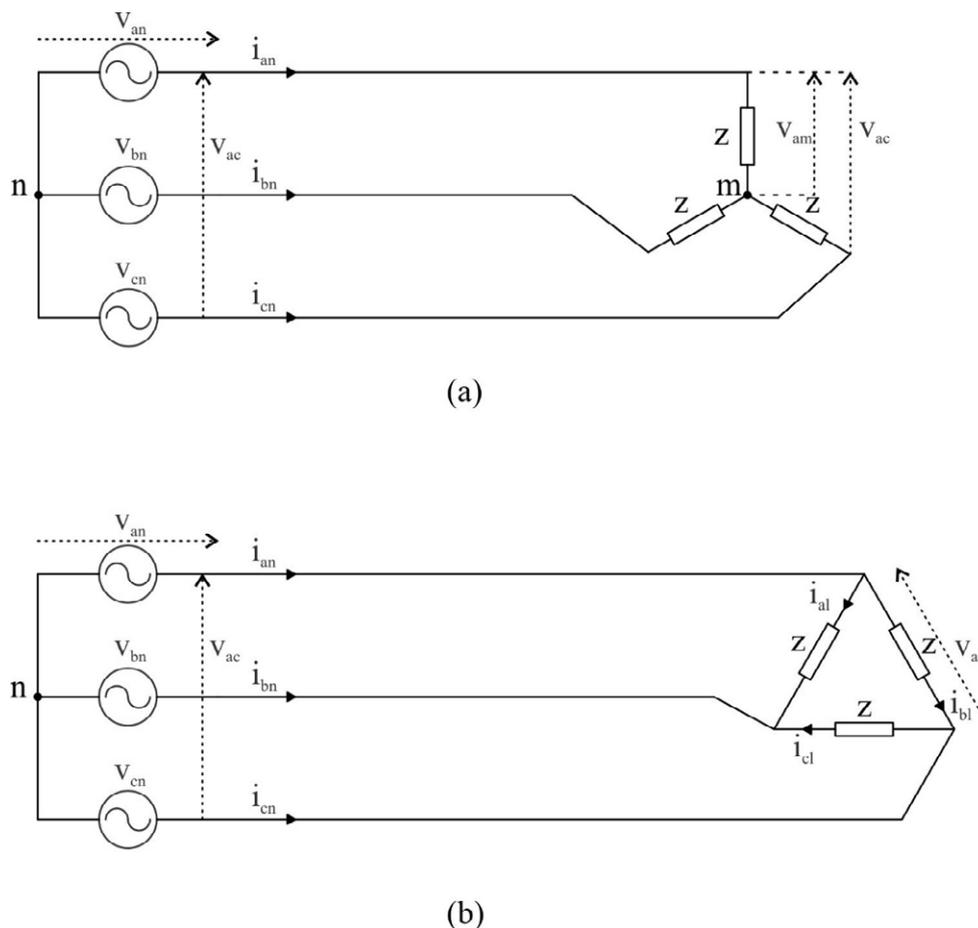
$$i_{an} + i_{cn} + i_{cn} = 0 \quad (6.61)$$

Para as cargas conectadas em Δ , temos outras relações: veja que a tensão em cada fase de uma carga conectada em triângulo é igual à tensão de linha da fonte de alimentação, mas o mesmo não ocorre com as correntes que circulam em cada fase. Os módulos das correntes de fase de uma carga conectada em Δ são iguais aos módulos das correntes de linha – agora as correntes de linha são aquelas que estão vindo da fonte de alimentação trifásica – dividido por $\sqrt{3}$. Expressando matematicamente essas afirmações, teremos:

$$v_{ac\Delta} = v_{ac} \quad (6.62)$$

$$i_{a1\Delta} = \frac{i_{an}}{\sqrt{3}} \quad (6.63)$$

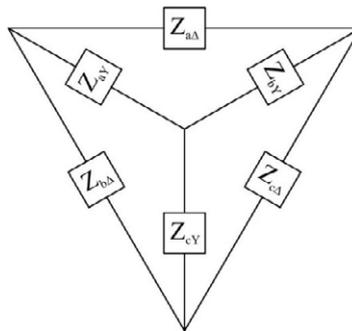
Figura 6.29 – Relações de tensão e corrente em cargas conectadas em Y (a) ou em Δ (b)



6.9.4 Transformações de impedâncias Y-Δ

Muitas vezes quem analisa um circuito trifásico observa a necessidade de efetuar uma transformação de impedâncias da conexão Δ para a Y e vice-versa. Essa necessidade advém da observação de que, com a transformação entre as impedâncias, haverá uma maior facilidade no processo de analisar o circuito. Observe a Figura 6.30.

Figura 6.30 – Transformação Y-Δ



Suponha que seja necessária uma transformação de um conjunto de impedâncias conectadas em Δ para o seu equivalente em Y. Isso pode ser facilmente alcançado com a utilização das expressões (6.64)-(6.66) a seguir:

$$Z_{aY} = \frac{Z_{a\Delta}Z_{b\Delta}}{Z_{a\Delta} + Z_{b\Delta} + Z_{c\Delta}} \quad (6.64)$$

$$Z_{bY} = \frac{Z_{a\Delta}Z_{c\Delta}}{Z_{a\Delta} + Z_{b\Delta} + Z_{c\Delta}} \quad (6.65)$$

$$Z_{cY} = \frac{Z_{b\Delta}Z_{c\Delta}}{Z_{a\Delta} + Z_{b\Delta} + Z_{c\Delta}} \quad (6.66)$$

Observe que as impedâncias em Y são obtidas multiplicando-se as duas impedâncias adjacentes em Δ e dividindo-se o resultado pela soma de todas as impedâncias conectadas em Δ.

Agora admita que você está diante da necessidade de transformar uma impedância conectada em Y para o seu equivalente em Δ. As expressões que você deve utilizar são (6.67)-(6.69):

$$Z_{a\Delta} = \frac{Z_{aY}Z_{bY} + Z_{aY}Z_{cY} + Z_{bY}Z_{cY}}{Z_{cY}} \quad (6.67)$$

$$Z_{b\Delta} = \frac{Z_{aY}Z_{bY} + Z_{aY}Z_{cY} + Z_{bY}Z_{cY}}{Z_{bY}} \quad (6.68)$$

$$Z_{c\Delta} = \frac{Z_{aY}Z_{bY} + Z_{aY}Z_{cY} + Z_{bY}Z_{cY}}{Z_{aY}} \quad (6.69)$$

De forma simplificada, a obtenção de impedâncias Δ de um conjunto de impedâncias conectadas em Y é baseada na multiplicação dois a dois das impedâncias em Y dividida para impedância oposta – conectada em Y – à que se quer obter na conexão em Δ .

As equações (6.64)-(6.69) são utilizadas para situações em que as cargas são equilibradas e desequilibradas, entretanto, se as impedâncias são de uma carga equilibrada, ou seja, todas exatamente iguais em módulo e ângulo de fase, a transformação entre as impedâncias é simples e direta. Com poucas manipulações algébricas pode-se chegar à expressão (6.70):

$$Z_{jY} = \frac{Z_{\Delta}}{3} \quad (6.70)$$

Onde $j = a, b, c$.

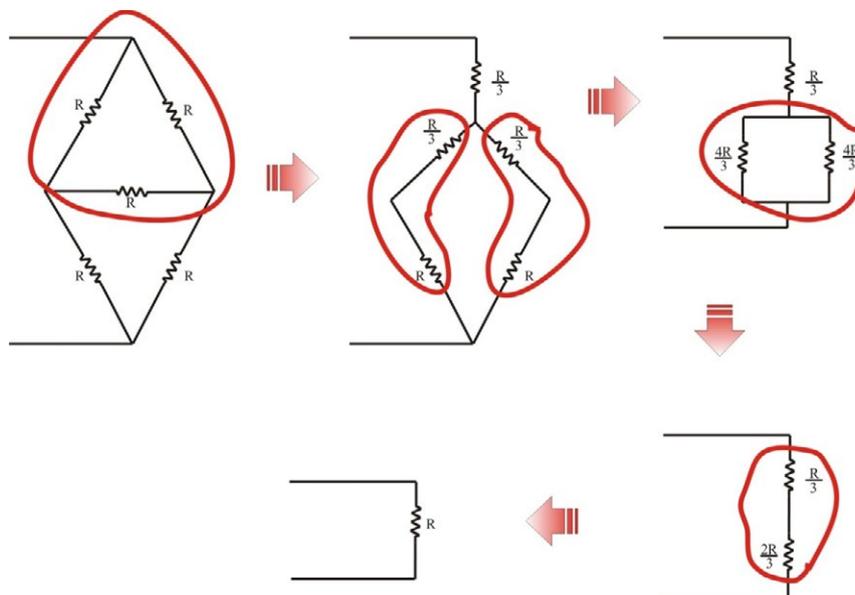
Exemplo 6.3

Determinar a resistência equivalente de um losango com interconexão central, visto na Figura 6.31, com resistências iguais em todas as arestas.

Solução:

Na Figura 6.31, o delta traçado é transformado em estrela equivalente, simplificando a associação. No próximo passo, é determinada a resistência em série nos dois traçados. No terceiro passo, a associação em paralelo é determinada e, no último passo, uma associação em série é realizada. Toda associação é, portanto, equivalente a um único resistor. Então, por que utilizar associação se bastava um resistor para fazer o mesmo efeito? Muitas vezes os resistores são utilizados para produção de calor. Uma associação do exemplo, que utiliza 5 resistores na formação física mostrada, pode produzir calor muito mais uniforme que um único resistor. Em outras palavras, com as associações se busca uma dissipação de calor mais eficiente.

Figura 6.31 – Exemplo 6.3 de simplificação com transformação estrela-triângulo de impedâncias



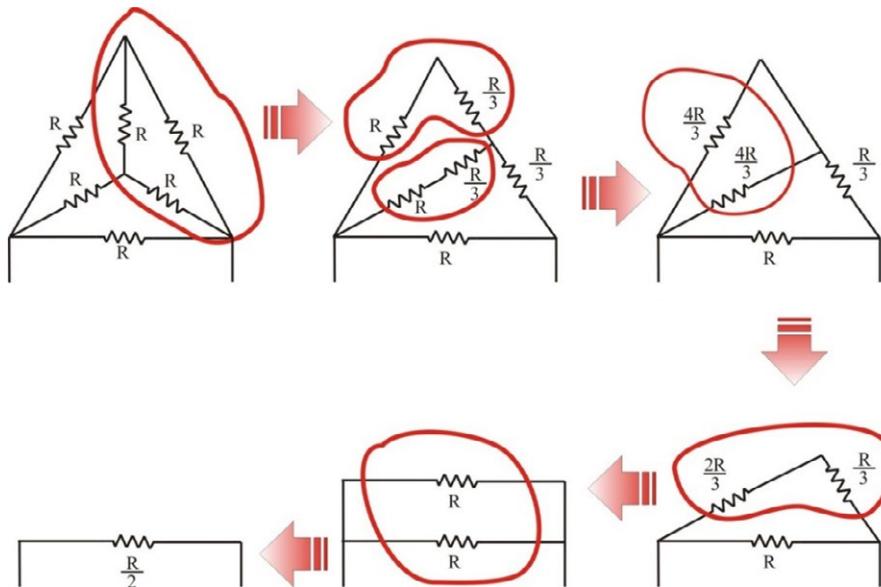
Exemplo 6.4

Determinar a resistência equivalente de qualquer aresta de uma pirâmide feita de resistores iguais, de valor R em cada aresta, conforme apresentado na Figura 6.32.

Solução:

Transformar uma face delta em estrela, simplificando a estrutura. Acompanhe a sequência na Figura 6.32.

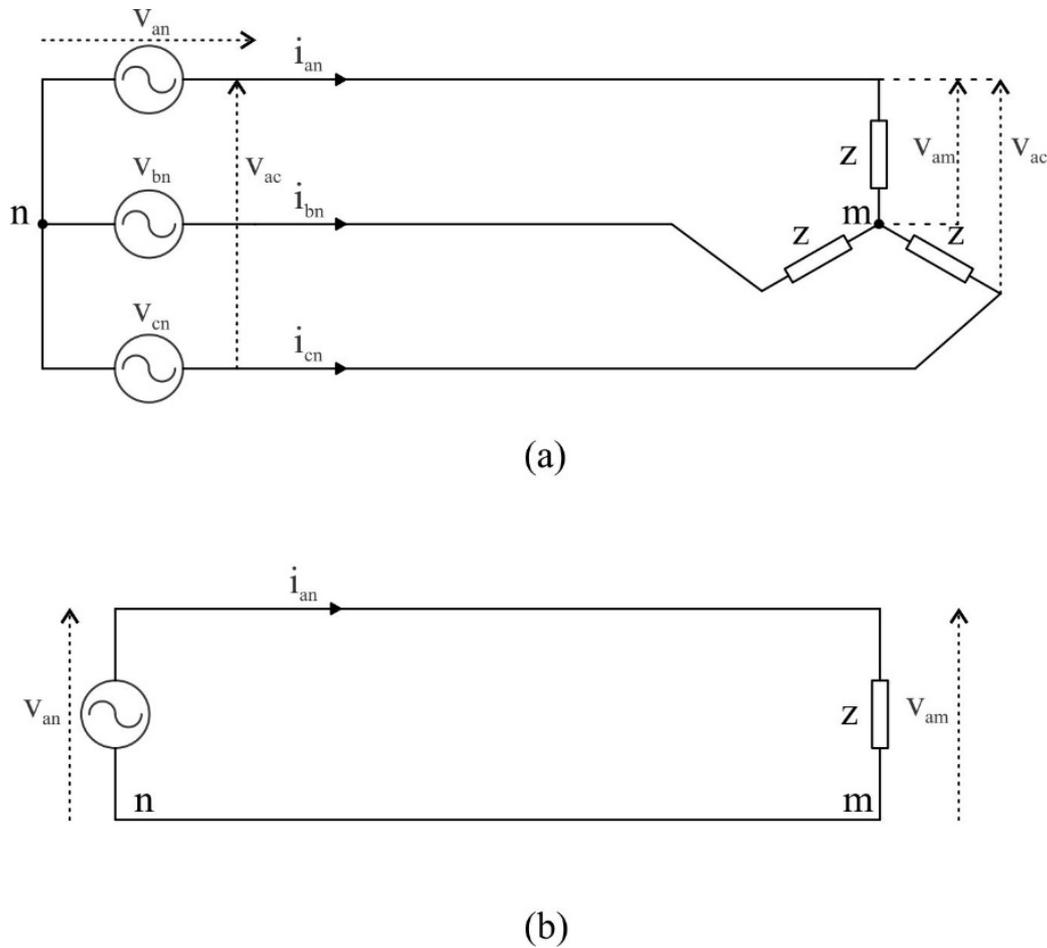
Figura 6.32 – Exemplo 6.4 de simplificação com transformação estrela-triângulo de impedâncias



6.9.5 Circuito monofásico equivalente

O circuito trifásico está conectado em Y-Y quando a sua fonte de alimentação (tensão ou corrente) está conectado em Y assim como sua carga. Um exemplo desse tipo de conexão pode ser visto na Figura 6.33 (a). Quando não temos acesso ao neutro da carga (ponto m) nem ao neutro da rede (ponto n) e quando o circuito é equilibrado, existe um recurso chamado de *circuito monofásico equivalente* que pode ser utilizado para simplificar os cálculos. Trata-se, portanto, de um procedimento de simplificação que consiste em analisar o circuito trifásico em apenas uma das fases e depois efetuar os deslocamentos angulares equivalentes para as demais fases do circuito.

Figura 6.33 – Circuito trifásico Y-Y (a) e seu equivalente monofásico (b) tomado para a fase a

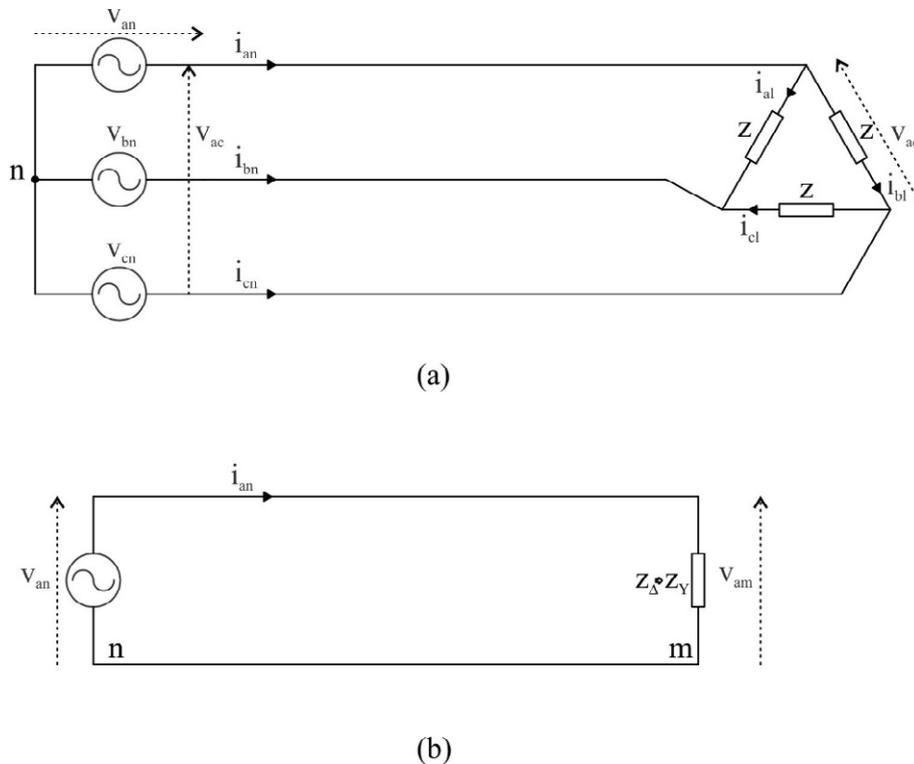


Admitindo-se que o circuito é equilibrado, o cálculo da corrente i_n pode ser efetuado aplicando-se a lei de Ohm no circuito monofásico equivalente, ou seja:

$$i_n = \frac{v_{an}}{Z} \quad (6.71)$$

As demais correntes – as das fases b e c – podem ser obtidas facilmente porque possuirão as mesmas amplitudes, com a diferença dos ângulos de cada uma. O mesmo princípio pode ser aplicado para o caso Y- Δ , em que o circuito equivalente monofásico pode ser obtido após a obtenção da impedância equivalente em Y, obtida da impedância em Δ . Para uma melhor exemplificação, observe a Figura 6.34.

Figura 6.34 – Análise de um circuito conectado em Y-D (a) e seu circuito equivalente monofásico (b)



É usual, nos sistemas trifásicos, que sejam fornecidos os valores de tensão de linha nos equipamentos e informações sobre possíveis problemas. Caso seja diferente, haverá uma notificação sobre a circunstância do fornecimento dos valores de fase.

Como exemplos para que os conceitos discutidos sejam fixados, acompanhe os exemplos 6.2 e 6.3 a seguir.

Exemplo 6.5

Sendo um sistema trifásico com sequência de fases abc que alimenta uma impedância equilibrada com um valor (por fase) de $z = (5 + 2j)\Omega$, admita que as impedâncias estão conectadas em Y e que a fonte trifásica possui um valor RMS de 380 V com frequência de 60 Hz. Internamente esta fonte está conectada em Y. Isto posto, calcule os valores das correntes de cada uma das três fases do sistema.

Solução:

Considerando o conceito de circuito equivalente monofásico tomado anteriormente e do conceito de fasor, também explorado anteriormente neste mesmo capítulo, iremos calcular o valor da corrente na fase **a**, por exemplo. Considerando que a tensão de linha foi fornecida (380 V), podemos calcular a tensão de fase RMS como sendo igual a:

$$v_{an} = \frac{380}{\sqrt{3}} \cong 220 \text{ V}$$

Sabendo que o circuito equivalente é tal como o da Figura 6.35 a seguir, podemos calcular a corrente i_{an} como sendo igual a:

$$i_{an} = \frac{220}{5 + 2j} \cong (37,93 - 15,17j) \cong 40,85 \angle -21,80^\circ \text{ A}$$

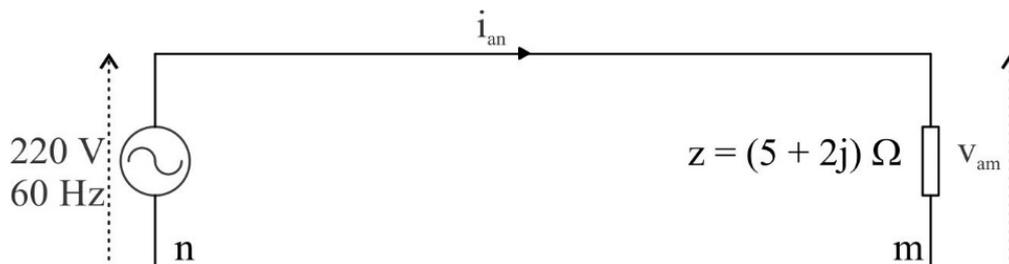
O valor das correntes das fases **b** e **c** são obtidas facilmente. A corrente da fase **b** está 120° atrás da corrente da fase **a**, ou seja:

$$i_{bn} \cong 40,85 \angle -141,80^\circ \text{ A}$$

Já a corrente da fase **c** está atrasada em relação à fase **a** de 240° , logo:

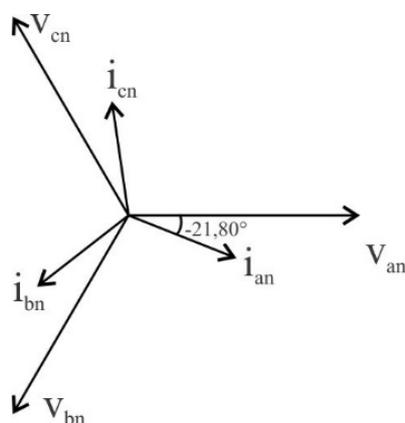
$$i_{cn} \cong 40,85 \angle -261,80^\circ \text{ A}$$

Figura 6.35 – Circuito monofásico equivalente do sistema proposto no exemplo 6.3



Após a solução, é interessante perceber como estão dispostas, em diagrama fasorial, as correntes e as tensões. Isso é exibido no diagrama fasorial da Figura 6.36.

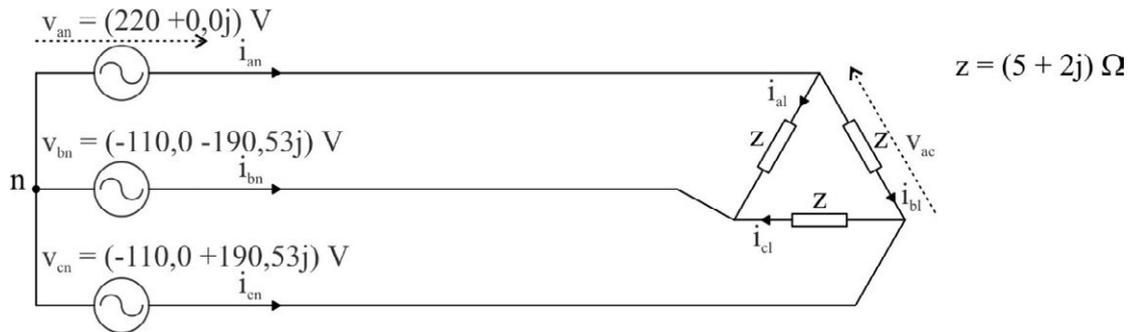
Figura 6.36 – Tensão e corrente do circuito do exemplo 6.3



Exemplo 6.6

Considere o mesmo circuito do exemplo 6.3, mas admita que a carga está conectada em Δ . Calcule as correntes em cada fase dessa carga, mas também calcule as correntes provenientes de linha. Para acompanhar a solução, veja a Figura 6.37.

Figura 6.37 – Sistema considerado no exemplo 6.4



Solução:

A corrente em uma das fases, por exemplo, a corrente i_{a1} , pode ser calculada de modo similar ao que foi feito no exemplo anterior. Neste caso, se admitirmos que a tensão de linha $v_{ab} = 380 \angle 0^\circ \text{ V}$ é a nossa referência, veremos que a corrente considerada pode ser calculada como:

$$i_{a1} = \frac{380}{5 + 2j} \cong (65,52 - 26,21j) \cong 70,56 \angle -21,80^\circ \text{ A}$$

A corrente i_{an} pode ser calculada multiplicando-se o valor do módulo de i_{a1} por $\sqrt{3}$, além de defasar de 30° o valor do seu ângulo, ou seja:

$$i_{an} = 70,56 \times \sqrt{3} \angle (-21,80 - 30,0) \cong 122,21 \angle -51,80^\circ \text{ A}$$

Os valores de i_{bn} e i_{cn} são determinados defasando i_{an} de 120° e 240° , respectivamente.

6.9.6 Potências em sistemas trifásicos

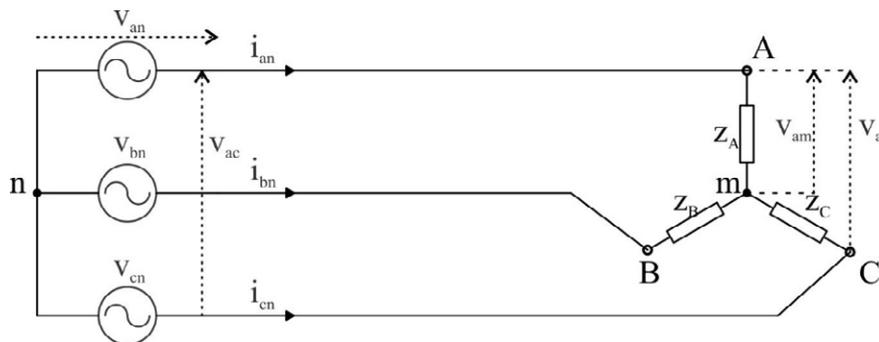
Considerando uma carga genérica, equilibrada ou não, vamos estabelecer as relações para os cálculos de potências em circuitos trifásicos, admitindo algumas situações, com o objetivo de facilitar a análise.

Admita que essa análise será feita considerando uma carga – com suas respectivas convenções de pontes, tensões e fases – conectada em Y, conforme exibido na Figura 6.38.

Começemos pelo cálculo da potência ativa – potência média – da fase A (ponto A da figura). De acordo com o que foi mostrado na seção 6.8.2 e na equação (6-30), a potência média pode ser calculada utilizando-se os módulos das tensões e correntes do sistema, de acordo com a seguinte expressão:

$$P_A = |v_{an}| |i_{an}| \cos(\theta_{van} - \theta_{ian}) \quad (6.72)$$

Figura 6.38 – Carga equilibrada utilizada para exemplificação dos cálculos da potência ativa em sistemas trifásicos equilibrados e desequilibrados



Observe que θ_{van} e θ_{ian} são os ângulos da tensão v_{an} e da corrente i_{an} respectivamente. Se o mesmo for feito para as fases B e C, teremos:

$$P_B = |v_{bn}| |i_{bn}| \cos(\theta_{vbn} - \theta_{ibn}) \quad (6.73)$$

$$P_C = |v_{cn}| |i_{cn}| \cos(\theta_{vcn} - \theta_{icn}) \quad (6.74)$$

Se admitirmos que o sistema seja equilibrado, teremos que:

$$V_f = |v_{an}| = |v_{bn}| = |v_{cn}| \quad (6.75)$$

$$I_f = |i_{an}| = |i_{bn}| = |i_{cn}| \quad (6.76)$$

$$\theta = \theta_{van} - \theta_{ian} = \theta_{vbn} - \theta_{ibn} = \theta_{vcn} - \theta_{icn} \quad (6.77)$$

Podemos admitir que a potência em cada fase será igual a:

$$P = P_A = P_B = P_C = V_f I_f \cos(\theta) \quad (6.78)$$

Logo, a potência ativa total fornecida à carga trifásica deverá ser igual a:

$$P = 3V_f I_f \cos(\theta) \quad (6.79)$$

Em outras situações, temos a necessidade de expressar a potência média em termos da tensão de linha e da corrente de linha; se a notação utilizada para tensão e corrente de linha

for igual a V_L e I_L , respectivamente, podemos expressar a potência média analisando grandezas de linha⁴ por:

$$P = \sqrt{3}V_L I_L \cos(\theta) \quad (6.80)$$

Assumindo as mesmas definições, a potência reativa trifásica pode ser calculada utilizando-se valores de fase ou de linha, de acordo com as expressões (6.81) e (6.82).

$$Q = 3V_f I_f \text{sen}(\theta) \quad (6.81)$$

$$Q = \sqrt{3}V_L I_L \text{sen}(\theta) \quad (6.82)$$

Já a potência aparente pode ser calculada em termos dos valores de fase e de linha de modo bastante similar, de acordo com as expressões (6.83) e (6.84).

$$S = 3V_f I_f \quad (6.83)$$

$$S = \sqrt{3}V_L I_L \quad (6.84)$$

Para as cargas ligadas em Δ , considerações semelhantes são feitas, porém, levando-se em consideração que, para uma carga conectada desta forma, as suas tensões de fase corresponderão às tensões de linha da fonte de alimentação. Se forem aplicados os mesmos critérios de simplificação assumidos para as cargas conectadas em Y, chegar-se-á à conclusão de que ***em cargas equilibradas, independentemente de sua forma de conexão com a rede, a potência ativa por fase é igual ao produto do valor eficaz da tensão de fase pela corrente eficaz de fase e pelo cosseno do ângulo entre a tensão e a corrente***. A potência ativa total fornecida a uma carga conectada em Δ também é igual ao que foi expresso na equação (6.79) ou na equação (6.80). As mesmas considerações podem ser feitas quanto às potências reativa e aparente; suas equações permanecem as mesmas (6.81)-(6.84).

Exemplo 6.7

A descrição da placa de uma carga trifásica equilibrada possui as seguintes informações:

P= 10 kW

V (linha) = 380 V

Fator de potência = 0,85

Determine a corrente de alimentação desta carga.

Solução:

Temos

$$P = \sqrt{3}V_L I_L \cos(\theta)$$

⁴ Se a expressão for em termos dos valores de linha, observe que $P = 3 \left(\frac{V_L}{\sqrt{3}}\right) I_L \cos(\theta) = 3\sqrt{3} \frac{V_L}{\sqrt{3}\sqrt{3}} I_L \cos(\theta) = \sqrt{3}V_L I_L \cos(\theta)$

Logo

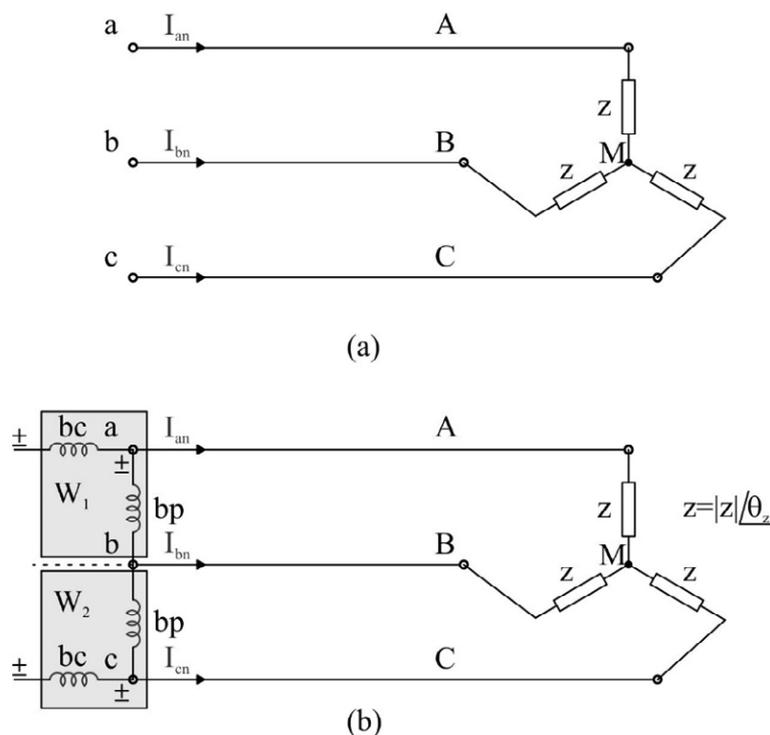
$$I_L = \frac{P}{\sqrt{3}V_L \cos(\theta)} = \frac{10000}{\sqrt{3} 380 0,85} = 17,87A$$

Essa corrente de alimentação da carga é de extrema importância, pois é utilizada para dimensionar os condutores de alimentação da carga e a proteção, seja disjuntor ou fusível.

6.9.7 Medição de potência média em circuitos trifásicos utilizando o método dos dois wattímetros

O wattímetro é um instrumento de medição constituído de duas bobinas: uma bobina de corrente (**bc**) e uma bobina de potencial (**bp**), como foi abordado no Capítulo 2. A bobina de corrente é conectada em série com a fase cuja potência se quer medir, enquanto que a bobina de potência é colocada em paralelo com a referida fase. Como serão utilizados apenas dois wattímetros, uma das fases do sistema trifásico será tomada como referência para as bobinas de potencial. A pergunta que se faz, a princípio, é: Como apenas dois instrumentos podem fornecer a potência média em um sistema trifásico? Outra pergunta derivada da primeira é: Será que a potência fornecida pela leitura é igual à potência trifásica total? Para continuar a leitura desta subsecção, considere o circuito mostrado na Figura 6.39.

Figura 6.39 – Disposição dos wattímetros para exemplificação do método dos dois wattímetros



Os wattímetros possuem uma indicação de polaridade nas bobinas de corrente (**bc**) e nas bobinas de potencial (**bp**). Os wattímetros são projetados para que a deflexão na sua escala seja proporcional ao produto dos valores eficazes da tensão e da corrente e do cosseno do ângulo entre essas duas grandezas. A direção da deflexão do ponteiro depende do sentido instantâneo da corrente na bobina de corrente e da polaridade da tensão sobre a bobina de potencial; como há uma dependência do sentido da deflexão e da polaridade, em cada bobina existe uma indicação de polaridade (\pm). A deflexão ocorrerá no sentido de crescimento da escala em duas situações:

- Quando o terminal com indicação de polaridade estiver do lado da fonte de alimentação do circuito;
- Quando o terminal com indicação de polaridade da bobina de potencial estiver ligado à mesma fase que a bobina de corrente.

Observando a Figura 6.39, você perceberá que a deflexão dos ponteiros dos dois wattímetros (chamados de W_1 e W_2) será no sentido de crescimento da escala.

Considerando as convenções de pontos no circuito (a,A – b,B – c,C) e que a sequência de fases da fonte é positiva (sequência abc), a leitura do primeiro wattímetro deverá ser igual a:

$$W_1 = |V_{AB}| |I_{an}| \cos(\theta_1) \quad (6.85)$$

Atente que θ_1 é o ângulo entre a tensão V_{AB} e a corrente I_{an} . De modo semelhante, a leitura do segundo wattímetro deverá ser:

$$W_2 = |V_{CB}| |I_{cn}| \cos(\theta_2) \quad (6.86)$$

As mesmas observações são indicadas para o ângulo θ_1 são aplicadas para θ_2 . Para uma sequência de fases positiva, o ângulo de fase – ângulo entre a tensão e a corrente de fase –, em termos do ângulo da impedância θ_z , pode ser expresso do seguinte modo:

$$\theta_1 = \theta_z + 30^\circ \quad (6.87)$$

$$\theta_2 = \theta_z + 30^\circ \quad (6.88)$$

Ao substituírmos as relações (6.87)-(6.88) nas equações (6.84)-(6.85) e logo em seguida somarmos W_1 e W_2 , teremos que a potência será igual a:

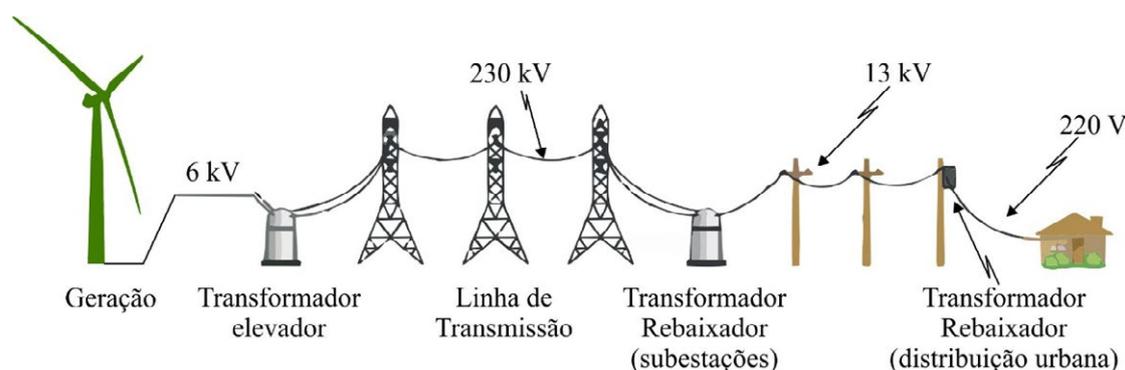
$$P_T = \sqrt{3} V_L I_L \cos(\theta_z)$$

ou seja, a soma das potências dos dois wattímetros corresponde à potência total do sistema trifásico.

6.10 Introdução aos sistemas elétricos de potência

Os conceitos, por vezes abstratos, vistos neste capítulo podem levá-lo a pensar na possibilidade de sua não aplicação no nosso dia a dia. Eles estão, entretanto, bem presentes no nosso cotidiano. Os sistemas elétricos de potência, que são exemplos de sistemas de corrente alternada, possuem a função de trazer a energia desde a geração até os consumidores finais. Tais sistemas são constituídos pelos subsistemas (geração, transmissão e distribuição), conforme exibido na Figura 6.40.

Figura 6.40 – Sistema elétrico de potência



Tais subsistemas são basicamente os seguintes:

- Geração – onde os processos de conversão de energia ocorrem, obtendo-se, como resultado, a energia elétrica;
- Transmissão – onde ocorre o condicionamento da potência e tensão geradas para valores necessários à transmissão. Geralmente esse subsistema consiste de transformadores de elevação e linhas de transmissão em tensões de 69 kV a 1000kV;
- Distribuição – onde ocorre o condicionamento da potência e tensão transmitidas para valores necessários e compatíveis com a distribuição. Esse sistema, geralmente, consiste em subestações abaixadoras, postes em 13 kV e transformadores abaixadores para tensões em 220/127 V.

O tratamento de tais sistemas utiliza fasores para seu processamento. As distribuidoras de energia necessitam manter a tensão, fornecida a seus clientes, em valores fixos; evidentemente algumas variações são permitidas, porém, para evitar uma série de problemas, essas variações são padronizadas. Suponha que, em um determinado país essa variação seja de $\pm 5,8\%$. Uma tensão de 220 V, por exemplo, poderia variar entre 207 e 233 V. Uma outra característica bem interessante dos sistemas de potência é que as potências demandadas pelas cargas – estados, cidades ou indústrias – variam durante o dia e as estações do ano. Isso porque a dinâmica de atividades sociais é dependente das horas dos dias e, claro, das estações do ano (horários comerciais, tempo quente, tempo frio, etc.).

Como um exemplo de aplicação prática de todos os conceitos abordados neste capítulo, vejamos um problema que exemplifica essas questões de forma direta e bastante próxima do real.

Exemplo 6.8

Seja um circuito de potência, o qual representa uma subestação de um sistema de distribuição de energia. Admita que o sistema seja equilibrado e que a tensão de linha na subestação seja de 13,8 kV. Considere que a impedância de fase na linha de transmissão seja igual a $z_d = (0,6 + 4,8j) \Omega$. A carga na subestação no período vespertino, às 15h, em um período próximo do verão, foi medida, e seu resultado, em termos das potências ativa e reativa, foi o seguinte: 3,6 MW e 3,6 MVar. Use a tensão fase neutro como referência, para verificar se a tensão fornecida (gerada) está acima ou abaixo do permitido por norma, considerando que as variações máximas devem ser de $\pm 5,8\%$.

Solução:

Vamos utilizar o circuito monofásico equivalente para resolver este problema. Sendo assim, considerando o sistema trifásico e equilibrado, teremos que a potência complexa monofásica será igual a:

$$S_{1\phi} = (1,2 + 1,2j) \times 10^6$$

Como foi pedido que tomássemos a tensão de fase como tensão de referência, podemos obter o conjugado da corrente de linha, que deverá ser igual a:

$$\frac{13800}{\sqrt{3}} I^* = (1,2 + 1,2j) \times 10^6$$

$$I^* = (150,61 + 150,61j) A$$

Assim, a corrente de linha deverá ser igual a:

$$I = (150,61 - 150,61j) A$$

Como dispomos da impedância da linha de distribuição, podemos calcular qual será o valor da tensão de fase na entrada da subestação, ou seja:

$$V_{an} = \frac{13800}{\sqrt{3}} + (0,6 + 4,8j)(150,61 - 150,61j)$$

$$V_{an} = (8.780,7 + 632,6j) V$$

Ao obter o módulo dessa tensão verificamos que:

$$|V_{an}| = 8.803,5 V$$

A tensão de linha na entrada da geração, portanto, deverá ser igual a:

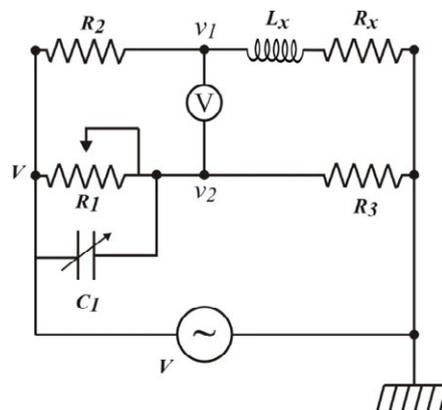
$$V_L = 15.248 V$$

Isso indica o alto valor de tensão e também a necessidade de se tomarem medidas para reduzir essa tensão a níveis adequados, uma vez que uma tensão de linha com essa magnitude infringe a normatização de $\pm 5,8\%$. Problemas como este estão ligados à qualidade do fornecimento de energia. Causas e efeitos relacionados a problemas de qualidade de energia serão discutidos no Capítulo 10.

Ponte de Maxwell – Aplicação do divisor de tensão em CA

A ponte de Maxwell, vista na Figura 6.41, é utilizada para medir indutâncias e resistências – na representação da Figura 6.41, R_x e L_x . Quando a ponte está equilibrada, quando as tensões v_1 e v_2 são iguais, duas relações são determinadas: uma para L_x e outra para R_x . Para o equilíbrio da ponte, as partes imaginárias e reais de v_1 e v_2 devem ser iguais.

Figura 6.41 – Ponte de Maxwell para medição de resistências e indutâncias



A tensão v_1 em relação à referência, levando em consideração que $\omega = 2\pi f$, é expressa em (6.89).

$$v_1 = \frac{R_x + \omega L_x j}{R_x + R_2 + \omega L_x j} V \quad (6.89)$$

A tensão v_2 em relação à referência, onde C_1 está em paralelo com R_1 , é expressa em (6.90).

$$v_2 = \frac{R_3}{R_3 + \frac{\frac{R_1}{\omega C_1 j}}{R_1 + \frac{1}{\omega C_1 j}}} V \quad (6.90)$$

Igualando v_1 e v_2 , quando a ponte está equilibrada, e manipulando essas tensões algebricamente, tem-se a expressão (6.91). Com a expressão (6.91), você deve encontrar duas expressões: uma da igualdade das partes reais e outra da igualdade das partes imaginárias. Da igualdade das partes imaginárias, obtém-se (6.92), que é a relação de obtenção da indutância. Da igualdade das partes reais, obtém-se (6.93), que é a relação de obtenção da resistência, que guarda semelhança com a relação da ponte de Weathstone em corrente contínua.

$$(R_1 R_3 \omega C_1 j + R_3)(R_x + R_2 + \omega L_x j) = (\omega L_x j + R_x)(R_3 + R_1 + R_3 R_1 \omega C_1 j) \quad (6.91)$$

$$L_x = R_2 R_3 C_1 \quad (6.92)$$

$$R_x = \frac{R_2 R_3}{R_1} \quad (6.93)$$

Exemplo 6.9

Uma ponte de Maxwell possui resistências fixas $R_2 = 100 \Omega$ e $R_3 = 100 \Omega$. A ponte equilibrou para $C_1 = 5 \mu\text{F}$ e $R_1 = 500 \Omega$. Determine o valor da impedância a ser medida.

Solução:

Determinação de L_x :

$$L_x = 100 \times 100 \times 5 \times 10^{-6} = 0,05\text{H} = 50\text{mH}$$

Determinação de R_x

$$R_x = \frac{100 \times 100}{500} = 20\Omega$$

Exercícios propostos

6.1 Para os três conjuntos de tensões instantâneas a seguir, determine qual é a sequência de fases do sistema.

a)

$$v_{an} = 220 \cos(\omega t + 30^\circ)$$

$$v_{bn} = 220 \cos(\omega t - 90^\circ)$$

$$v_{cn} = 220 \cos(\omega t + 150^\circ)$$

b)

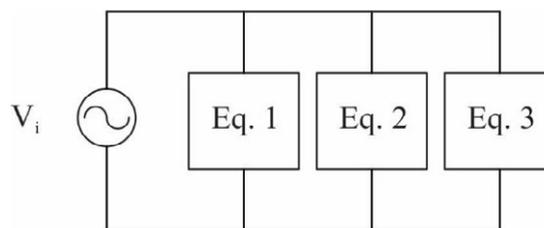
$$v_{an} = 380 \cos(\omega t - 26^\circ)$$

$$v_{bn} = 380 \cos(\omega t + 94^\circ)$$

$$v_{cn} = 220 \cos(\omega t - 146^\circ)$$

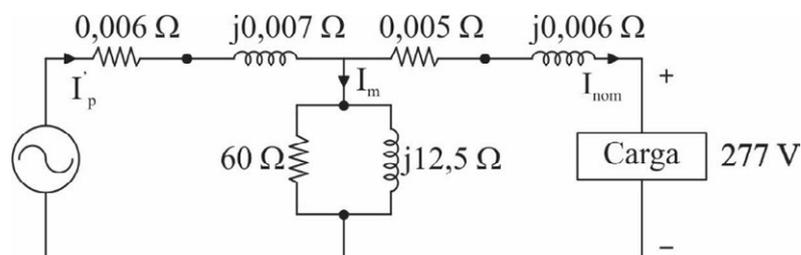
- 6.2** Seja o circuito mostrado na Figura 6.42, ele é composto por três equipamentos chamados de Eq.1, Eq.2 e Eq.3, os quais podem ser modelados, respectivamente, pelas impedâncias z_1 , z_2 e z_3 . Assuma que a frequência da fonte de alimentação do circuito, V_i , possui uma frequência de 60 Hz. A impedância z_1 é composta por um resistor de 12Ω em série com um indutor de 15 mH , a impedância z_2 é composta por um resistor de 80Ω em série com um capacitor de $16 \mu\text{F}$, enquanto que a impedância z_3 é composta por um resistor de 400Ω em série com um indutor de 20 H em paralelo com um capacitor de $5 \mu\text{F}$. Isto posto, determine o fator de potência de cada carga bem como o fator de potência da carga completa.

Figura 6.42 – Circuito para os exercícios 6.2, 6.3 e 6.4



- 6.3** Ainda considerando o circuito do exercício 6.2 e considerando que $V_i = 200 \angle 0^\circ \text{ V}$, calcule as correntes em cada ramo dos equipamentos Eq.1, Eq.2 e Eq.3.
- 6.4** Uma última vez utilizando o circuito do exercício 6.2, bem como o valor da fonte V_i fornecido no exercício imediatamente superior, determine a potência aparente e a potência complexa do circuito.
- 6.5** Seja uma carga conectada no circuito da Figura 6.43, considerando que a potência nominal da carga é de 100 kVA e que esta está solicitando uma corrente com o seu valor nominal, porém com um fator de potência $0,85$ atrasado, determine a forma complexa da corrente nominal I_{nom} .

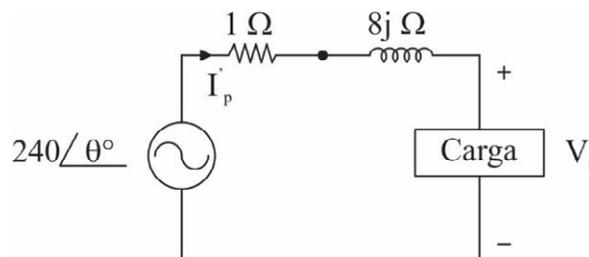
Figura 6.43 – Circuito para os exemplos 6.5, 6.6, 6.7 e 6.8



- 6.6** Recorrendo ao circuito da Figura 6.43, determine a tensão sobre os terminais dos elementos que estão associados em paralelo.

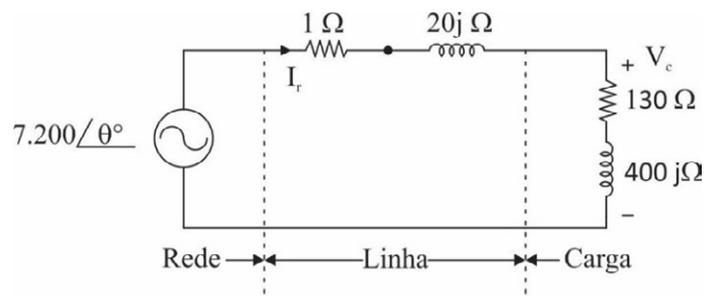
- 6.7 Ainda recorrendo ao circuito da Figura 6.43, determine todas as potências médias solicitadas pelo circuito.
- 6.8 Considerando que você não sabe o valor da fonte de alimentação do circuito, obtenha o valor da fonte de alimentação desse circuito a partir dos valores de impedância e da corrente nominal do sistema.
- 6.9 Admita que você tem duas impedâncias, $z_1 = (5 - 2j) \Omega$ e $z_2 = (5 + 2j) \Omega$, ambas alimentadas por uma fonte de tensão de 220 V – valor RMS – e associadas em série. Calcule a potência complexa desse circuito assim como o valor da corrente fornecida pela fonte de alimentação.
- 6.10 Desenhe o diagrama fasorial para o circuito descrito na questão anterior.
- 6.11 Seja o circuito da Figura 6.44 abaixo. Determine o valor de V_c – módulo e ângulo de fase – sabendo que a carga absorve 250 VA, com um fator de potência 0,6 atrasado.

Figura 6.44 – Circuito para os exercícios 6.11 e 6.12



- 6.12 Ainda considerando o mesmo circuito da questão anterior, desenhe o seu diagrama fasorial.
- 6.13 Seja o circuito monofásico exibido na Figura 6.45. Determine a potência média dissipada na linha.

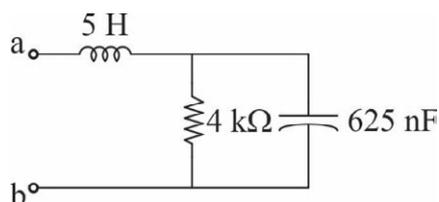
Figura 6.45 – Circuito para os exercícios 6.13, 6.14, 6.15, 6.16 e 6.17



- 6.14 Determine a reatância total do circuito exibido na Figura 6.45.
- 6.15 Calcule a corrente I_r da linha para o circuito da Figura 6.45.

- 6.16** Calcule a potência ativa demandada pela carga para o circuito da Figura 6.45.
- 6.17** Determine a potência complexa para o circuito da Figura 6.45.
- 6.18** Seja o circuito da Figura 6.46, determine a frequência de uma fonte de tensão conectada do ponto de vista dos terminais **a** e **b** para que a impedância equivalente vista desse par de terminais possua uma característica puramente resistiva.

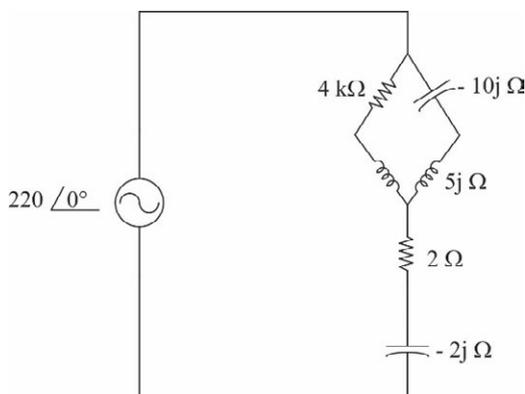
Figura 6.46 – Circuito para os exercícios 6.18 e 6.19



- 6.19** Admita que a frequência que você achou na questão anterior corresponda a uma fonte com valor RMS de 1000 V. Determine o valor da corrente fornecida por esta fonte.
- 6.20** Seja uma fonte de tensão $V_i = (220 + j) V$ que alimenta uma carga composta por duas impedâncias, $z_a = (1 + 0,5j) \Omega$ e $z_b = (100 + 0,5j) \Omega$, associadas em paralelo, determine o valor das correntes nas impedâncias z_a e z_b .
- 6.21** Ainda considerando o exercício 6.20, determine o fator de potência visto pela fonte de alimentação V_i .
- 6.22** Mais uma vez considere o exercício 6.20. Determine as potências ativa, reativa e complexa.
- 6.23** Pela última vez, considere o circuito do exercício 6.20. Existe algum valor de capacitor – considere que a fonte V_i possua uma frequência de 60 Hz – que, ao ser instalado em paralelo com a associação de impedâncias z_a e z_b , faça com que o ângulo de carga corresponda a uma resistência pura? Se sim, qual seria esse capacitor?
- 6.24** Considere três impedâncias $z_1 = (1 + j) \Omega$, $z_2 = (2 + 2j) \Omega$ e $z_3 = (3 + 3j) \Omega$ conectadas em Y. Transforme-as para o seu equivalente Δ .

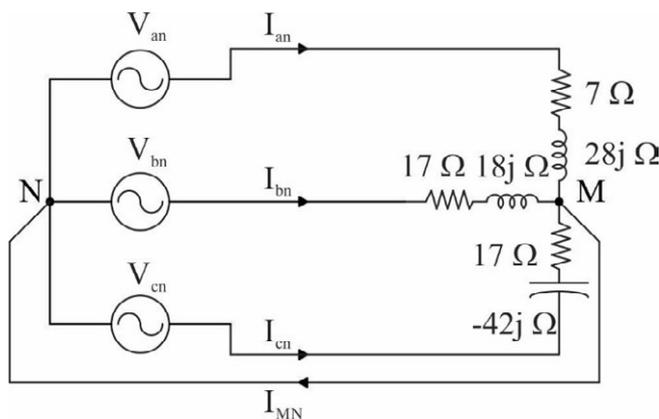
6.25 Seja o circuito da Figura 6.47, determine o valor da corrente fornecida pela fonte de alimentação.

Figura 6.47 - Circuito para o exercício 6.25



6.26 Para o sistema da Figura 6.48 determine se este sistema é ou não equilibrado. Utilizando a lei de Kirchhoff para as correntes, determine o valor da corrente que une os neutros da rede e da carga, sabendo que o valor RMS das tensões de fase da fonte de alimentação é de 240 V e sua sequência é a (abc).

Figura 6.48 – Sistema para os exercícios 6.27 a 6.31



6.27 Ainda considerando o circuito da Figura 6.48, determine os valores das potências médias por fase.

6.28 Mais uma vez considerando o circuito da Figura 6.48, determine o valor da potência complexa por fase do circuito.

6.29 Determine o valor da potência reativa total do circuito exposto na Figura 6.48.

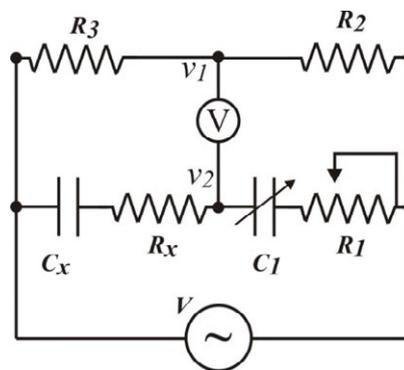
6.30 Insira uma impedância de $z_l = 2j \Omega$ entre a fonte e a carga, presentes na Figura 6.47, e recalcule o valor da corrente I_{MN} .

6.31 O módulo da tensão de fase de uma fonte trifásica equilibrada ideal ligada em Y é de 2.400 V. A fonte está ligada a uma carga equilibrada ligada em Y por uma linha de distribuição que possui uma impedância de $z_l = (2 + 16j) \Omega$ por fase. Admita uma impedância de carga, por fase, como sendo igual a $z_{cf} = (95 + 20j) \Omega$. Admitindo uma sequência de fases positiva para a fonte de alimentação e impondo como referência a tensão da fase **a** da rede, calcule:

- O módulo das correntes de linha;
- As três tensões de linha da fonte;

6.32 Na Figura 6.49 é mostrada a ponte de Wien simplificada, destinada a medir capacitâncias. Observe que, no equilíbrio da ponte, é satisfeita a relação $Z_1 Z_3 = Z_x Z_2$. Determine a expressão para determinar R_x e C_x .

Figura 6.49 – Ponte de Wien simplificada (com capacitor e resistência em série)



Respostas:

$$R_x = \frac{R_3 R_1}{R_2}$$

$$C_x = \frac{R_2}{R_3} C_1$$

Projeto

Você já deve ter notado que a indutância de uma bobina depende do material no interior da bobina; em outras palavras, depende da permeabilidade magnética do material. Projete uma bobina para funcionar sem núcleo ferromagnético (com ar). Ligue esta bobina numa fonte de tensão alternada variável, em série, com um amperímetro, e aumente a tensão até o limite de corrente do condutor. Aproxime um objeto metálico da bobina. Qual o efeito na corrente? Se você aumentar a sensibilidade, esse aparato pode ser utilizado como um detector de metais que seria útil para detectar armas metálicas.

REFERÊNCIAS

ALEXANDER, Charles K.; SADIKU, Matthew N. O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. Porto Alegre: Mc Graw Hill, 2013.

DORF, Richard C.; SVOBODA, James A. **Introdução aos Circuitos Elétricos**. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2012.

GUSSOW, Milton. **Eletricidade Básica**. Porto Alegre: Bookman, 2009. (Coleção Schaum).

NAHVI, Mahmood; EDMINISTER, Joseph A. **Circuitos Elétricos**. . Porto Alegre: Bookman, 2014. (Coleção Schaum).

NILSSON, James W.; RIEDEL, Susan A. **Circuitos Elétricos**. São Paulo: Pearson, 2009.

7 Sistemas Elétricos de corrente alternada trifásicos e monofásicos

Os sistemas elétricos possuem no mínimo dois elementos: a geração de energia e os consumidores de energia. A geração pode ser de vários tipos, por exemplo:

- Hidroelétrica, que aproveita a queda de água das cachoeiras para transformar este potencial em energia elétrica, a partir de turbinas e geradores.
- Termoelétricas, que aproveitam a queima de combustíveis fósseis ou de origem vegetal, como carvão mineral, óleos, biomassa.
- Nucleares, que aproveitam a quebra da estrutura atômica para transformar a energia de coesão do núcleo em energia elétrica.
- Eólica, transforma a energia mecânica dos ventos em energia elétrica, a partir do conjunto Turbina-gerador.
- Maré-motriz, transforma a energia mecânica das ondas e correntes marítimas em energia elétrica.
- Fotovoltaica, transforma a energia solar em energia elétrica, diretamente, a partir da propriedade dos materiais como o silício, material este que compõem painéis fotovoltaicos.

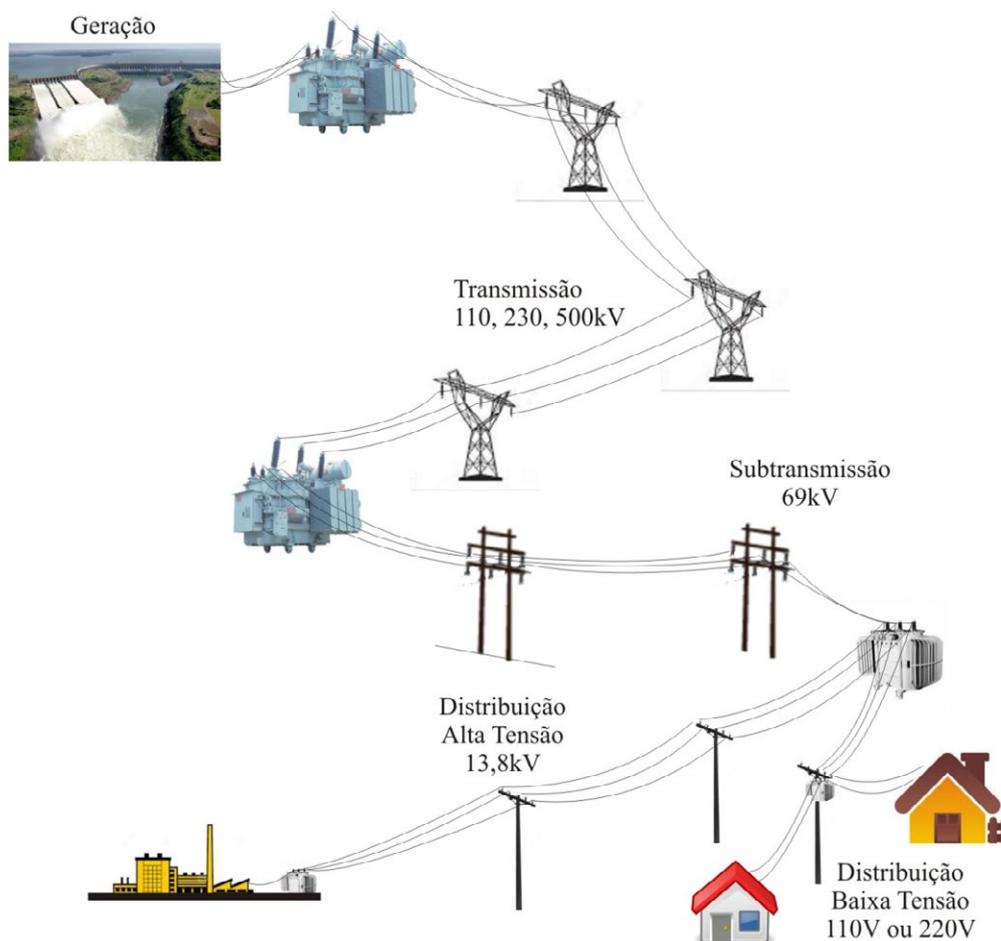
Já os consumidores se classificam basicamente quanto a sua potência instalada: Pequenos consumidores – ou residenciais –, médios consumidores e grandes consumidores. Os grandes consumidores são os que utilizam a energia elétrica de forma muito intensa. São exemplos clássicos de grandes consumidores os que atuam na: indústria metalúrgica; fabricação de alguns produtos minerais não metálicos, como cimento e brita; fabricação de máquinas operatrizes.

Um dos principais problemas dos sistemas elétricos, percebidos desde o final do século XX, é que a geração da energia, na maioria dos casos, acontece longe dos consumidores, havendo, assim, a necessidade de levar essa energia desde o ponto em que é gerada até os consumidores finais. A transmissão de energia elétrica nasceu para levar esta energia através de centenas e até milhares de quilômetros. Vimos, nos capítulos precedentes, que a potência dissipada num condutor é proporcional à corrente ao quadrado, e vimos também que a potência é o produto entre a tensão e a corrente. Para transportar energia elétrica com o mínimo de perdas nos condutores, é necessário reduzir ao máximo a corrente. Por sua vez, para manter a potência transmitida, é necessário elevar, na mesma proporção, a tensão. Por isso, temos transmissão por volta de 110 kV, 230 kV e 500 kV. No entanto, quanto maior a tensão de transmissão, maior o custo e a dificuldades de isolamento. Observe que o nível de isolamento das torres de transmissão é muito maior que o sistema de distribuição urbana.

Dentro das cidades se dá a distribuição de energia para os consumidores. Os consumidores de médio porte são alimentados por alta tensão 13,8 kV e possuem subestação própria. Os consumidores de pequeno porte são alimentados em baixa tensão – 220 V ou 380 V, dependendo da região do Brasil.

São mostradas na Figura 7.1 todas as etapas que a energia elétrica percorre desde a geração até o consumidor, quais sejam: Geração – Transmissão – Subtransmissão – Distribuição – Consumidor Final. Este sistema, como já foi focado no Capítulo 6, é denominado sistema elétrico de potência.

Figura 7.1 – Sistema Elétrico – Visão Geral

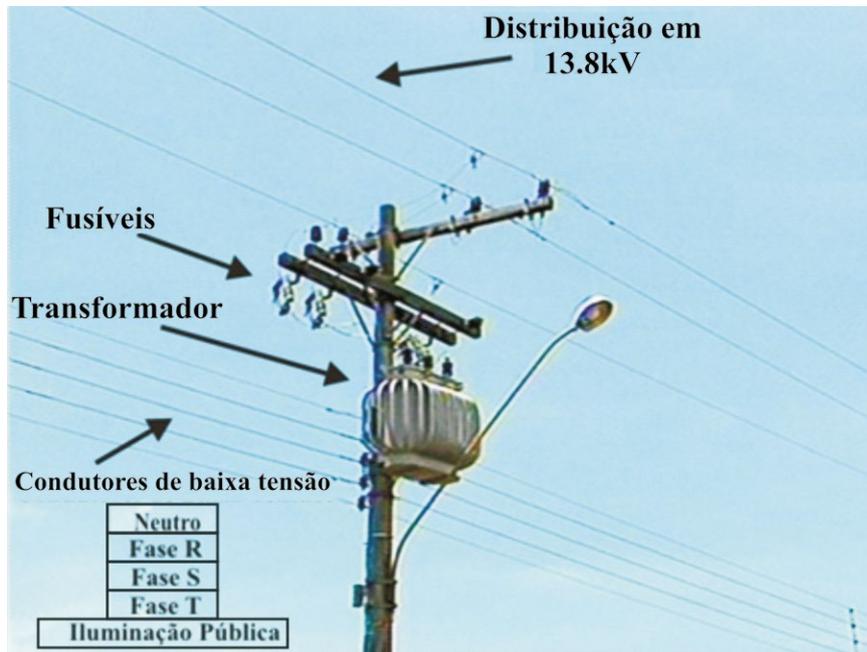


Cada etapa pela qual passa a energia elétrica possui um nível de tensão adequado. Os transformadores, abordados de forma introdutória no Capítulo 3, são as máquinas destinadas a converter um nível de tensão em outro. Ele funciona como uma interface entre dois níveis de tensão. Na Figura 7.2 é mostrado um transformador de distribuição que a transforma de 13,8 kV para 380 V, ou 220 V (trifásicos). O nível de fornecimento dos consumidores de baixa tensão muda de acordo com a região. Na Tabela 7.1, é mostrado o nível de tensão de cada estado brasileiro. Observe a Figura 7.2: os três condutores do alto possuem nível de 13,8 kV (alta tensão), o transformador baixa para 380 V ou 220 V (baixa tensão).

Tabela 7.1 – Estados brasileiros e seus níveis de fornecimento em Sistema elétrico de baixa tensão trifásica

Região	Baixa tensão 380 V	Baixa tensão 220 V
Sul	RS, SC	PR
Sudeste		ES, RJ, MG, SP
Centro-Oeste	DF	MS, MT, GO
Nordeste	AL, BA, CE, MA, PB, PE, PI, RN, SE	
Norte		AC, AP, AM, PA, RO, RR, TO

Figura 7.2 – Transformador de distribuição urbana e rede de baixa tensão

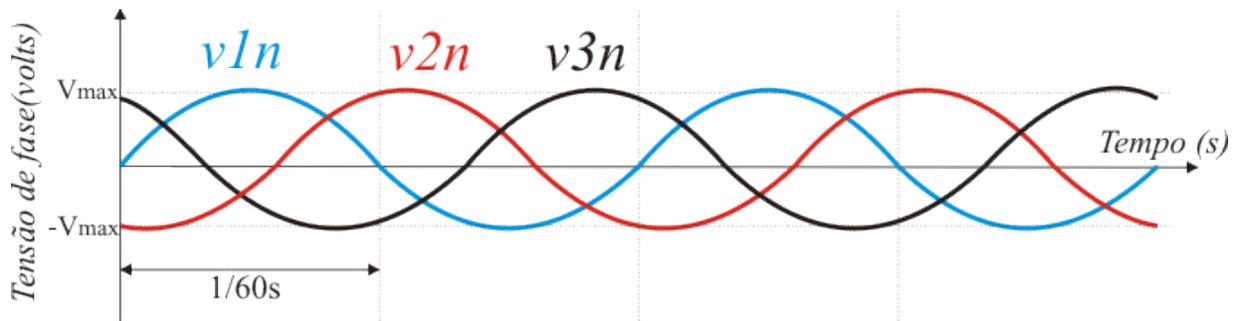


Concluindo, o sistema elétrico possui vários níveis de tensão. A distribuição urbana possui dois níveis: alta e baixa tensão. Há consumidores que são assistidos com baixa tensão e outros com alta tensão.

7.1 Sistema elétrico trifásico

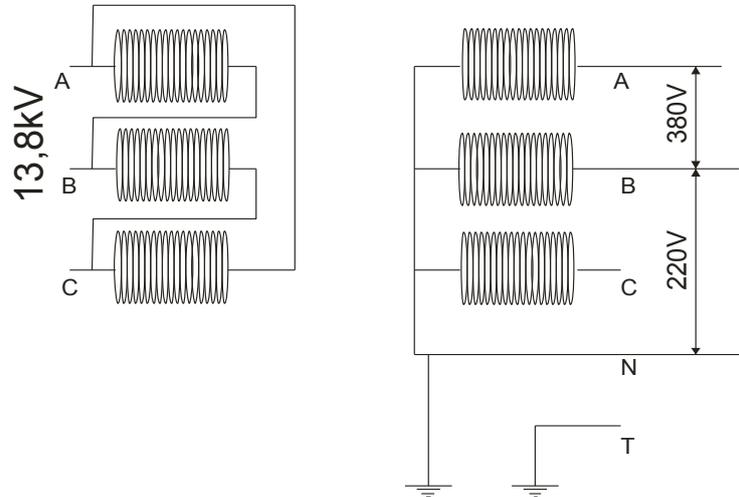
Desde a geração até a distribuição da energia elétrica, nosso sistema elétrico possui três tensões em três condutores nos quais é gerada, transmitida e distribuída a energia elétrica. Em outras palavras, nosso sistema elétrico é trifásico (três fases). Essas três tensões são senoidais e defasadas entre si de 120° no tempo, e cada uma representa uma fase do sistema. As denominações mais comuns dessas fases são R-S-T, A-B-C ou 1-2-3. Na Figura 7.3, são mostradas as três tensões defasadas entre si e com frequência de 60 Hz. Como já foi mencionada, uma frequência de 60 Hz (60 ciclos por segundo) implica que o período da onda é $1/60$ segundos (por volta de 8 ms). O nosso sistema elétrico é em corrente alternada, cuja frequência é 60 Hz. O valor de tensão e sua frequência são duas dimensões importantes da qualidade da energia elétrica disponibilizada pelas concessionárias.

Figura 7.3 – Primário e secundário de um transformador de distribuição urbana



Na Figura 7.4 é mostrado o primário (lado de alta tensão) e secundário (lado de baixa tensão) de um transformador de distribuição. O transformador é muito importante para o sistema elétrico, pois é com este componente que se disponibilizam as diversas tensões do sistema. Observe que o neutro é ligado à conexão comum das três bobinas, no secundário do transformador. As bobinas do primário do transformador estão ligadas em Δ (delta) e as bobinas do secundário estão ligadas em estrela ou Y (estrela). Essas ligações trifásicas foram estudadas com mais detalhes no capítulo referente a circuitos em corrente alternada. O importante é compreender que o neutro é originado no ponto central de uma ligação estrela.

Figura 7.4 – Primário e secundário de um transformador de distribuição urbana



Qual é a importância do neutro? O neutro permite assistir a usuários de baixa potência, pequenos consumidores – por exemplo, os residenciais. Os consumidores de baixa potência são ligados ao sistema elétrico a partir de uma fase e o neutro (sistema monofásico). Percebe-se que o sistema monofásico é, na realidade, uma parte do sistema trifásico. Em um transformador de distribuição, cada fase assiste um conjunto de consumidores monofásicos e um conjunto de consumidores bifásicos e trifásicos. Se as cargas monofásicas são iguais para cada fase, o sistema está equilibrado e não há corrente circulando pelo neutro do transformador. Na prática, é muito difícil conseguir uma distribuição perfeitamente equilibrada nas fases. Isso se justifica por dois fatores:

- As cargas instaladas dos consumidores não são iguais (compare os equipamentos elétricos da sua casa com os do seu vizinho).
- Os hábitos de utilização dos equipamentos diferem muito de um consumidor para outro. Em outras palavras, as cargas de cada fase são diferentes e variam no tempo.

Outro fato importante é o nível de tensão de cada fase. Para melhorar o nível de tensão de cada fase constante, 220 V ou 127 V dependendo do sistema, aterra-se o neutro, como mostrado na Figura 7.4, criando-se uma referência comum aos três monofásicos e ao sistema trifásico. Neste cenário de variação de carga, se o neutro das cargas não fosse o mesmo do transformador, a tensão de cada fase em relação ao neutro variaria, e cada consumidor seria assistido por uma tensão de fase diferente. Por exemplo, se o sistema fosse assistido por 220 V nas fases, ora o consumidor seria assistido por 180 V ora por 230 V. Desta forma, o aterramento do neutro do transformador e das cargas são importantes, pois os três monofásicos experimentam a mesma tensão de fase. Nas Figuras 7.6 a 7.8, temos três casos distintos para o sistema elétrico da Figura 7.5: i) um sistema equilibrado com neutro aterrado; ii) um sistema desequilibrado com neutro aterrado; e iii) um sistema desequilibrado com neutro sem ligação ao transformador (neutro flutuante), com suas respectivas correntes nas fases, corrente no neutro e tensão na fase de cada carga.

Figura 7.5 – Sistema de distribuição com três cargas, ligadas cada uma numa fase distinta

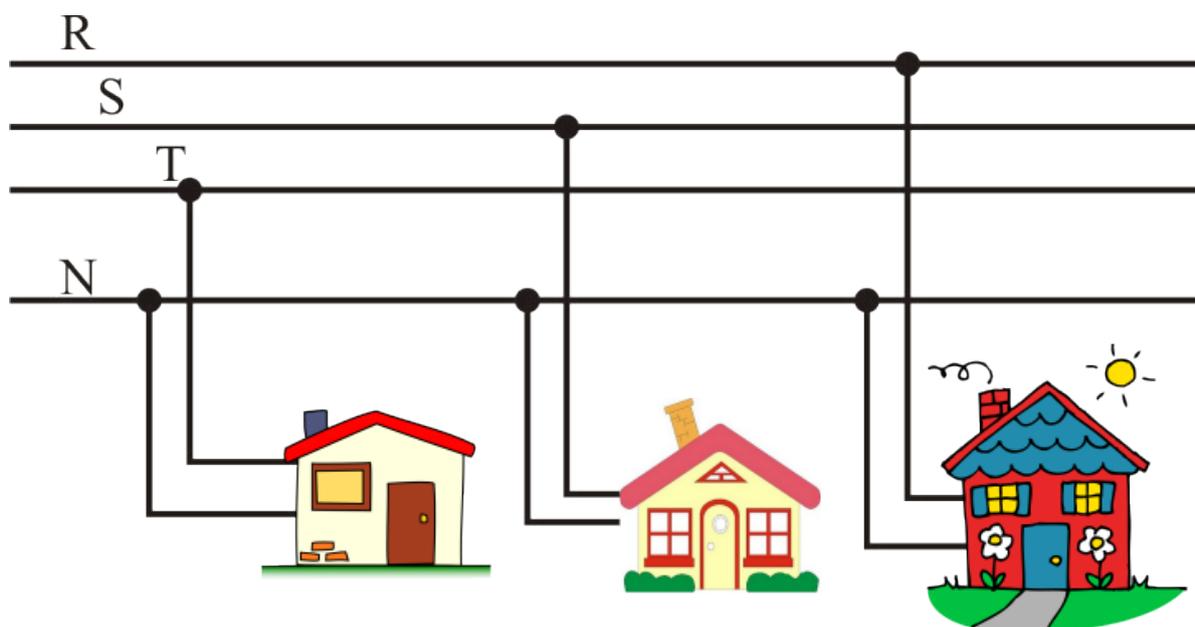


Figura 7.6 – Sistema com três cargas iguais de 1 kW resistiva, correntes nas fases, corrente de neutro do transformador e tensões das fases, com neutro ligado ao ponto central do secundário do transformador

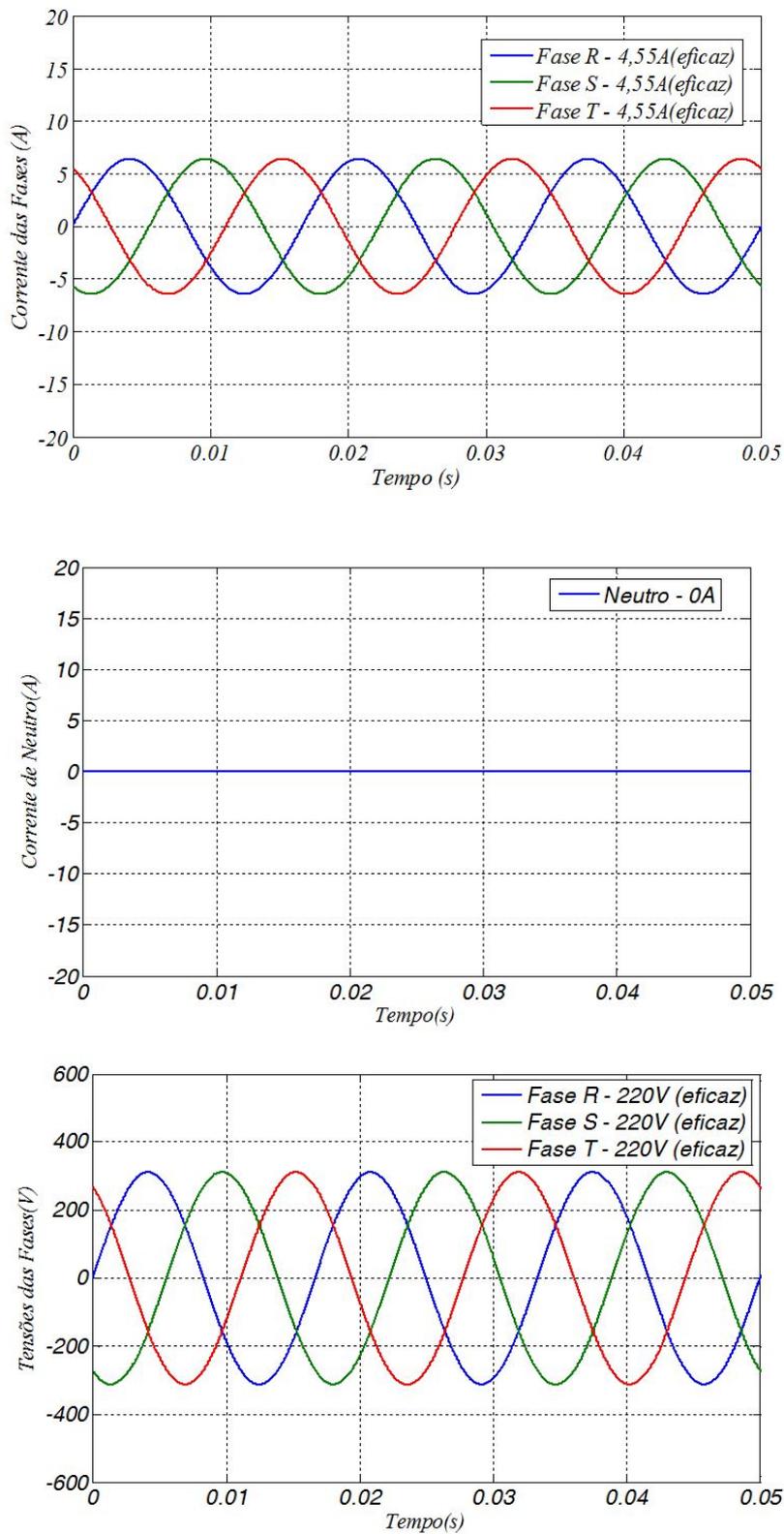


Figura 7.7 – Sistema com três cargas diferentes de 0,5 kW, 1 kW e 1,5 kW resistivas em cada fase, correntes nas fases, corrente de neutro do transformador e tensões das fases, com neutro ligado ao ponto central do secundário do transformador

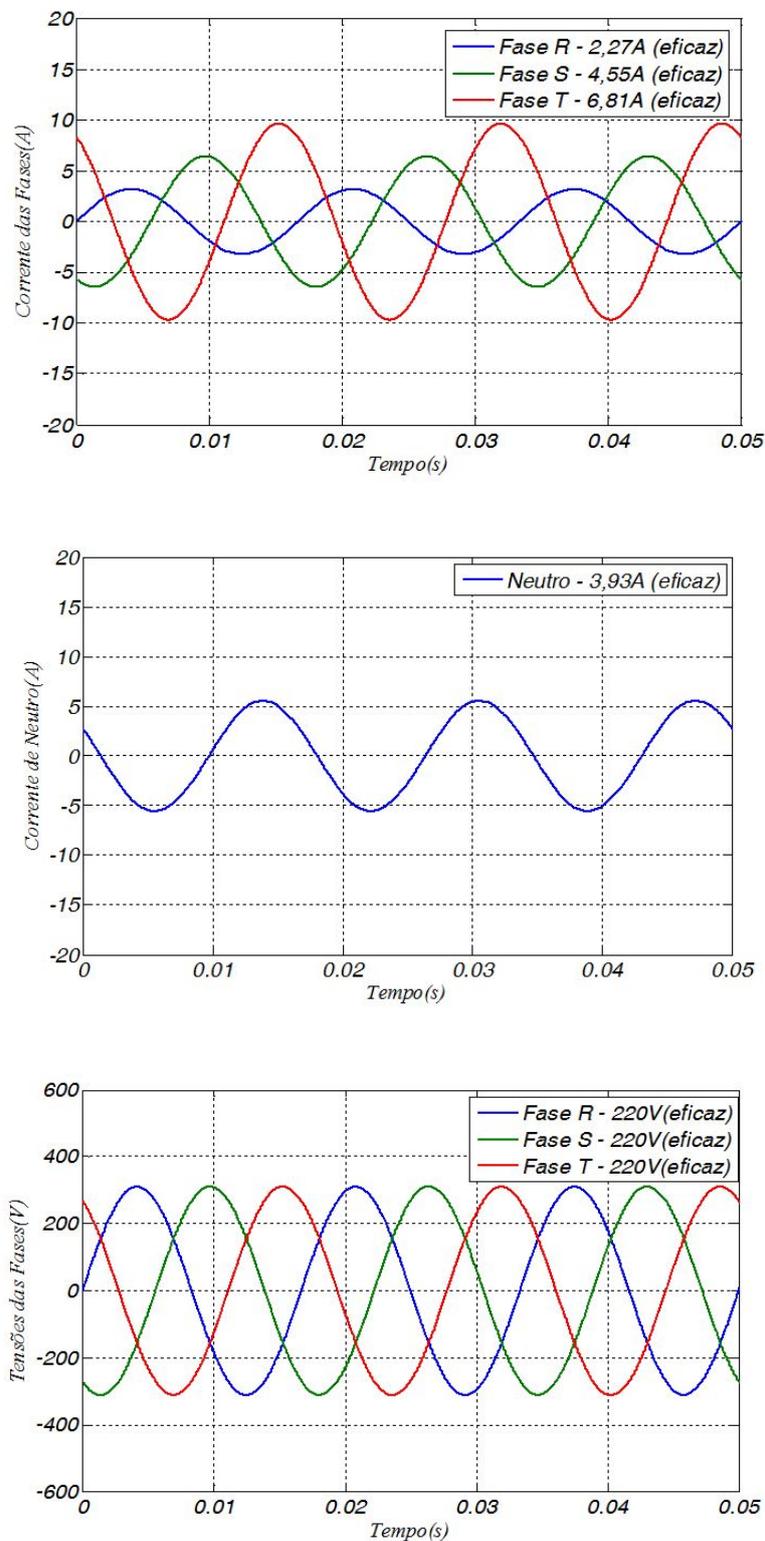
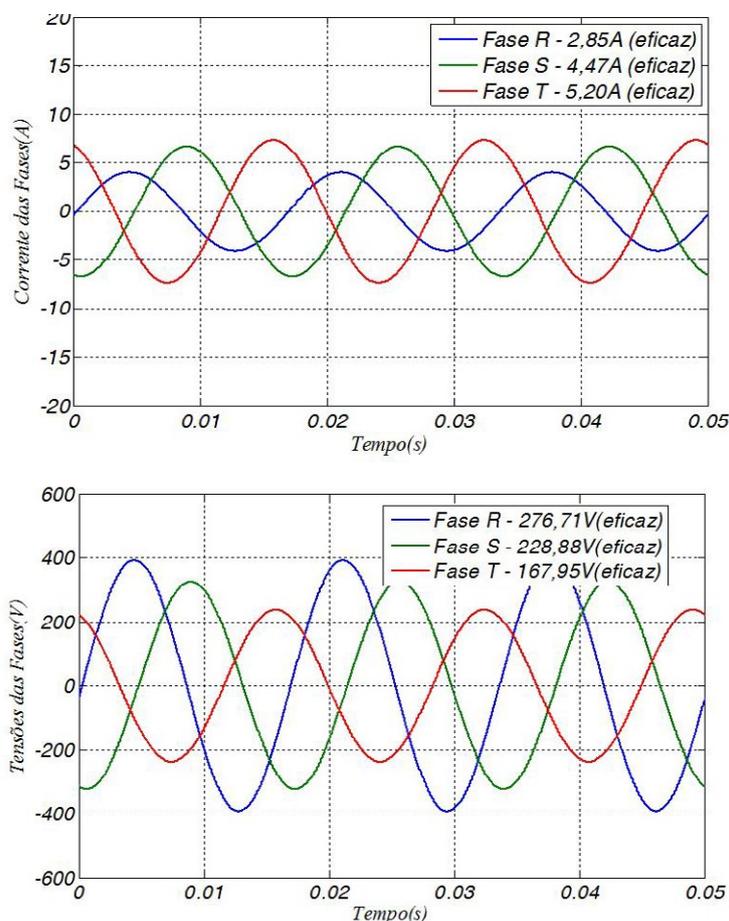


Figura 7.8 – Sistema com três cargas diferentes de 0,5 kW, 1 kW e 1,5 kW resistivas, correntes nas fases e tensões das fases, sem neutro ligado ao ponto central do secundário do transformador



Vemos na Figura 7.6 que, quando as cargas estão equilibradas, não há corrente no neutro do transformador, no entanto, quanto maior o desequilíbrio das cargas entre as fases, mais intensa é a corrente de neutro. Dessa forma, a corrente de neutro do transformador é um indicador da eficiência da distribuição das cargas nas fases. Na Figura 7.8, é mostrado o sistema no caso de neutro não ligado ao transformador. As tensões nas cargas seriam afetadas; dito de outro modo, quanto maior a carga, menor a tensão. Isto seria extremamente danoso para as cargas das residências, pois essas edificações são projetadas para operarem na tensão padrão da distribuição.

O aterramento melhora o problema do desequilíbrio de tensões no sistema monofásico e aumenta a eficiência da medição, mas criou outro problema. O sistema passou a ser mais perigoso para as pessoas, pelo simples fato de estas estarem em contato com o solo. Um contato acidental com uma fase em baixa tensão já é o suficiente para se receber uma descarga elétrica (choque). A corrente tem um percurso do contato até a terra, passando pelo corpo de uma pessoa. Um acidente deste tipo pode ser fatal, pois a corrente pode acarretar arritmia e parada cardíaca. O aumento da resistência de contato do corpo da pessoa com o solo reduz a corrente que passa pelo corpo, minimizando os efeitos do acidente. Daí a importância de um sapato adequado para as pessoas que operam com o sistema elétrico de baixa tensão. Um sapato de alta resistência é, na realidade, um EPI (Equipamento de Proteção Individual) para quem opera na manutenção de sistemas elétricos industriais, comerciais e residenciais.

A relação entre a tensão de fase e a tensão de linha já foi explicada no Capítulo 7, mas, por ser de extrema relevância, é mostrada em (15) e é válida para todo sistema trifásico.

$$v_F = \frac{v_L}{\sqrt{3}} \quad (15)$$

A esta altura o leitor poderá perguntar se existe alguma vantagem em ser assistido por 380 V e 220 V. Assim como em tudo, em ciência tecnológica também existem vantagens e desvantagens. Utilizar uma tensão maior possibilita a vantagem da corrente menor, que implica um custo menor no dimensionamento do sistema. Por exemplo, os condutores podem ter uma seção transversal menor, o que produz um custo menor. A utilização de tensão maior, no entanto, aumenta o risco de choques elétricos para os usuários comuns. De fato, para o mesmo contato e tempo, o dano de um choque elétrico de 220 V é bem maior que o dano de um choque numa tensão de 127 V.

Vale a pena também mostrar novamente as relações de potência nos sistemas trifásicos e monofásicos, mostradas em (7.1) e (7.2) respectivamente. Com essas expressões, é possível saber a corrente de cargas com potência conhecida, operando no nosso sistema elétrico.

$$p(\text{watts}) = \sqrt{3} v_L i \cos(\varphi) \quad (7.1)$$

$$p(\text{watts}) = v_F i \cos(\varphi) \quad (7.2)$$

Exemplo 7.1

Um chuveiro elétrico possui uma potência de 4000 W. Qual a corrente que alimenta este chuveiro, se a tensão de alimentação é de 220 V?

Solução:

Como o chuveiro elétrico é resistivo, o fator de potência é 1.

$$i = \frac{4000}{220} = 18,2 \text{ A}$$

Esta corrente será importante para dimensionar o condutor de alimentação do chuveiro bem como sua proteção (disjuntor DR).

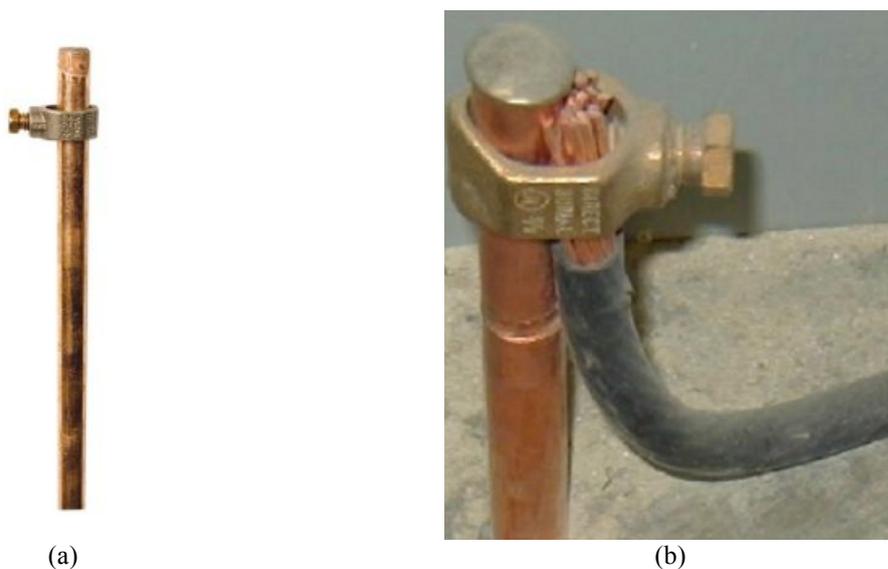
7.2 A importância do aterramento no sistema elétrico

No nosso sistema elétrico, há dois tipos de aterramento: o aterramento do neutro e o aterramento da proteção aos usuários. Esse é um sistema conhecido como TT, uma alusão a dois aterramentos distintos. Esse sistema é mais comum e mais seguro que os sistemas TN, que utilizam um só aterramento. No nosso sistema elétrico, o neutro é aterrado, como já foi

mencionado. O ato de aterrar o neutro fixa a referência deste neutro de tal forma que a tensão de cada fase é a mesma. O fornecimento com uma tensão constante é um dos requisitos da qualidade de atendimento de um sistema elétrico. Já o aterramento para fins de segurança, visa proteger os usuários de choques elétricos. Esses aterramentos são fixados nas carcaças dos equipamentos, evitando choques, em caso de problemas de isolamento entre os condutores e as referidas carcaças. Por exemplo, aterra-se a carcaça da geladeira, da máquina de lavar, do motor, nas indústrias.

O aterramento é realizado com hastes de cobre maciço ou com haste de cobre com núcleo de aço, que é o mais comum, conforme se vê na Figura 7.9 mais abaixo. A resistência do aterramento é fundamental para garantir a segurança das pessoas que utilizam os equipamentos elétricos. Normalmente, as concessionárias de distribuição de energia recomendam a menor resistência possível. Como exemplos de recomendações internacionais temos a NEC (*National Electric Code*) NEC 250.56, recomendando menor que 25Ω , e a NFPA (*National Fire Protection Association*) – IEEE, apontando para um máximo de 5Ω . Quanto menor a resistência de terra, melhor o aterramento. Diversos fatores influenciam a resistência de terra. A conexão do condutor com a haste e o tipo de terreno em que foi realizado o aterramento são alguns desses fatores. O telurímetro ou terrômetro, mostrado na Figura 7.10 (b), é o equipamento destinado a medir a resistência de terra.

Figura 7.9 – (a) Haste de aterramento e conector; (b) Aterramento realizado



O Método dos 4 terminais para medição de resistência de terra

Desenvolvido pelo americano Frank Wenner por volta de 1915, muitas vezes chamado de método de Wenner, é um método preciso, mas, pela necessidade de fixação de três hastes, é considerado menos cômodo pela literatura técnica. Consiste em 4 terminais, dos quais em dois se mede corrente elétrica e nos outros dois se mede tensão. Wenner simplificou a expressão da resistência de terra quando a distância entre as hastes é muito maior que a profundidade da haste com a qual se quer medir a resistência de terra (7.3), como mostrado na Figura 7.10 (a).

$$b \gg h \quad (7.3)$$

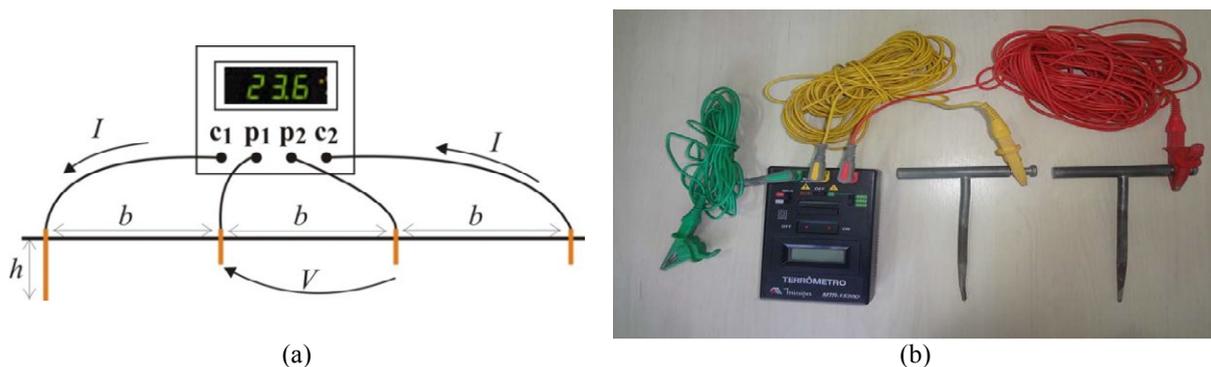
A resistência de terra é simplesmente (7.4), e a resistividade média do terreno é expressa em (7.5).

$$R_{terra} = \frac{V}{I} \quad (7.4)$$

$$\bar{\rho}_{terra} = 2\pi b R_{terra} \quad (7.5)$$

Na Figura 7.10 (b), é mostrado um terrômetro comercial de três terminais. A haste com que se quer medir a resistência de terra é utilizada como referência para tensão e corrente e é ligada ao condutor verde. O condutor amarelo (tensão) é ligado a uma haste a uma distância de 62% da distância da haste a que está ligado o condutor vermelho (corrente). O método dos três terminais é mais cômodo que o de Wenner por possuir menos hastes.

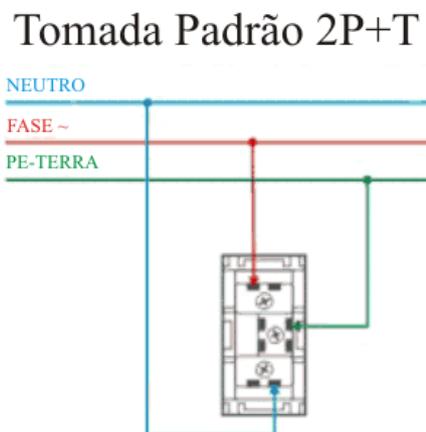
Figura 7.10 – (a) Esquema de ligação do método de Wenner (4 terminais);
(b) Terrômetro digital comercial (três terminais)



7.3 O padrão elétrico brasileiro para tomadas

O padrão brasileiro para tomadas elétricas nas instalações prediais pode ser visto na Figura 7.11. Observe que as cores vermelho para fase, azul claro para neutro, verde para terra e amarelo para retorno é uma recomendação para as cores dos condutores da Norma NBR 5410-2004 item 6.1.5.3 (que trata das cores dos condutores). Este padrão de cores é utilizado como referência neste livro.

Figura 7.11 – Padrão de ligação de tomadas Fase-Neutro-Terra



7.4 Cargas monofásicas, trifásicas

Cargas trifásicas são aquelas destinadas à ligação nas três fases ou nas três fases e também no neutro. São as cargas comumente chamadas a três fios ou quatro fios. Um exemplo de carga a três fios são os motores elétricos trifásicos. As cargas elétricas monofásicas são aquelas a serem ligadas numa fase e em um neutro. São exemplos de cargas monofásicas os diversos equipamentos residenciais como geladeiras, micro ondas, televisão, motores monofásicos e outros. No Capítulo 6, foi enfocada a teoria introdutória dos sistemas monofásicos e trifásicos. Na Tabela 7.2, são mostradas as principais cargas monofásicas residenciais e suas potências nominais.

Tabela 7.2 – Algumas cargas residenciais e sua respectiva potência

Equipamento residenciais	Potência nominal (watts)
Chuveiro Elétrico	4500
Ferro de passar	1500
Grill	1200
Condicionador de ar 7500 BTUS	1200
Computador Desk Top	350
Bebedouro	200
Geladeira 450 Litros	150
Ventilador médio	120
Barbeador elétrico	50
Lâmpada PL	20

7.5 Condutores elétricos

Condutores elétricos têm a finalidade de levar o potencial elétrico da fonte de energia até a carga. Na analogia com os sistemas hidráulicos, os condutores elétricos são os canos do sistema hidráulico, pois é por eles que as cargas elétricas fluem. Sendo um meio por onde as cargas fluem, a resistência elétrica dos condutores influencia as perdas e a queda de tensão ao longo de sua extensão. Quanto maior a resistência, maiores as perdas e maior a queda de tensão para uma determinada carga. As perdas são ocasionadas pelo aquecimento do condutor. Essas perdas são custos que não adicionam valor ao sistema elétrico. Já a queda de tensão, ao longo do condutor, reduz a tensão na carga. Toda carga é projetada para operar numa determinada tensão, é a tensão nominal da carga. Se a carga está sendo alimentada por uma tensão menor, pode haver problemas na operação da carga.

A resistência de um condutor pode ser determinada por sua resistividade ρ , que possui a dimensão de $[\Omega\text{m}]$. A expressão para o cálculo da resistência é mostrada em (1). A partir desta expressão, vemos que a resistência diminui com o aumento da área da seção transversal e com o aumento do comprimento do condutor. Também vimos no Capítulo 2 que a resistividade depende da temperatura, e que, na maioria dos casos, se esta aumenta, também haverá aumento da resistividade. Quando os condutores estão conduzindo corrente elétrica, estão sujeitos a dois componentes de temperatura: a temperatura ambiente e a temperatura devido às perdas por efeito Joule na resistência do condutor.

Existem praticamente duas classificações para os condutores elétricos: quanto ao material de que é composto o próprio condutor e quanto ao isolante em torno desse condutor. Quanto ao material, classificam-se em:

Condutores de Cobre: Estão presentes na grande maioria dos condutores elétricos utilizados para baixa tensão. Apresenta uma resistividade de $1,68 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ e um coeficiente de temperatura positivo e igual a $0,0039 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$. Em termos de custo benefício, o cobre é um material muito atrativo em relação aos demais.

Condutores de alumínio: O grande atrativo do alumínio é seu peso. O alumínio possui uma densidade menor que o cobre. Sua resistividade de $2,82 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$, no entanto, é 67% maior, assim como o custo do seu quilograma. Nas bobinas de estator de alguns motores são utilizados condutores de alumínio. Mesmo aumentando a área da seção de condutores, ainda há vantagem no peso do condutor, já que influencia no peso do motor.

Condutores de ouro: O ouro possui uma resistividade maior que o cobre, por volta de $2,44 \times 10^{-8} \Omega\text{m}/\text{mm}^2$, a uma temperatura de $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, mas possui estabilidade maior quanto à corrosão. Em trilhas de condução e em contatos de algumas placas de circuitos eletrônicos, utiliza-se ouro.

Condutores de Chumbo-estanho: As ligas de chumbo estanho são utilizadas em soldas, que podem ser consideradas como condutor. Muitos países já aboliram o chumbo das soldas por ser um elemento muito tóxico na sua manipulação.

Classificação quanto às principais isolações:

Condutores com isolação de PVC (Cloro de Polivinila): O PVC é um polímero derivado de petróleo, utilizado em várias aplicações. Polímero são moléculas de grande porte formadas a partir de estruturas menores, de forma repetitiva. O PVC com estrutura flexível é muito utilizado em isolação de condutores elétricos. Quase todas as aplicações de condutores em instalações prediais são feitas com isolação à base de PVC. Com excelente resistividade e rigidez dielétrica, esse material apresenta grande atratividade na aplicação comercial.

Condutores EPR (Borracha Etileno-Propileno): Possuem também boas características de resistividade e rigidez dielétrica. A borracha é utilizada em condutores de média tensão (tensões de isolamento de 3,6 até 35 kV). Tem característica de flexibilidade física muito boa, o que facilita o manuseio por parte dos operadores.

Condutores XLPE (Polietileno Reticulado): Além de possuírem boas características de resistividade e rigidez dielétrica, depreciação da rigidez muito baixa, ainda mantêm boa estabilidade em altas temperaturas, o que permite operar numa alta capacidade de condução de corrente. São aplicados em média tensão e tensões de isolamento acima de 35 kV.

Condutores de cobre nu: São cabos e fios sem cobertura isolante (ver Figura 7.12), utilizados em circuitos aéreos de comunicação, circuitos de transmissão e distribuição urbana e rural bem como em sistemas de aterramento.

Figura 7.12 – (a) Cabo de cobre nu; (b) Fio de cobre nu



Fio de cobre ou alumínio esmaltado: São condutores utilizados em enrolamento de motores elétricos, transformadores e indutores. Esses condutores possuem uma camada de esmalte isolante à base de Polieteramida PEI, na maioria dos casos. No Anexo 2, é mostrada uma tabela de fios de cobre esmaltado com suas características.

Cada condutor possui sua capacidade de condução de corrente para uma determinada maneira de instalar e para uma determinada temperatura. Esta capacidade de condução norteia a definição do condutor a ser utilizado para alimentar uma determinada carga. Na Tabela 7.3, são mostradas a capacidade de condução de corrente para os condutores com isolamento em PVC, com dois fios carregados, para temperatura de 30 °C, para linhas não subterrâneas bem como suas densidades de corrente máxima de operação. A escolha do condutor adequado para uma determinada corrente é sempre o menor valor acima da corrente da carga. Para uma carga de corrente de 15 A, será escolhido o condutor de 2,5 mm². Este é o procedimento para dimensionar o condutor para uma carga, segundo o critério da capacidade de condução de corrente. Existem outros critérios, como seção mínima, queda de tensão admissível, dimensionamento econômico.

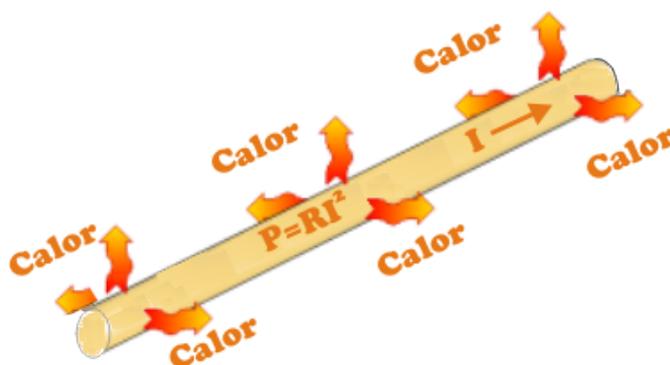
Tabela 7.3 – Capacidades de condução de corrente para os condutores com isolamento em PVC, com dois fios carregados, para temperatura de 30 °C, para linhas não subterrâneas

Seção nominal (mm ²)	Capacidade de condução (A)	Densidade Máxima de Corrente (A/mm ²)
1,0	11	11,00
1,5	14,5	9,66
2,5	19,5	7,80
4	26	6,50
6	34	5,66
10	46	4,60

Se houver necessidade de instalar um chuveiro elétrico, com uma potência de 5000 watts, cuja corrente de alimentação é de 22,7 A em 220 V, recomenda-se um condutor de 4 mm². Se a concessionária adotasse 110 V, a corrente neste caso seria de 45,4 A, para o que seria recomendado uma seção de 10 m². Embora se saiba que a menor tensão de uma concessionária é mais segura quanto a acidentes envolvendo choques elétricos, os custos dos condutores, no entanto, são maiores, pois a corrente para uma mesma potência é maior.

A densidade máxima de corrente, exposta na Tabela 7.3, é a máxima densidade operacional admitida pelo fabricante do condutor. A temperatura do condutor é determinada pelo equilíbrio entre o calor gerado por efeito Joule no condutor e a capacidade de dissipação deste calor para o meio ambiente, como mostrado na Figura 7.13. Lembre-se de que o condutor possui uma resistência elétrica, que, quando percorrida por corrente elétrica, gera calor. Quanto maior a corrente, maior a geração de calor e maior a temperatura do condutor, se mantivermos a capacidade de dissipação para o meio ambiente. Utilizar uma densidade de corrente operacional maior que a recomendada pelo fabricante causa o aumento de perdas, as quais, por sua vez, geram custos (maiores gastos com energia) bem como diminuição da vida útil do condutor, além de queda de tensão na rede. Desta forma, o correto dimensionamento do condutor é um procedimento muito importante para um sistema elétrico predial eficiente. Para ilustrar, as densidades de corrente típicas nos motores de pequeno e médio porte estão por volta de 7 A/mm², e, para transformadores de pequeno porte, por volta de 4 A/mm².

Figura 7.13 – Equilíbrio entre geração de calor num condutor e dissipação para o meio ambiente



7.6 Dispositivos de proteção

Os disjuntores e fusíveis são os dois dispositivos de proteção mais importantes nos sistemas elétricos em se tratando de baixa tensão. Eles isolam um curto circuito ou uma sobrecarga, desligando a fonte do problema e protegendo, assim, o resto do sistema. A Figura 7.14 (a) mostra como são os disjuntores, e a Figura 7.14 (b) os fusíveis.

Figura 7.14 – Exemplo de: a) disjuntor; b) fusível



Um curto-circuito é uma corrente alta causada por uma resistência baixa. Lembre-se da lei de Ohm: $i = \frac{v}{r}$, se a resistência for baixa a corrente será alta. Imagine uma situação de contato entre a fase e o neutro. Neste caso, a resistência seria quase zero; a consequência seria uma corrente muito alta que circularia pelos condutores da fonte até o ponto do problema. Os disjuntores e fusíveis desligariam o circuito, isolando o problema. Os disjuntores e fusíveis são projetados para operarem até uma determinada corrente nominal – acima deste valor, eles se fundem, abrindo o contato. Os fusíveis protegem contra curto-circuito; já o disjuntor protege contra curto circuito e sobrecarga. Os fusíveis são descartáveis; já os disjuntores permitem sua religação depois do problema solucionado.

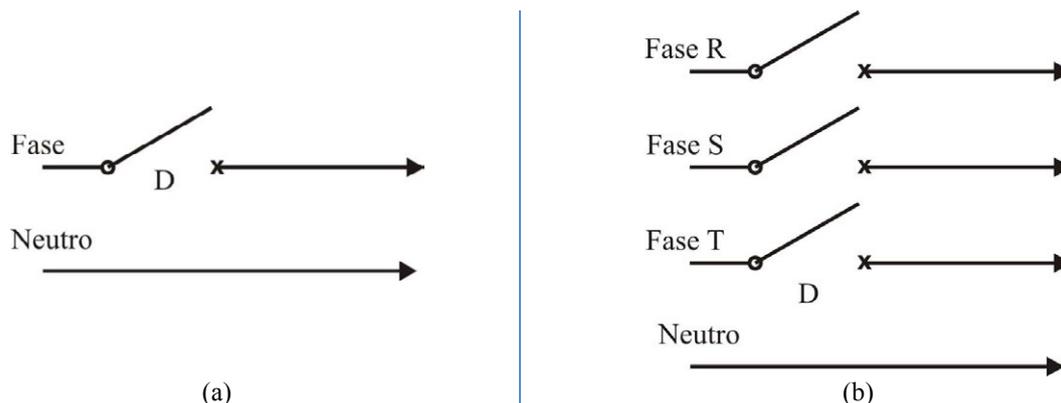
- **Curto-circuito:** Corrente alta provocada pelo contato de: fase no neutro, fase no terra, ou no pior caso, fase em outra fase no sistema trifásico. A corrente sobe subitamente a valores muito altos.
- **Sobrecarga:** Uma corrente acima dos valores nominais de uma carga, por exemplo, o rotor de um motor submetido a alto atrito. A corrente não é considerada um curto circuito, mas seu valor poderia subir além do nível da corrente nominal do motor para o qual foi projetado. Se o disjuntor não desligar, o motor pode vir a se danificar, ocasionando um prejuízo alto.

Quando se desliga uma carga de características indutivas – como é o caso dos motores –, nos pontos em que o circuito foi seccionado, haverá sempre uma tensão alta. Essa tensão é uma tendência de não variar a corrente, própria dos circuitos indutivos. Quando se secciona um circuito, varia-se a corrente até zero, subitamente. Isso provoca uma tensão alta entre os pontos do seccionamento, resultando num arco voltaico entre os terminais do seccionamento. Provavelmente você já viu um arco voltaico nos interruptores de lâmpadas fluorescentes. Aquela centelha nos contatos quando se desliga a lâmpada. O problema é que, quando a corrente é alta, este arco pode ter valores altos, o que pode ocasionar danos aos operadores. Por isso, **nunca desligue uma carga indutiva (motores, por exemplo), cortando um condutor ou seccionando um circuito a seco.**

Os disjuntores e fusíveis possuem câmaras de extinção desses arcos, geralmente extinguindo-se o oxigênio com areia (sílica). Caso não existissem essas câmaras, os dispositivos explodiriam com o curto-circuito.

Os fusíveis e disjuntores são sempre ligados nas fases. Nunca conecte esses dispositivos no neutro ou terra. Na Figura 7.15, são mostradas maneiras como esses aparelhos são ligados nos sistemas monofásicos e trifásicos.

Figura 7.15 – Maneira de ligar disjuntor ou fusível nos sistemas (a) monofásico e (b) trifásico



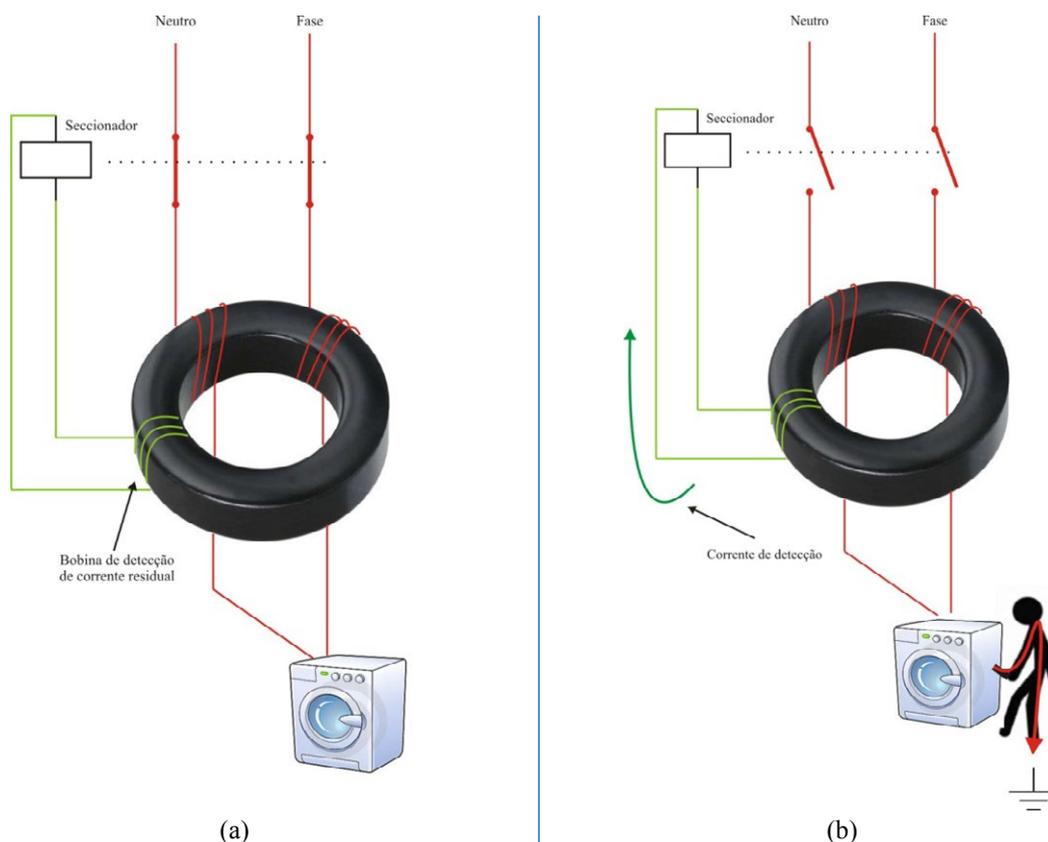
Outros dispositivos de proteção importantes são o Módulo DR e o disjuntor DR (Diferencial Residual). O disjuntor do tipo DR, além de possuir as características de um disjuntor comum (proteção contra sobrecarga e curto-circuito), possui proteção contra fuga de corrente para terra. O módulo DR deve ser associado a um disjuntor comum, já que esse módulo só possui proteção contra fuga de corrente para terra, fenômeno que pode ser ocasionada por uma dessas condições:

- I** - Equipamento aterrado eficientemente, mas com falha de isolamento. A corrente de fuga circula pelo aterramento para a terra.
- II** - Equipamento aterrado de forma ineficiente e com falha de isolamento. A corrente de fuga circula em parte pelo aterramento para a terra. O dispositivo pode não atuar, pois a corrente de fuga pode ser menor que a mínima necessária para sua atuação. O dispositivo atua ao toque do usuário com a carcaça do equipamento.
- III** - Equipamento sem aterramento. O dispositivo atua ao toque do usuário com a carcaça do equipamento.

Esses acidentes elétricos, sejam em instalações industriais ou domésticas, podem ser fatais. Percebe-se, desta forma, a grande importância da utilização dos aterramentos e dispositivos DR. O esquema de detecção da corrente residual e atuação são mostrados na Figura 7.16. O sistema é baseado num indutor toroidal. Tanto o neutro quanto a fase são enrolados no mesmo sentido no núcleo do toroide. Em condições normais, a corrente de fase e de neutro são iguais a todo instante e opostas. Nesta condição, as duas correntes criam fluxos magnéticos iguais e opostos no toroide, anulando o fluxo resultante no seu interior. Em condição de presença de corrente de fuga, a corrente da fase é maior que a corrente do neutro, criando, assim, um fluxo resultante dentro do núcleo do toroide. Esse fluxo resultante induz tensão no enrolamento de detecção, que, por sua vez, aciona o seccionador. Os dispositivos

DR presentes no mercado garantem detecção e atuação em corrente mínima de 30 mA. Por exemplo, para uma corrente de 500 mA, de acordo com IEC 60479-1, seria necessário um tempo maior que 50 mS para algum efeito físico sério, numa corrente circulando pela mão esquerda até os pés. O tempo de atuação do DR é menor que 40 mS.

Figura 7.16 – Esquema simplificado do disjuntor DR: (a) Normal; (b) Atuando



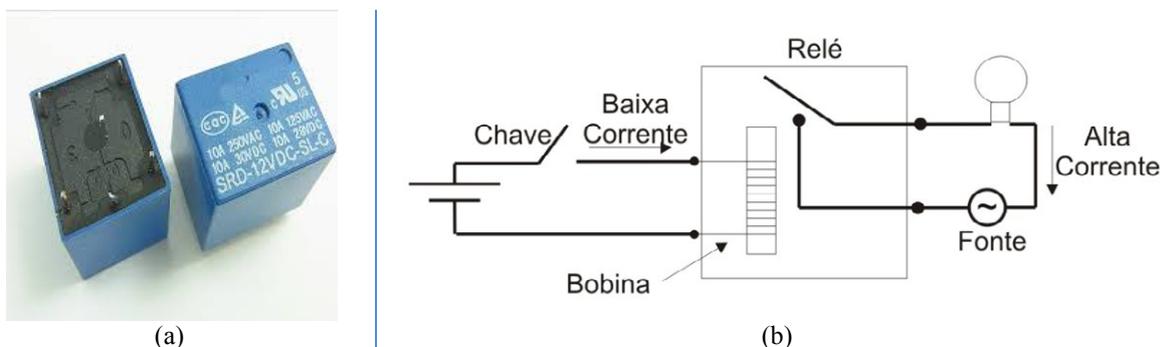
7.7 Dispositivos de comandos – chaves eletromagnéticas e a estado sólido

Os dispositivos eletromagnéticos de comando são amplamente utilizados em sistemas elétricos industriais e prediais, principalmente no acionamento de motores elétricos, sistemas de iluminação, sistemas de aquecimento, bancos de capacitores, entre outros. Dois dispositivos se destacam nas aplicações industriais: o contator e o relé de potência. Ambos possuem, a princípio, a mesma função: Acionar uma carga monofásica ou trifásica de alta corrente, a partir de baixa corrente, ou seja, a partir de uma chave manual. O contator possui uma corrente de operação muito maior que o relé de potência, o que exige câmara de extinção de arcos na abertura desses circuitos.

O relé magnético, mostrado na Figura 7.17, possui uma bobina que, quando energizada, cria um campo magnético fechando a chave por força magnética. Observa-se que o relé

magnético possui uma isolação magnética entre o circuito de comando e o circuito de força, o que garante uma segurança para operadores.

Figura 7.17 – Relé magnético de 10 A e 250 V, para ser acionado por uma tensão de 12 V, e seu circuito interno



O contator, mostrado na Figura 7.18 a seguir, utiliza também o magnetismo para ligar e desligar cargas indiretamente. O contator possui, ainda, uma bobina que, quando energizada, fecha os contatos de potência, que podem ser do tipo monofásico ou trifásico. O contator, além de ser um dispositivo semelhante a um relé eletromecânico possui, além disso, a capacidade de extinção de arcos voltaicos vindos do desligamento de cargas indutivas, como motores elétricos. Há contadores para ligar e desligar cargas de alta corrente elétrica (por exemplo, de 500 A). Os contadores possuem contatos auxiliares de baixa corrente que ajudam na elaboração de sistemas de acionamento complexos. Dois tipos de contatos estão presentes nos contadores.

Contato normalmente aberto (NA): Quando a bobina não está energizada, o contato permanece aberto; ao se energizar, entretanto, provoca o fechamento do contato.

Contato normalmente fechado (NF): Quando a bobina não está energizada, o contato permanece fechado; ao ser energizada, porém, o contato abre. Como exemplo, podemos dizer que um contato normalmente aberto pode ser utilizado para ligar um sinalizador, que será ligado quando um motor que aciona um moinho também estiver ligado, avisando aos operadores que o moinho está operando.

Figura 7.18 – Contator para cargas trifásicas



Nos últimos anos, o relé a estado sólido tem sido cada vez mais utilizado. Este relé não utiliza o efeito magnético para forçar o fechamento das chaves; seu princípio é baseado em tiristor. Tiristor é uma chave eletrônica surgida na década de 1950. Algumas vantagens da utilização dos relés a estado sólido são: a) alta isolação entre o circuito de controle e o circuito da carga; b) vida útil física maior; c) menores perdas elétricas; d) não produção de ruído ou de

vibração. A alta isolação é conseguida por opto acoplamento, ou seja, não há contato físico entre o circuito de controle e o circuito de carga, é luz que liga e desliga o circuito de carga. Na Figura 7.19 (a) é mostrado um relé de estado sólido de 40 A, acionado por tensão contínua de 3 V a 32 V. Na Figura 7.19 (b), é mostrado um relé de estado sólido de 25 A, acionado por tensão alternada de 90 V a 230 V.

Figura 7.19 – Relés a estado sólido. (a) Entrada de controle em corrente contínua de 3 V a 32 V, corrente de carga de 40 A; (b) Entrada de controle em corrente alternada de 90 V a 230 V, corrente de carga de 25 A



7.8 Interruptores

Os interruptores são componentes dos sistemas elétricos de baixa tensão mais próximos às pessoas. A toda hora ligamos e desligamos cargas nas residências (iluminação de quartos, banheiro, cozinha, entre outros ambientes). Três tipos de interruptores são utilizados em instalações elétricas: i) Simples; ii) três terminais (*Three-way* ou paralelo); iii) quatro terminais (*Four-way* ou interruptor intermediário). Neste livro, esses interruptores possuem simbologia mostrada nas Figuras 7.20 a 7.22.

Figura 7.20 – Interruptor simples: (a) Símbolo equivalente; (b) Terminais do interruptor

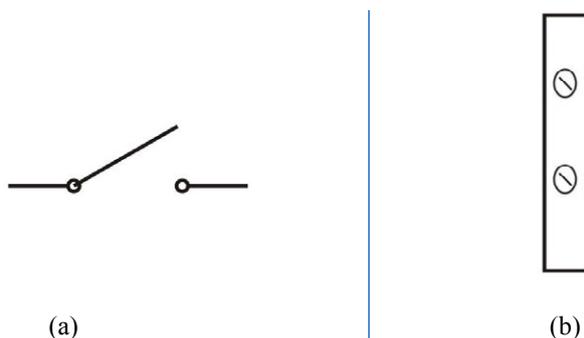


Figura 7.21 – Interruptor de três terminais: (a) Símbolo equivalente; (b) Terminais

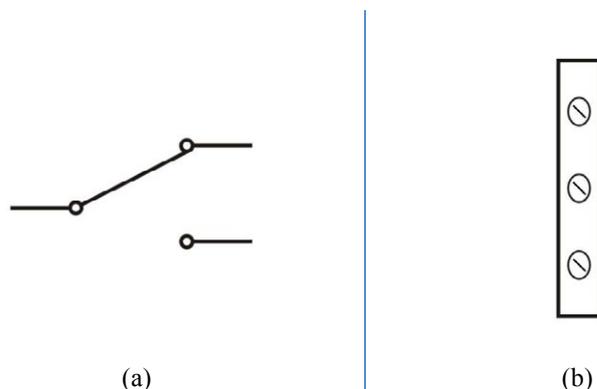
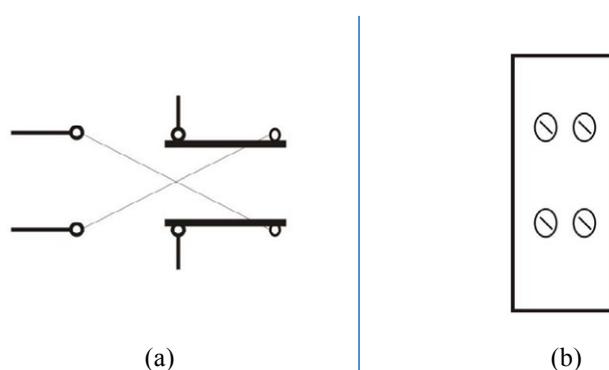


Figura 7.22 – Interruptor de quatro terminais: (a) Símbolo equivalente; (b) Fotografia de seus terminais



O interruptor simples permite comandar uma carga de um só ponto. O interruptor de três terminais permite comandar uma carga de dois pontos diferentes. O interruptor de três terminais é utilizado em escadas ou em grandes corredores, onde uma lâmpada pode ser ligada/desligada no começo ou no final do percurso. Com adição de um interruptor de quatro terminais, a carga poderá ser comandada de três pontos diferentes. Uma aplicação para dois *Three-ways* e um *Four-way* pode ser num corredor longo, com uma saída perpendicular, onde seja necessário ligar/desligar a lâmpada nas três entradas desse corredor. É bom lembrar que sempre se secciona a fase, ou seja, os interruptores devem permanecer na fase entre a fonte e a carga. O neutro é ligado diretamente na carga.

Num módulo comercial, pode haver mais de um interruptor simples – 2 ou 3. São os interruptores de 2 e 3 seções. Não confundir com interruptores paralelos ou intermediários. Existem módulos com 1, 2 e 3 interruptores simples. Por exemplo, na Figura 7.23, são mostrados dois módulos de interruptores com 2 e 3 seções.

Figura 7.23 – (a) Interruptor com 2 seções; (b) Interruptor com três seções



7.9 Introdução aos esquemas de projetos elétricos prediais

Um projeto elétrico predial é um conjunto de documentos que define a localização das cargas e quadros de distribuição; os condutores de alimentação dessas cargas e seus comandos; a proteção do sistema elétrico, em caso de falha de algum componente da instalação predial; e um memorial de cálculo. Especificamente temos:

Localização das cargas e seus comandos: Local onde serão instalados interruptores, tomadas, pontos de luz e pontos de instalação de motores elétricos. Como se trata de localização, é necessário acesso à planta baixa do projeto arquitetônico. Assim, os projetos elétricos são elaborados tendo como base os projetos arquitetônicos. Embora se trate de atender a especificações geográficas de projetos de planta baixa, que é uma representação em duas dimensões, o fator localização implica também definição de altura, padrões de tomadas, interruptores e pontos de luz.

Definição de condutores de alimentação: É pelos condutores que circularão as correntes de alimentação das cargas. A partir de cálculos contidos em normas e com o conhecimento prévio da potência das cargas, é possível definir os condutores utilizados para alimentação de cada carga. É importante lembrar que os condutores elétricos possuem uma determinada densidade de corrente por mm^2 , o que permite uma relação entre energia gerada nas perdas e energia dissipada aceitável. Esses valores são estipulados em tabelas pelos fabricantes de condutores elétricos. Instalar um condutor para operar numa densidade maior que a estipulada pelo fabricante submeterá esse condutor a uma geração de perdas maior que a dissipação de calor, resultando em seu aquecimento. Por outro lado, instalar um condutor para operar numa densidade de corrente, por mm^2 , muito abaixo da estipulada pelo fabricante incorrerá em aumento de investimento inicial em condutores.

Definir a proteção do sistema elétrico: significa definir os disjuntores dos circuitos de alimentação. Assim como nos condutores, a corrente das cargas define os disjuntores que serão utilizados. Observa-se que esses dispositivos desligam um trecho do circuito elétrico que está sob falha elétrica. Desta forma, esses dispositivos protegem a parte que está funcionando adequadamente, ou seja, protegem o resto do sistema elétrico.

O memorial descritivo: Consta da documentação de todos os cálculos e referências às normas que regulamentam os projetos elétricos, especificamente a norma NBR 5410.

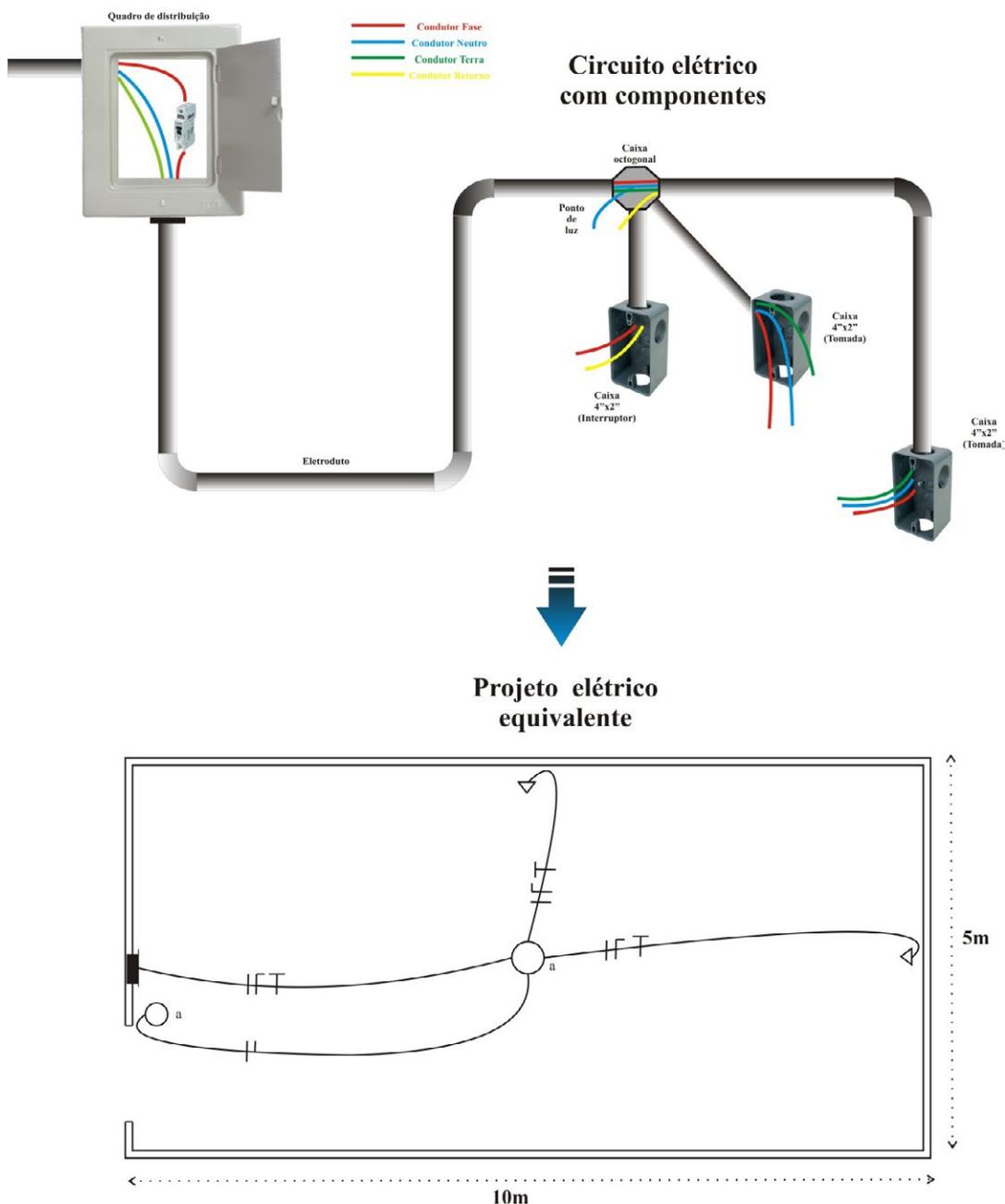
A planta baixa de um projeto elétrico é um conjunto de símbolos associados ao projeto arquitetônico. Tais símbolos estão descritos na norma NBR 5444. Alguns desses símbolos estão dispostos no Anexo I.

Na Figura 7.24, mais adiante representada, encontra-se um circuito de alimentação de um ponto de luz no teto e de uma tomada de uso geral a 30 cm do solo, provenientes de um quadro de distribuição. Observa-se a equivalência entre o circuito de componentes e um projeto de planta baixa a partir de símbolos dos componentes elétricos. Observa-se ainda a referência dos condutores que estão no interior dos eletrodutos. Os projetos elétricos podem apresentar vários objetivos, como:

- Padronizar a linguagem do circuito.
- Facilitar a determinação do quantitativo e custo do material.
- Facilitar a execução do projeto e a fiscalização da obra.
- Facilitar a manutenção do circuito elétrico.

Importante: Nas instalações elétricas, somente a alimentação do condutor “fase” é interrompida, seja na proteção, inserção de disjuntores, por exemplo, seja no comando, inserção de chaves e interruptores.

Figura 7.24 – Circuito de alimentação de um ponto de luz no teto e uma tomada de uso geral a 30 cm do solo



Exemplo 7.2

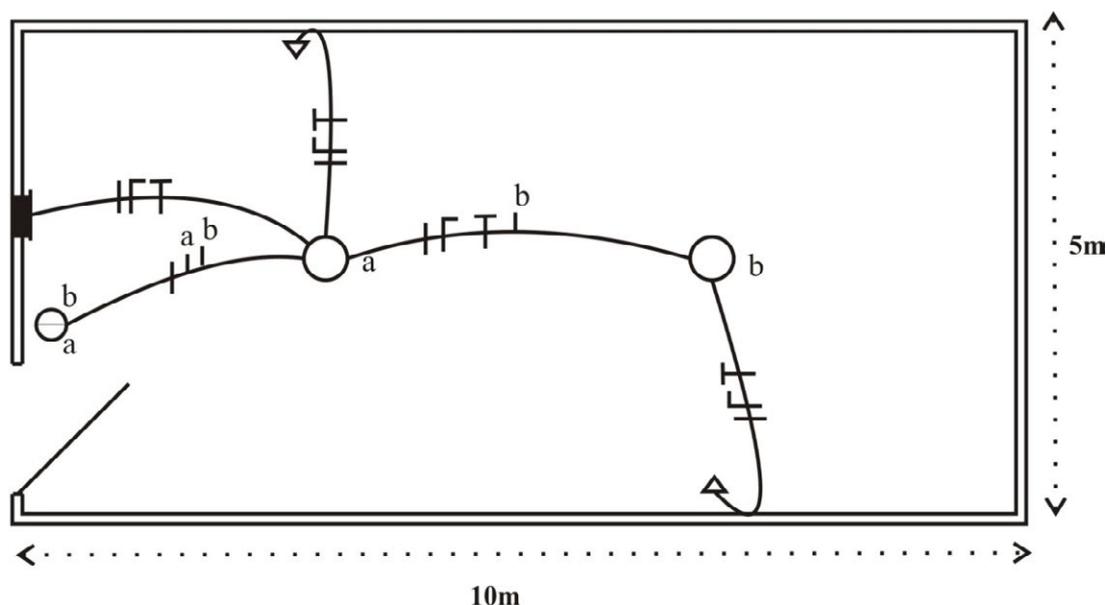
Observa-se na Figura 7.25 um projeto para dois pontos de luz e duas tomadas. Observa-se, ainda, que, entre os pontos de luz *a* e *b*, há presença somente do retorno vindo do ponto de luz de *b*, e, no eletroduto do ponto de luz *a* ao interruptor, há presença dos dois retornos vindos dos pontos *a* e *b*. De posse de um escalímetro técnico, cotaram-se as seguintes distâncias:

Descrição	Distância (m)
Ponto de luz <i>a</i> ao ponto de luz <i>b</i> (sem altura)	3,75
Ponto de luz <i>a</i> ao quadro de distribuição (sem altura)	2,95
Ponto de luz <i>a</i> ao interruptor (sem altura)	3,00
Ponto de luz <i>a</i> à tomada da esquerda de quem entra (sem altura)	2,16
Ponto de luz <i>b</i> à tomada da direita de quem entra (sem altura)	2,53

Descrição	Distância (m)
Distância do teto ao quadro de distribuição	1,3
Distância do teto ao interruptor	1,7
Distância do teto às tomadas	2,5

Determine o quantitativo de eletrodutos, fios fase, neutro, terra, retorno, caixas octogonais e caixas 4" x 2".

Figura 7.25 – Exemplo de um circuito de alimentação de dois pontos de luz no teto e duas tomadas de uso geral a 30 cm do solo



Resolução:

a) Eletrodutos:

Em todas as distâncias há eletroduto, desta forma:

$$Q_{eletroduto} = 3,75 + 2,95 + 3 + 2,16 + 2,53 + 1,3 + 1,7 + 2,5 = 19,89 \text{ m}$$

b) Condutor fase:

Do mesmo modo que os eletrodutos, há condutor fase em todos os pontos, assim:

$$Q_{fase} = 19,89 \text{ m}$$

c) Condutor Neutro:

Só não há neutro no eletroduto entre o ponto de luz *a* e o interruptor, logo:

$$Q_{neutro} = 19,89 - 3,0 - 1,7 = 15,19 \text{ m}$$

d) Condutor Terra:

Neste Projeto, é semelhante ao condutor neutro:

$$Q_{terra} = 15,19 \text{ m}$$

e) Condutor Retorno:

Há um retorno entre os dois pontos de luz e dois retornos entre o ponto de luz *a* e o interruptor, assim:

$$Q_{retorno} = 3,75 + 2(3 + 1,7) = 13,15 \text{ m}$$

Quantitativo geral:

Item	ud	Quantitativo
Eletroduto	m	19,89
Fio Fase (vermelho)	m	19,89
Fio Neutro (azul)	m	15,19
Fio Terra (verde)	m	15,19
Fio Retorno (amarelo)	m	13,15
Caixa Octogonal	ud	2
Caixa 4" x 2"	ud	3

Para uma quantificação mais conservadora, é necessário acrescentar 10% ou até 20% aos condutores e eletrodutos. Esta atitude visa prever pequenos desvios entre o projeto e sua execução.

7.10 Geração concentrada *versus* geração distribuída

Já é possível gerar energia elétrica na residência e até vender energia elétrica para concessionárias. Esta prática é chamada geração distribuída. A grande vantagem da geração distribuída é o aproveitamento de recursos renováveis e de baixo impacto ambiental, como a geração eólica, geração fotovoltaica e queima de biomassa. Isto, além de reduzir o impacto ambiental da matriz energética, a torna menos dependente dos recursos hídricos e da variação de preço dos combustíveis fósseis. É mostrado na Figura 7.26 um *grid tie*, equipamento que transfere a energia gerada na residência para a rede da concessionária de energia elétrica. O medidor de energia registra o fluxo nos dois sentidos: concessionária para residência e residência para concessionária.

Figura 7.26 – *Grid tie* – equipamento que transfere a energia gerada na residência para a rede da concessionária de energia elétrica



7.11 Considerações sobre segurança em sistemas elétricos de baixa tensão

Como já foi mencionado, as atividades relacionadas a execução e manutenção de sistemas elétricos são atividades perigosas. Há sempre risco de acidentes envolvendo choques elétricos. Os danos oriundos de choque elétrico dependem de diversos fatores:

- **Nível da tensão.** Com tensões acima de 80 V, já é possível evidenciar sensações desagradáveis. Tensões na faixa de 220 V já podem causar danos graves e até a morte. Desta forma, quanto maior o nível de tensão, maior o risco, e maior deve ser a cautela.
- **Caminho da corrente.** A corrente circulando pelo coração pode causar arritmias, parada cardíaca e desfibrilação.
- **Tempo de exposição.** O tempo de exposição ao choque é outro fator importante. Quanto maior o tempo de exposição, maior é o risco de danos físicos. Por exemplo, os dispositivos de proteção contra choques DR trabalham com uma abertura de chave na faixa de 40 ms. Para baixa tensão é um tempo de abertura seguro.

Os equipamentos de proteção individuais (EPIs) contra choques elétricos são importantíssimos, pois minimizam os riscos desses acidentes. Os principais equipamentos de proteção em instalações elétricas de baixa tensão são:

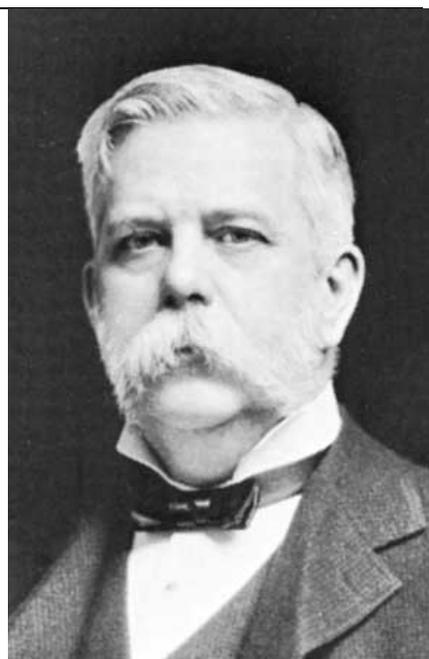
	<p>Calçado com solado isolado: este equipamento é o mais importante, pois a maioria dos choques acontece com percurso de corrente dos dedos para a terra. Esta corrente passa pelo solado dos pés rumo à terra. Uma alta resistência elétrica no solado reduz muito a corrente e seus danos consequentes.</p>
	<p>Luva isolante: aumenta a resistência no contato dos dedos.</p>
	<p>Chave teste: Apesar de não ser considerado um EPI, sua utilização deve ser estimulada, pois detecta problemas de isolamento em carcaça, detecta também se barramentos e outras partes estão energizados. Na maioria dos casos, é composta de uma lâmpada de neon que só brilha acima de 80 V. Deve ser o equipamento sempre às mãos do técnico. Antes da manipulação, deve-se testar a parte a ser manipulada com chave teste.</p>

Modo de testar: Segure no cabo isolado e encoste a ponta metálica na parte que se quer testar. Encoste o polegar na parte metálica da extremidade do cabo isolado.

Os riscos inerentes ao trabalho em sistemas elétricos são descritos na norma regulamentadora NR10 do Ministério do Trabalho e Emprego – MTE. Para aprofundamento do conhecimento consultar tal norma.

George Westinghouse Jr. (1846-1914)

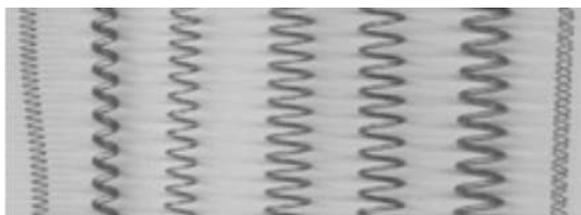
Engenheiro e empresário americano. Por causa de sua profunda capacidade inventiva, são-lhe atribuídas inúmeras patentes, como, por exemplo, freios a ar comprimido empregados em trens. Era um defensor da utilização da corrente alternada desde a geração, transmissão em alta tensão e distribuição nas cidades. Tal sistema de corrente alternada permitiu reduzir o custo e aumentar o acesso das pessoas à energia elétrica. É célebre a disputa entre Westinghouse e Thomas Edison que defendia a corrente contínua. Em 1895, uma usina hidrelétrica foi construída nas cataratas do Niágara. A Niagara Power Station nº 1 entrou em operação por volta de 1895, com 37 MW. Transmítia em 20 kV até a cidade de Buffalo, feito que jamais poderia ser alcançado, na época, por um sistema de corrente contínua.

**PRÁTICAS NA SALA DE AULA**

- Identifique as fases, neutro e terra de um quadro de distribuição.
- Meça a tensão entre dois barramentos de duas fases de um quadro de distribuição predial.
- Meça a tensão entre dois barramentos fase-neutro de um quadro de distribuição predial.
- Com ajuda de uma terrômetro, realize medição da resistência de terra de uma haste de terra enterrada em campo aberto.
- Desenhe o sistema elétrico da sua casa com suas cargas.
- Desenhe o esquema de ligação de entrada de uma pequena residência, com o medidor, disjuntor geral, disjuntor dos circuitos, condutor terra e o quadro de distribuição para as seguintes cargas: três tomadas, quatro lâmpadas, um chuveiro e um condicionador de ar de 7000 BTUs.
- Dimensione os disjuntores e os condutores da instalação anterior.
- Esboce o esquema de ligação de um interruptor simples, para ligar e desligar uma lâmpada de um só ponto, utilizando a simbologia deste livro.
- Esboce o esquema de ligação de 2 interruptores paralelos, para ligar e desligar uma lâmpada, de dois pontos distintos, utilizando a simbologia deste livro.
- Esboce o esquema de ligação de dois interruptores paralelos e um *Four-way*, para ligar e desligar uma lâmpada, de três pontos distintos, utilizando a simbologia deste livro.
- Desenhe um quarto de dormir de 3 m por 3 m e elabore um projeto de um ponto de luz e duas tomadas, com o quantitativo aproximado dos materiais utilizados.

Exercícios propostos

- 7.1** O NICROMO é um condutor composto de uma liga de Níquel e Cromo, muito utilizado para gerar calor. Tem alta resistividade e alta estabilidade física a altas temperaturas. Por essas características, é muito comum sua utilização em ferros de passar, estufas, aquecedores de líquido, torradeiras e outras aplicações.



Sua resistividade está por volta de $1,15 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$. Na Tabela 7.4, são encontrados os valores típicos de corrente necessária para diversas temperaturas, para cada seção comercial de NICROMO. Determine o comprimento do condutor para gerar 200°C , para ser empregado num aquecedor de líquido, utilizando a lei de Ohm, para os seguintes dados:

- Tensão: 220 V; Fio: 16 AWG
- Tensão: 220 V; Fio: 22 AWG
- Tensão: 110 V; Fio: 16 AWG
- Tensão: 110 V; Fio: 22 AWG

Tabela 7.4 – Valores típicos de corrente necessários para diversas temperaturas para NICROMO

AWG	Seção (mm^2)	T = 205 °C	T = 315 °C	T = 427 °C	T = 538 °C	T = 649 °C	T = 760 °C
14	2,09	8,40	11,6	15,0	18,8	23,5	29,0
15	1,65	7,20	10,0	12,8	16,1	20,0	24,5
16	1,30	6,40	8,7	10,9	13,7	17,0	20,9
17	1,04	5,50	7,5	9,5	11,7	14,5	17,6
18	0,818	4,80	6,5	8,2	10,1	12,2	14,8
19	0,650	4,30	5,8	7,2	8,7	10,6	12,7
20	0,515	3,80	5,1	6,3	7,6	9,1	11,0
21	0,407	3,30	4,3	5,3	6,5	7,8	9,4
22	0,322	2,90	3,7	4,5	5,6	6,8	8,2
23	0,255	2,58	3,3	4,0	4,9	5,9	7,0
24	0,204	2,21	2,9	3,4	4,2	5,1	6,0

- 7.2 Esboce o esquema de ligação de um interruptor de uma seção, para ligar e desligar uma lâmpada, utilizando a simbologia deste livro.
- 7.3 Esboce o esquema de ligação de um interruptor de duas seções, para ligar e desligar duas lâmpadas distintas, num mesmo ambiente, utilizando a simbologia deste livro.
- 7.4 Esboce o esquema de ligação de dois interruptores paralelos, para ligar e desligar uma lâmpada, de dois pontos distintos, utilizando a simbologia deste livro.
- 7.5 Esboce o esquema de ligação de dois interruptores paralelos e um *Four-way*, para ligar e desligar uma lâmpada, de três pontos distintos, utilizando a simbologia deste livro.
- 7.6 Responda:
- Quais as funções de um aterramento?
 - Por que é importante aterrar a carcaça de uma máquina de lavar roupa e geladeira?
 - Quais as funções do fusível e do disjuntor?
- 7.7 Esboce o esquema de ligação de chuveiro elétrico de 4000 W em 220 V, com seu respectivo disjuntor, utilizando a simbologia deste livro. Qual o valor da corrente do disjuntor?
- 7.8 Elabore uma planilha de todas as cargas elétricas da sua residência, com suas respectivas potências nominais. A soma de todas as potências é conhecida como potência total instalada. Qual a potência total instalada na sua casa?
- 7.9 Observe, nas proximidades da sua casa, qual o transformador que alimenta a rede elétrica de sua casa. Qual a potência deste transformador em kVA? Fotografe-o e mostre ao seu professor.

Pesquisa e discussão em grupo

Por que a corrente alternada se mostrou mais eficiente para ser utilizada nos sistemas elétricos de potência?

REFERÊNCIAS

ANHUI LERADER ELECTRONIC MFG. **Download – Catalogues**. Disponível em: <http://leadercable.com/info.asp?base_id=4>. Acesso em: out. 2018.

COTRIM, Ademaro A. M. B. **Instalações elétricas**. São Paulo: Prentice Hall, 2009.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., Charles; UMANS, Stephen D. **Electric machinery**. Nova York: McGraw Hill, 2003.

GUSSOW, Milton. **Eletricidade Básica**. Porto Alegre: Bookman, 2009. (Coleção Schaum).

IBT – Indústria Brasileira de Transformadores. Disponível em: <<http://www.ibt.com.br/>>. Acesso em: ago. 2017.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **Norma IEC 60479-1**. Effects of current on human beings and livestock–Part 1: General aspects. IEC, Geneva, 2005.

KOSOW, Irving I. **Máquinas elétricas e transformadores**. São Paulo: Editora Globo, 1989.

LIGHTNING & SURGE TECHNOLOGIES. **Earthing Techniques**. Disponível em: <<http://www.lightningman.com.au/Earthing.pdf>>. Acesso em: ago. 2017.

LIPO, Thomas A. **Introduction to AC machine design**. Madison: Wisconsin Research Center, University of Wisconsin, 2004.

ONS – Operador Nacional do Sistema. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/>>. Acesso em: maio 2017.

PVC. **Electrical insulation characteristics**. Disponível em: <<http://www.pvc.org/en/p/electrical-insulation-characteristics>>. Acesso em: fev. 2018.

SIEMENS. **Building Technologies**. Disponível em: <<https://w3.siemens.com.br/buildingtechnologies/br/pt/Pages/BT.aspx>>. Acesso em: mar. 2018.

8 Introdução às Cargas Elétricas Domésticas

As cargas elétricas domésticas fazem parte do nosso dia a dia de maneira muito intensa. Quantas vezes por dia ligamos ou desligamos interruptores? São essas cargas que nos fazem notar que a eletricidade sempre esteve muito próxima a nós. Cada uma dessas cargas possui uma história, uma evolução realizada passo a passo por pessoas dentro dos laboratórios, dos centros de pesquisa das universidades e das organizações com fins lucrativos. Este capítulo apresenta, de forma introdutória, algumas das cargas elétricas residenciais, suas partes construtivas, seus princípios de funcionamento e aspectos históricos da sua evolução.

8.1 Lâmpadas elétricas

A lâmpada é a carga elétrica mais presente e mais próxima aos consumidores. Um dos grandes impulsos ao desenvolvimento dos sistemas elétricos foi a intenção de iluminar ambientes tanto domésticos como externos. Por trás do simples ato de apertar um interruptor, existe muita história e muito desenvolvimento tecnológico ao longo de mais de 200 anos. As experiências do cientista russo Vasily V. Petrov, em 1802, e, posteriormente, do britânico Humphry Davy, em 1808, foram o ponto de partida na utilização da eletricidade para iluminar. A experiência Humphry Davy foi mostrada no Instituto Real Britânico com uma fonte de tensão contínua, obtida por muitas células de baterias. Humphry Davy fez com que passasse corrente por dois eletrodos de carbono, criando um arco brilhante que iluminou todo o ambiente. Apesar de a experiência demonstrada por Humphry Davy não ser grandiosa aos olhos da atualidade, foram esses tipos de experiências que abriram a possibilidade de a eletricidade ser utilizada para resolver problemas humanos. Sem dúvida, um dos maiores problemas do século XVIII era a iluminação.

Os principais tipos de lâmpadas elétricas são: incandescentes, lâmpadas de descarga e LED.

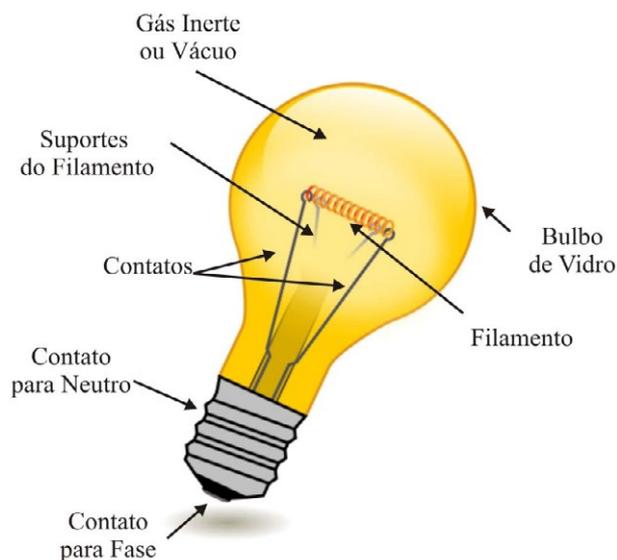
8.1.1 Lâmpada incandescente – a incandescência sem fusão

A lâmpada incandescente, vista na Figura 8.1, consta de uma resistência elétrica (filamento) alimentada por uma fonte de tensão. A corrente elétrica fluirá pela resistência, gerando calor por efeito Joule e incandescência. Pelo equilíbrio entre o calor gerado no filamento e o calor dissipado para o meio ambiente, é definida a temperatura deste filamento. Se a temperatura subir além do ponto de fusão do filamento, este se partirá interrompendo a passagem da corrente elétrica. Neste caso, popularmente se diz que a lâmpada “queimou”. Então, o grande problema da lâmpada é alcançar a incandescência sem sua fusão. A atribuição da descoberta da lâmpada incandescente é confusa, já que, na segunda metade do século

XVIII, vários cientistas testaram diferentes filamentos, como, por exemplo, pelos de animais, fibras vegetais. Muitos dizem ter sido Joseph Wilson Swan, cientista inglês, quem, em 1860, percebeu que o vácuo parcial do tubo aumentava a vida útil do filamento. Outros atribuem a Thomas Alva Edison essa descoberta. Edison tinha visão científica e empresarial, buscava um modelo economicamente viável. Para isso compôs uma grande equipe de muitos cientistas que trabalhavam para ele nos mais diversos campos da eletricidade. Essa equipe utilizou muitos tipos de filamento, como carbono, platina, fibras vegetais... até cabelo humano foi testado. Em 1879, Edison testou um modelo que obteve uma duração de 13,5 horas, chegando a modelos viáveis economicamente, com até 600 horas de duração.

Atualmente a lâmpada incandescente possui um rendimento por volta de 10%, ou seja, somente 10% de toda energia consumida pela lâmpada é transformada em luz visível. Aproximadamente 70% de toda energia desse tipo de lâmpada é transformada em luz infravermelha (não visível), ou seja, transformada em calor radiante; cerca de 20% dessa energia restante, em calor não radiante. Desta forma, para fins de iluminação, seu rendimento é muito baixo, sendo atualmente muito desestimulada sua fabricação.

Figura 8.1 – Lâmpada Incandescente Standard



8.1.2 Lâmpada de descarga

As lâmpadas de descarga utilizam um procedimento diferente daquele das lâmpadas incandescentes. Elas utilizam uma corrente elétrica num gás que se encontra no interior de um tubo. Quando uma descarga de elétrons passa pelo gás ionizado, os elétrons colidem com átomos dentro do tubo. Nesta colisão, há transferência de energia para esses átomos, cujos elétrons vão momentaneamente para níveis de maior energia. Ao voltarem para os níveis anteriores, emitem fótons, isto é, pacotes de energia sob a forma de luz numa determinada frequência. A frequência da luz emitida depende basicamente do gás no interior do tubo (ver Tabela 8.1). Os gases nobres, contidos na coluna do extremo direito da tabela periódica, são os mais frequentemente utilizados para a produção desse tipo de lâmpada.

Tabela 8.1 – Alguns gases que podem ser utilizados em lâmpadas de descarga e sua frequência da luz emitida

Gás	Frequência da luz emitida
Hélio	Vermelha
Neônio	Laranja
Argônio	Violeta
Kriptônio	Verde-azul
Xenônio	Branco-azulado
Vapor de sódio	Amarelo
Vapor de mercúrio	Ultravioleta

As lâmpadas fluorescentes a vapor de mercúrio, a baixa pressão, são as mais utilizadas em ambientes domésticos. Dois tipos de lâmpadas fluorescente se destacam, expostas na Figura 8.2: as fluorescentes lineares, com operação a 60 Hz, e as fluorescentes compactas (eletrônicas), com operação a 30 kHz.

Figura 8.2 – (a) Lâmpada linear fluorescente para operação em 60 Hz;
(b) Fluorescente compacta (eletrônica) para operação em 30 kHz

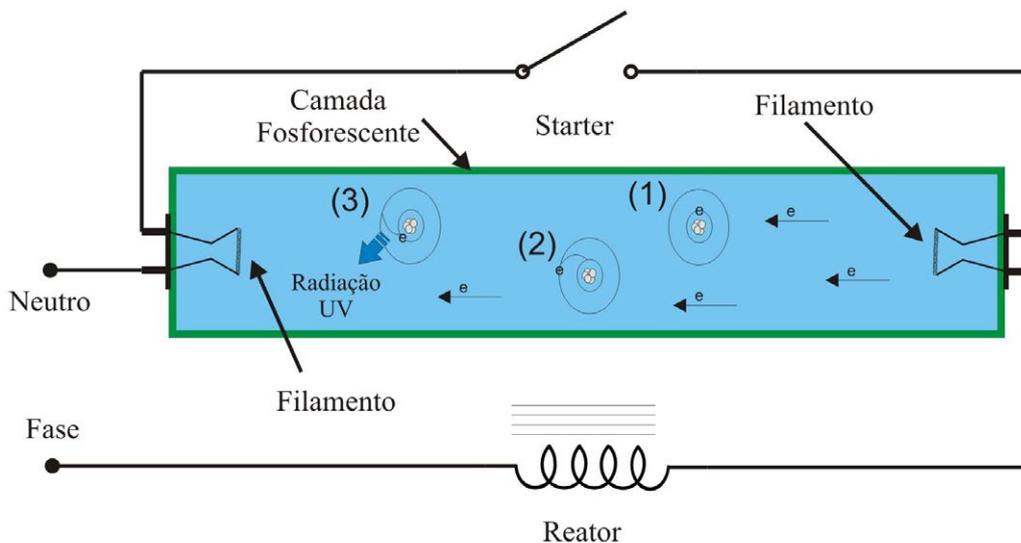


Fluorescentes com ionização em baixa frequência

O primeiro modelo de lâmpada fluorescente a vapor de mercúrio, a baixa pressão, nos moldes que temos hoje, foi proposta, no começo do século XX, pelo cientista americano Peter Cooper Hewitt. No interior do bulbo da lâmpada fluorescente, há gás argônio (gás inerte) e uma pequena quantidade de mercúrio líquido. O processo de funcionamento da lâmpada de vapor de mercúrio, visto na Figura 8.3, começa com um pico de alta tensão originado pela variação súbita de corrente no reator (indutor de núcleo ferromagnético). É bom lembrar que a tensão induzida num indutor é proporcional à variação de corrente no tempo do seu enrolamento. Quanto maior for esta variação, maior será a tensão induzida. A ação do *stater* faz com que esta corrente se estabeleça e caia a zero subitamente, isto cria picos de tensão no filamento da lâmpada. Esses picos de tensão aquecem os filamentos, tornam o mercúrio líquido e ionizam o gás argônio. O gás argônio torna-se um condutor. Devido ao alto campo elétrico entre os dois filamentos, os elétrons se movimentam, de um filamento para outro,

dentro do tubo. Com a condução elétrica do gás, o reator passa a ter uma nova função: limitar a corrente em todo circuito que passa pela lâmpada. Se não fosse a presença do reator, a corrente aumentaria para valores muito altos. Os elétrons livres no gás se chocam com os átomos de mercúrio (1). Os elétrons do átomo de mercúrio passam aos níveis de energia maiores (2). Quando esses elétrons do átomo de mercúrio voltam a sua condição inicial de energia, irradiam fótons (3), no caso, luz ultra violeta, que não é visível aos olhos humanos. Um material fosforescente branco, contido nas paredes do bulbo de vidro, emite luz visível quando é atingido por luz ultra violeta. Observa-se que o reator é fundamental no processo de ionização e na limitação da corrente na lâmpada.

Figura 8.3 – Lâmpada Fluorescente – ionização em 60 Hz

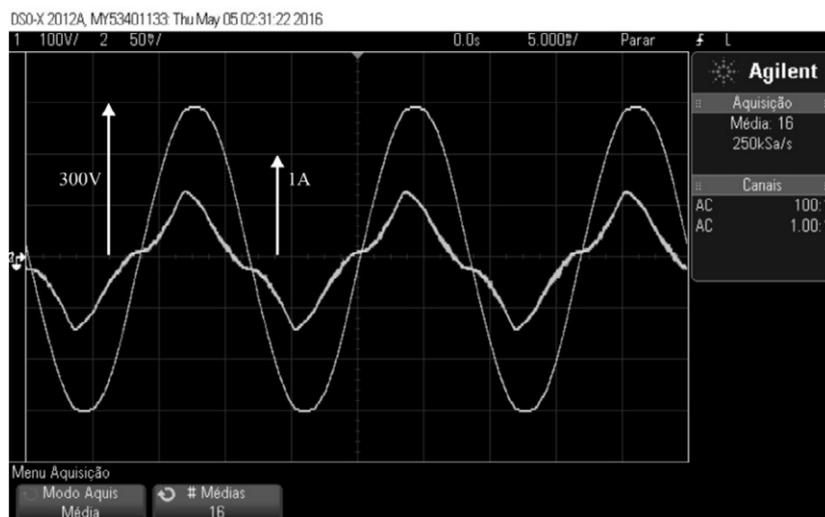


A lâmpada fluorescente a vapor de mercúrio, a baixa pressão, típica, transforma por volta de 22% da energia em luz visível, e há uma redução significativa na irradiação infravermelha por volta de 36% de toda energia; é uma lâmpada mais fria que a incandescente e produz uma composição de cores muito mais próxima à luz natural que a lâmpada incandescente.

Uma grande desvantagem da lâmpada de descarga a 60 Hz é a necessidade de dois processos de condução do gás por período de 60 Hz. A lâmpada chega a apagar em meio período, ou seja, a lâmpada pisca numa frequência de 120 vezes por segundo. Isto é chamado efeito estroboscópico, que, apesar de não ser detectado pelos olhos humanos, traz cansaço, principalmente se for utilizado para tarefas que exijam esforço de visão, como leitura.

A corrente de alimentação dessa lâmpada é vista na Figura 8.4. Você pode observar que a corrente da lâmpada não é totalmente senoidal. Há harmônicos, principalmente 3º harmônico, devido à presença do reator. Além do mais, a corrente não está em fase com a tensão, mostrando que há reativos indutivos causados novamente pelo reator. De fato, o fator de potência das lâmpadas fluorescentes é baixo, salvo em lâmpadas com correção de fator de potência.

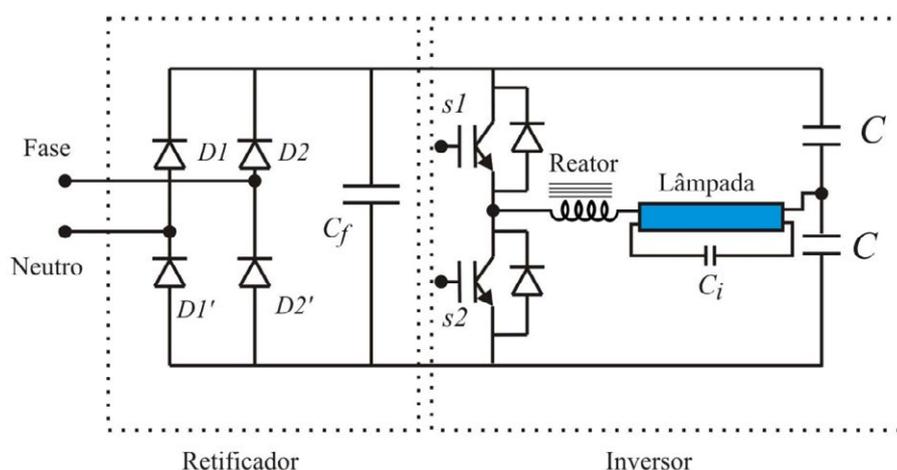
Figura 8.4 – Tensão e corrente de uma lâmpada fluorescente 220 V / 40 W



Operação em alta frequência – Fluorescentes compactas (CFL)

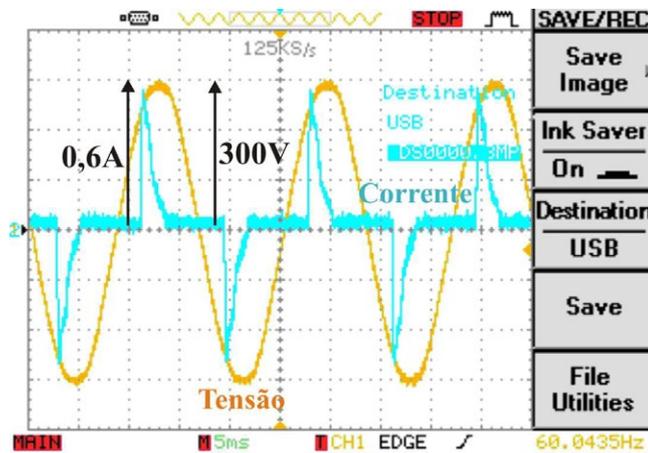
A indústria percebeu que o aumento da frequência de alimentação da lâmpada fluorescente aumentava sua eficiência. A 30 kHz, o aumento da eficiência chega a 11% em relação à alimentação em 60 Hz. Com o aumento da frequência, havia uma redução física do tamanho do reator, além de diminuir significativamente o efeito estroboscópico. No entanto, para alimentar a lâmpada com frequências altas, a partir do nosso sistema que possui frequência de 60 Hz, se faz necessária a utilização de circuitos eletrônicos. O circuito padrão para acionamento de lâmpadas compactas é mostrado na Figura 8.5. O circuito é composto de um retificador com 4 diodos e um inversor com 2 chaves estáticas que controlam a tensão sobre a lâmpada em série com o reator.

Figura 8.5 – Circuito eletrônico típico de alimentação de lâmpadas fluorescentes compactas



A corrente de alimentação do circuito eletrônico, mostrada na Figura 8.6, é típica de um retificador. Observa-se que a tensão possui forma senoidal, como era de se esperar, o que não se aplica à corrente.

Figura 8.6 – Tensão e corrente de alimentação do circuito de uma lâmpada compacta de 20 W, 220 V



Uma grande polêmica a respeito das lâmpadas fluorescentes a vapor de mercúrio é o risco do próprio mercúrio para as pessoas e para o meio ambiente, se por acaso o bulbo vier a quebrar. É, na realidade, uma guerra entre indústrias que envolve muito dinheiro e muitas informações contraditórias. Exposições ao mercúrio podem ser extremamente tóxicas ao ser humano, causando uma série de efeitos ao organismo, principalmente no sistema nervoso.

Algumas pesquisas, publicadas em artigos, consideram, entretanto, a quantidade de mercúrio contida nas lâmpadas fluorescentes – cerca de 3 a 5 mg – de pouca expressividade para uma intoxicação, se houver pouco tempo de exposição. Outros estudos, porém, admitem essa possibilidade de intoxicação, mesmo com pouco tempo de exposição, se esta ocorrer em ambientes fechados. Em todo caso, valem as seguintes recomendações:

- Nunca quebrar o bulbo de uma lâmpada fluorescente, principalmente em ambiente fechado.
- Ao queimar uma lâmpada fluorescente, acondicioná-la num saco plástico e fechá-lo para que, em caso de quebra, não haja fuga do mercúrio para o meio ambiente.
- Descartar esse tipo de material em locais de coleta apropriados, para fins de reciclagem.

8.1.3 Lâmpada a LED

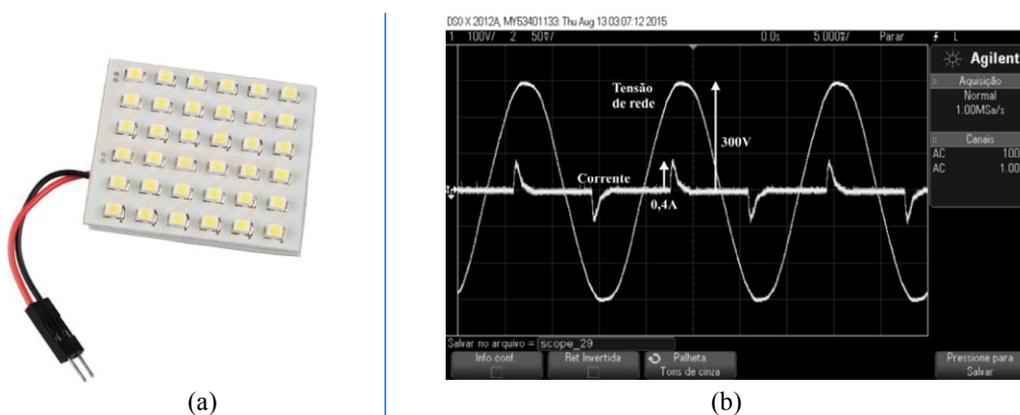
A palavra LED é a abreviação de “*Light Emitting Diode*”, ou diodo emissor de luz. O LED já era muito utilizado em várias aplicações, como displays e sinalizadores para aparelhos eletrônicos. A utilização de LED para iluminação ambiente passou a ser popular devido à sua alta eficiência. Em média, as lâmpadas a LED são 70% mais eficientes que as CFL (fluorescente compacta) e 550% mais eficientes que as incandescentes. O LED é um diodo e opera com corrente contínua. Desta forma, para utilização em corrente alternada, a lâmpada de LED necessita de um retificador, para converter corrente alternada em corrente contínua, e de um redutor de tensão, em outras palavras, necessita de um circuito eletrônico para seu acionamento, conhecido popularmente como *driver* para LED ou *LED Driver*. O driver para LED para aplicação em corrente alternada possui no mínimo duas funções: retificação e redução da tensão retificada.

O LED é um emissor de luz unidirecional, que não é uma característica muito desejável para iluminação ambiente. A indústria desenvolveu, nas últimas décadas, matrizes de LED (ver Figura 8.7 (a)) bem como vem melhorando a difusão (espalhamento) da luz, com o aperfeiçoamento dos bulbos das lâmpadas.

Além da eficiência, as lâmpadas de LED apresentam duas grandes vantagens em relação às lâmpadas fluorescentes: a durabilidade (em média 150% maior que as CFL) e ausência de mercúrio na sua composição.

Assim como as lâmpadas fluorescentes compactas, as lâmpadas a LED necessitam de retificadores para transformar tensão alternada em tensão contínua. A corrente de alimentação dessas lâmpadas, ver exemplo na Figura 8.7 (b), possui o mesmo formato das lâmpadas CFL, apesar de intensidades diferentes. Como nosso sistema elétrico é senoidal, o ideal seria que as correntes e tensões fossem senoidais. Circuitos eletrônicos, no entanto, principalmente retificadores, criam correntes que não possuem a forma senoidal. Este é um grande problema do sistema elétrico que vai se tornando mais evidente à medida que cresce a quantidade de cargas deste tipo. Este tipo de problema é um dos alvos de estudo em qualidade de energia. Devido ao fato de a qualidade da energia ser um assunto cada vez mais recorrente, dedicamos o Capítulo 10 ao seu estudo, embora de forma apenas introdutória.

Figura 8.7 – (a) Matriz com 36 LEDs utilizados em lâmpadas comerciais;
(b) Tensão e corrente de alimentação do circuito de uma lâmpada a LED de 10 W, 220 V

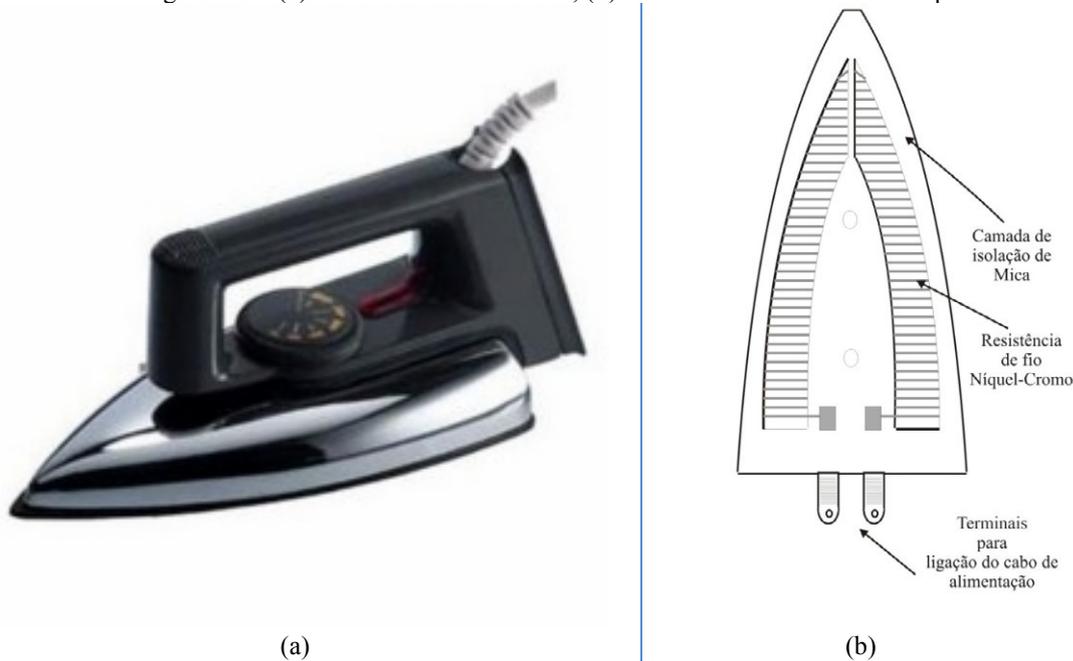


8.2 Ferro de passar

O ferro de passar, visto na Figura 8.8 (a), é uma das maiores cargas de uma residência – despende por volta de 1200 W. Este componente possui uma resistência elétrica, vista na Figura 8.8 (b), que, ao ser ligada numa fonte de tensão alternada de 110 V ou 220 V, é circulado por corrente que gera calor por efeito Joule.

A mica é utilizada como material de isolamento elétrico entre a resistência elétrica e a parte metálica, que, não raro, entra em contato com o usuário. Uma grande parte dos acidentes domésticos envolvendo choques elétricos acontece na manipulação do ferro de passar. A mica é um composto mineral brilhante que possui alta resistividade e rigidez dielétrica, além de manter suas características elétricas e físicas até altas temperaturas, a mais de 500 °C. Por isso, é muito utilizada em aplicações de isolamento na presença de calor intenso.

Figura 8.8 – (a) Ferro elétrico comercial; (b) Estrutura interna do ferro de passar

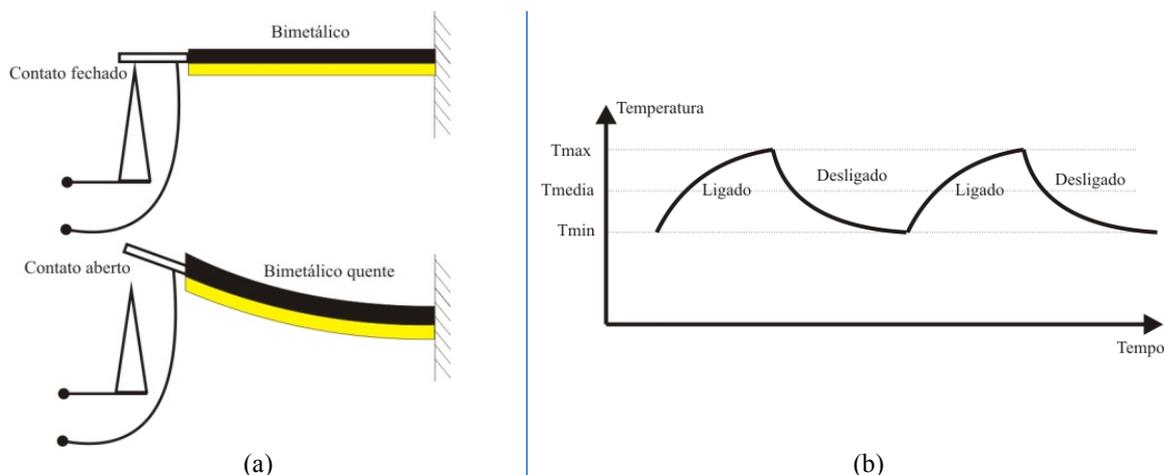


A resistência elétrica é composta de uma liga de níquel, cromo e ferro (NICROMO). Possui uma alta resistividade, por volta de $1,15 \Omega\text{mm}^2/\text{m}$, e uma boa estabilidade para altas temperaturas. Essas características fazem com que seja muito utilizada em geração de calor a partir de eletricidade.

No ferro de passar, o calor não é sinônimo de perda, já que a função do ferro é a utilização do calor. Boa parte deste calor é, contudo, perdido no ato de passar. Um dos principais equívocos e causas da má utilização da energia elétrica é ligar o ferro para passar pouca roupa, pois o tempo de pré-aquecimento e o tempo de esfriamento são considerados perdas elétricas. Dentro do possível, deve-se utilizar o ferro poucas vezes ao mês. Essa é uma das principais dicas de conservação de energia elétrica numa residência.

O controle da temperatura de um ferro de passar residencial é efetuado por um termostato bimetálico, como mostrado na Figura 8.9 (a).

Figura 8.9 – (a) Termostato bimetalítico – esquema simplificado; (b) Comportamento da temperatura no tempo



O elemento bimetalítico é formado por duas lâminas em contato, compostas de materiais diferentes e com coeficientes de dilatação diferentes. Quando frio, o elemento faz um contato físico entre dois terminais. Quando quente, o elemento encurva-se pela ação das dilatações diferentes, abrindo o contato físico, conseqüentemente, interrompendo o circuito elétrico. Isto faz com que a temperatura do ferro varie entre uma temperatura máxima e mínima, como representado na Figura 8.9 (b) acima, criando um controle conhecido como liga-desliga.

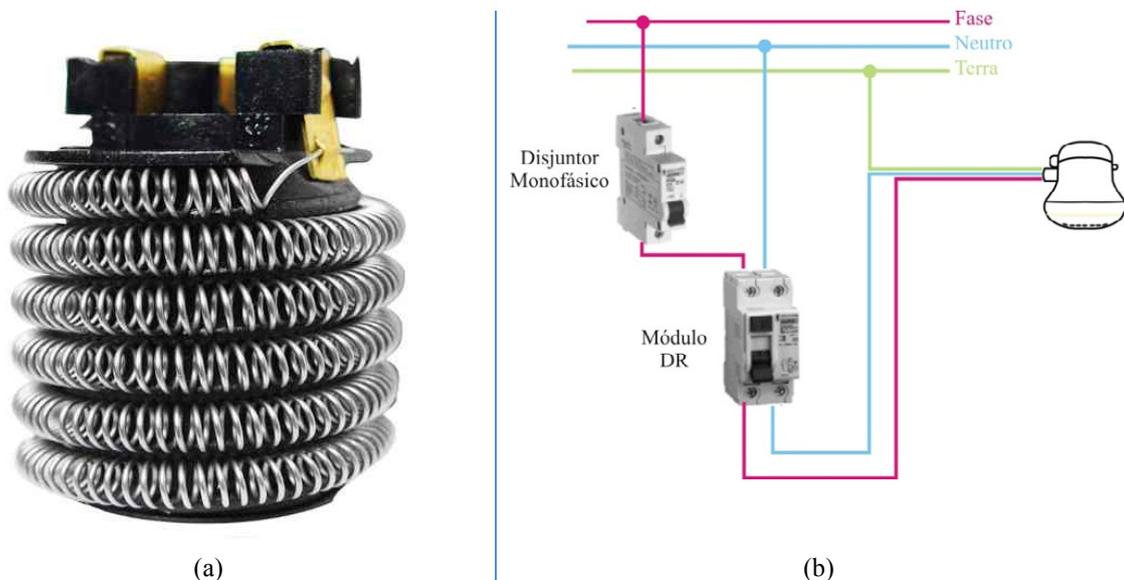
8.3 Chuveiro elétrico

Este eletrodoméstico é, sem dúvida, o responsável pela maior carga elétrica na grande maioria das residências. A potência dos chuveiros elétricos residenciais comercializados no Brasil varia de 4000 W a 7800 W. O calor é produzido por uma resistência elétrica de NICROMO ou cobre. A função do chuveiro é **transferir o calor para a água com segurança para o usuário**. Na Figura 8.10 (a) é mostrada uma resistência de chuveiro elétrico não blindada. A isolamento entre a resistência e a água é fundamental para o bom funcionamento do equipamento. O conduto por onde passa a água aquecida é aterrado, e este aterramento garante que, em caso de falha da isolamento, a proteção (disjuntor ou dispositivo DR) atue sem perigo para o usuário. A norma brasileira NBR-5410, que trata de instalações elétricas de baixa tensão, já obriga a utilização de dispositivos DR em chuveiros elétricos, com detecção menor ou igual a 30 mA. Vale lembrar que o aterramento protege o usuário de descargas elétricas, e essa resistência de aterramento deve ser a menor possível, pois, em caso de falha da isolamento, ela deve ser um caminho de menor resistência que o corpo humano. Como já foi abordado, as normas das concessionárias de distribuição de energia elétrica recomendam o mínimo possível para valores de resistência de terra. A qualidade deste aterramento está ligada diretamente ao risco de descarga elétricas para o usuário. Desta forma, as instalações do sistema de aterramento bem como do chuveiro elétrico devem ser realizadas por técnicos em eletrotécnica, conhecedores das normas de instalações elétrica de baixa tensão, com a total atenção ao cumprimento dos manuais dos fabricantes.

Um avanço na tecnologia de isolamento são os chuveiros blindados. A resistência é acondicionada num tubo com sílica de alta resistência elétrica e ótima condutora de calor. Isto garante uma isolamento adicional. Esses chuveiros são mais caros que os convencionais, no entanto proporcionam uma segurança maior para o usuário bem como evitam desligamentos espúrios dos dispositivos DR – em outras palavras, esse tipo de chuveiro é compatível com os dispositivos DR.

Na Figura 8.10 (b), mostra-se o esquema de ligação monofásica de um chuveiro elétrico. Em sistemas monofásicos de 127 V, podem ser utilizadas duas fases distintas ao invés de fase neutro. Apesar de o dispositivo DR possuir um teste incorporado, é prudente testar sua eficiência da instalação, ligando-se uma lâmpada na fase, na saída desse dispositivo, para o terminal terra. Este procedimento emula uma corrente fase-terra, ou seja, emula um choque elétrico. Neste caso o dispositivo DR deverá atuar, desligando a fase. É bom lembrar que esse tipo de instalação deverá ser executada por técnicos com competência adequada para a função.

Figura 8.10 – (a) Resistência elétrica não blindada; (b) Esquema de ligação monofásica de chuveiro elétrico



8.4 Condicionador de ar

Os condicionadores de ar são equipamentos utilizados para reduzir a temperatura e umidade do ambiente a níveis confortáveis, a partir de trabalho mecânico, com atuação de motores elétricos e válvulas. É uma transferência de calor de um ambiente frio para um ambiente quente, consumindo energia elétrica para isto. A carga elétrica dos condicionadores de ar típicos domésticos, para fins de cálculo de estimativa de demanda de residências, pode ser vista na Tabela 8.2. Esses valores são médios, pois as potências dos condicionadores de ar variam muito com a tecnologia.

A Unidade Térmica Britânica – BTU (British Thermal Unit), que equivale a 1055 kJ (quilojoule), é muito utilizada em processos térmicos. Para derreter um cubo de gelo de 453,6 gramas (1 libra), é necessária a energia de 144 BTUs.

O funcionamento dos condicionadores de ar comerciais é, em geral, baseado no ciclo refrigerante, cuja planta simplificada é mostrada na Figura 8.11. Este ciclo é igual ao funcionamento de geladeiras e de freezers. O ciclo propõe transferir calor de uma área fria para uma área quente, a partir de trabalho mecânico, efetuado pelos motores elétricos.

Tabela 8.2 – Potência aproximada de condicionadores de ar domésticos

Condicionador de ar (BTU)	Potência (W)	Potência (VA)
6000	800	1000
7100	900	1100
7500	1200	1412
8500	1300	1500
9000	1400	1647
10000	1400	1650
10500	1550	1824
11000	1600	1882
12000	1700	1900
14000	1900	2100
15000	2000	2222
18000	2600	2860
21000	2800	3080

1- O compressor aumenta a pressão do gás. No condensador, o gás a alta pressão se transforma em líquido. No processo de mudança de estado, o gás perde parte do seu calor para o ambiente externo.

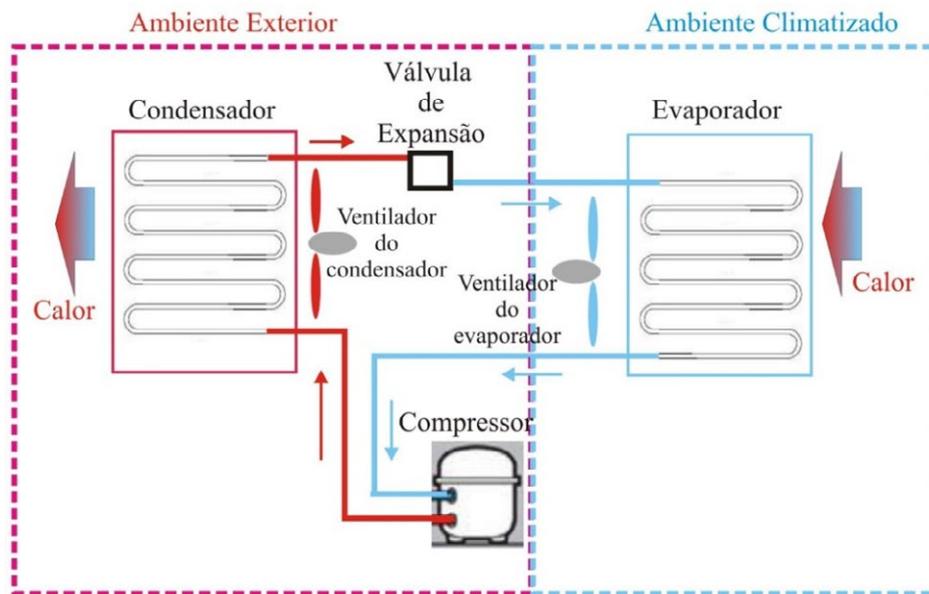
2- A válvula de expansão reduz a pressão do líquido.

3- O líquido a baixa pressão se move para o evaporador onde se transforma em gás. A mudança de estado faz com que o refrigerante absorva calor do ambiente interno.

4- Fecha o ciclo com o gás, sendo novamente comprimido pelo compressor.

Desta forma o ciclo compressão, condensação, expansão e evaporação é a técnica para transferir calor de um meio mais frio para mais quente. Os condicionadores do tipo janela possuem tanto o condensador quanto o evaporador no mesmo corpo. Já no condicionador de ar do tipo *Split* (dividido em inglês), o evaporador está localizado no ambiente climatizado e o condensador localiza-se no ambiente externo.

Figura 8.11 – Esquema de funcionamento de condicionadores de ar baseado em ciclo refrigerante



Três motores são observados no esquema, mas o responsável pela realização de trabalho é o motor do compressor. Assim, a energia elétrica consumida pelo compressor é a responsável pela transferência de calor do meio mais frio para o meio mais quente.

Este livro enfoca somente a função de transferência de calor do ambiente mais frio para o ambiente quente. O condicionador de ar possui outras funções informadas pelos fabricantes, como filtragem do ar, controle da umidade, controle microbiológico e outras mais específicas, que não serão explanadas, por não ser esse o nosso interesse imediato.

O que é condicionador de ar do tipo inverter ou digital inverter?

O condicionador de ar com tecnologia analógica controla a temperatura com um tipo de controle chamado liga-desliga. Existe um valor de temperatura de referência para o ambiente, que é a temperatura desejada pelo usuário. Quando a temperatura ambiente está acima da temperatura de referência, liga-se o compressor e a temperatura ambiente cai. Quando a temperatura ambiente cai além da referência, desliga-se o compressor, fazendo com que a temperatura ambiente suba. Esse procedimento cria um ciclo de liga-desliga do compressor, resultando numa temperatura ambiente que oscila em torno da referência, como representado na Figura 8.12 (a). Observe que o motor do compressor opera na velocidade nominal quando está ligado. Este tipo de tecnologia e controle está presente na grande maioria dos condicionadores de ar e, também, no ciclo de refrigeração da grande maioria das geladeiras domésticas. No âmbito deste controle, está o termostato, que lê a temperatura e promove a ação de ligar ou desligar o compressor.

A tecnologia inverter é uma alusão a conversores estáticos que utilizam chaves estáticas ou simplesmente inversores estáticos. A arquitetura simplificada é mostrada na Figura 8.13. A alimentação é realizada em corrente alternada. O retificador transforma tensão alternada em tensão contínua. O inversor é composto de três braços de duas chaves estáticas, na maioria

dos casos IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) – transistor bipolar de porta isolada. Uma chave estática não possui contatos físicos como uma chave convencional, como um interruptor simples. A chave estática é ligada a partir de tensões de controle de baixo nível. Por exemplo, para um IGBT, é possível uma tensão de 16 V ligar uma carga numa tensão de 1200 V. O inversor sintetiza qualquer valor de tensão alternada, sintetizando amplitude e frequência, dentro de limites estabelecidos pela alimentação. O resultado disto é que se pode controlar a velocidade do motor do compressor de zero até valores maiores que a velocidade nominal. O sistema agora não opera com uma velocidade constante como na tecnologia analógica. Isto permite que o compressor opere num estado em que a temperatura ambiente se estabilize na temperatura de referência de forma muito mais eficiente (ver Figura 8.12 (b)).

Há inúmeras vantagens na tecnologia *inverter* utilizada em condicionadores de ar. Ressaltamos duas delas:

- O compressor opera numa condição otimizada, com menos perdas. Desta forma, mesmo com a adição de perdas no retificador e inversor, ainda se consegue redução de consumo de energia no cômputo geral.
- Redução substancial das oscilações de temperatura ambiente, como demonstrado na Figura 8.12 (b), melhorando o conforto para os usuários e reduzindo o consumo de energia.

Figura 8.12 – (a) Controle liga/desliga do condicionador de ar;
(b) Controle em malha fechada do condicionador de ar

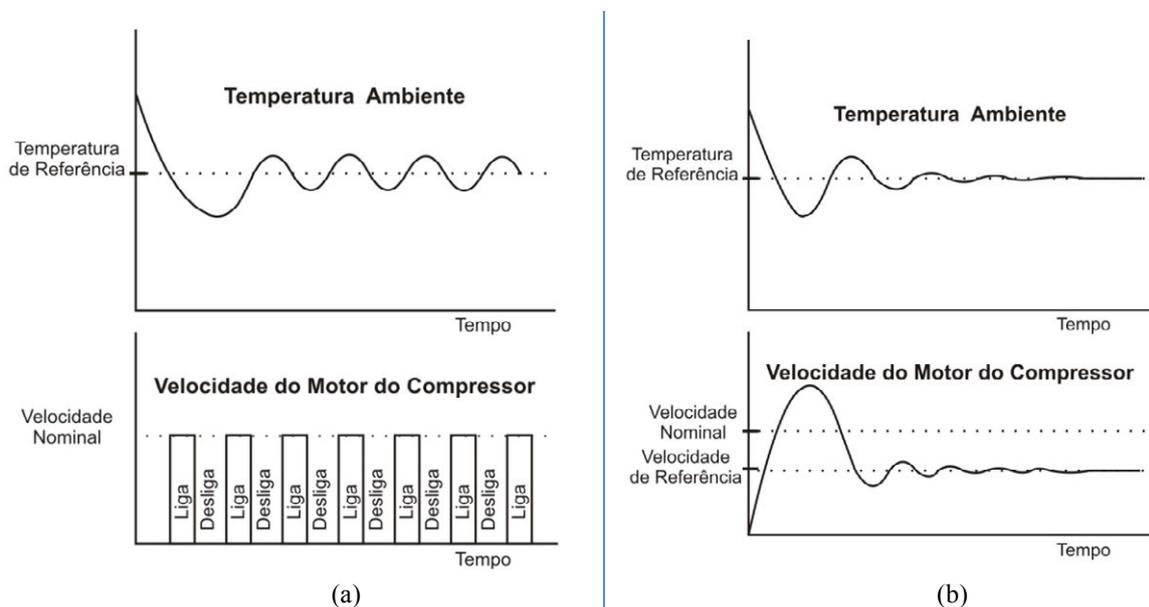
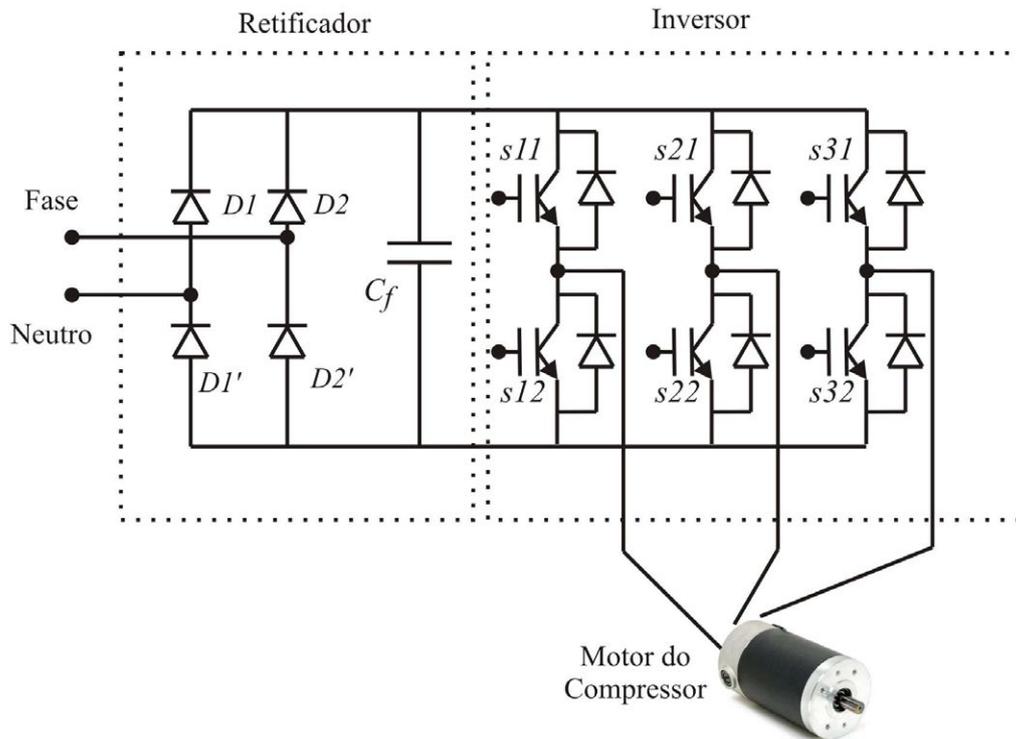


Figura 8.13 – Esquema simplificado da arquitetura eletrônica do condicionador de ar do tipo inverter



Mais sobre os termostatos...

De uma forma geral, os termostatos são chaves elétricas controladas por calor. São elementos para realizar controle do tipo liga-desliga.

Quando o objetivo é aquecimento

Quando a temperatura do corpo que se quer controlar atinge um valor máximo, o termostato desliga a fonte de calor e a temperatura cai naturalmente. Quando a temperatura do corpo cai além de um valor mínimo, o termostato liga a fonte de calor. Dessa forma, a temperatura do corpo oscila em torno de um valor de referência.

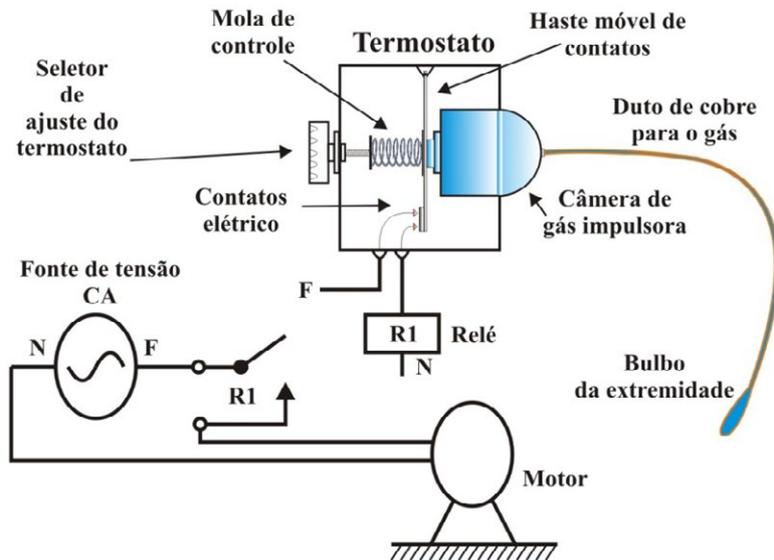
Quando o objetivo é resfriamento

A temperatura do corpo sobe naturalmente. Quando esta temperatura atinge um valor máximo, o termostato liga o mecanismo que retira o calor do corpo. Ao atingir a temperatura mínima, o termostato desliga o sistema de resfriamento, deixando o corpo aquecer normalmente, fechando o ciclo. Assim, a temperatura do corpo oscila em torno de um valor de referência.

Um bimetálico utilizado por um ferro de passar é um exemplo de um termostato muito simples. Outro exemplo é o termostato eletromecânico, mostrado na Figura 8.14, utilizado em muitos refrigeradores. A haste móvel onde se encontram os contatos é pressionada, de um lado, pela mola do seletor do usuário e, por outro, pela ação de expansão do gás dentro da câmara. Quando a temperatura aumenta, o gás se expande, empurrando a haste, fechando o

contato elétrico, ligando, por sua vez, o compressor. A temperatura de comutação será ajustada pelo usuário no seletor de ajuste, aumentando ou diminuindo a pressão da mola.

Figura 8.14 – Termostato eletromecânico comercial



8.5 Sistema de resfriamento nos bebedouros elétricos residenciais

Os bebedouros elétricos residenciais garantem água a uma temperatura agradável para o usuário. Diversas marcas são encontradas no mercado, com diversos projetos. De acordo com a portaria N 394/2-14 do INMETRO, três parâmetros identificam a performance elétrica do equipamento:

- Consumo de Energia mensal – quantidade de energia elétrica mensal consumida pelo aparelho, para a manutenção da temperatura da água, na condição sem retirada de água (kWh/mês).

Valor típico: 2,5 a 11 kWh/mês

- Capacidade de fornecimento de água gelada – quantidade de água refrigerada pelo aparelho conforme um ensaio pré determinado (L/h).

Valores típicos: 0,066 a 2,0 L/h

- Eficiência Energética – a razão entre o consumo de energia e a capacidade de refrigeração do aparelho, expressa em kW/L, conforme ensaio pré-determinado.

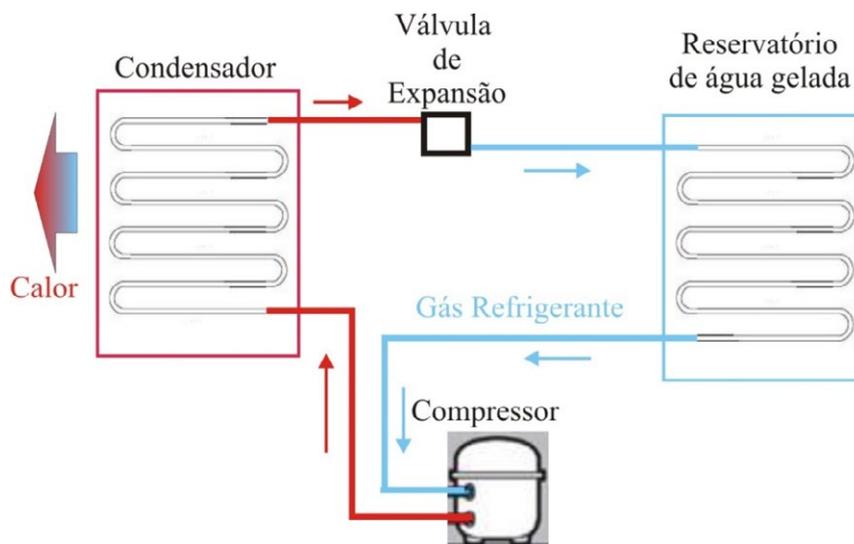
Valores Típicos: 0,051 a 0,664 kW/L

Dois tecnologias são utilizadas para resfriamento de água nos bebedouros:

- Tecnologia baseada em gás refrigerante, com mesmo princípio utilizado nos condicionadores de ar.
- Tecnologia baseada em elemento termoelétrico estático.

O ciclo de refrigeração pode ser visto na Figura 8.15. O gás é comprimido e vira líquido no condensador. Na mudança de estado de gás para líquido, há perda de calor para o meio, ou seja, o condensador dissipa este calor para o meio. Este condensador se encontra atrás do equipamento. A válvula de expansão diminui a pressão do líquido, fazendo com que este mude de estado – de líquido para gasoso. Na mudança de estado, o fluido ganha calor do ambiente, ou seja, retira calor da porção de água que há no recipiente. O compressor fecha o ciclo, comprimindo novamente o gás. O controle da temperatura da água é realizado por um termostato eletromecânico, que liga o compressor quando a temperatura da água está acima de um valor máximo, e o desliga quando esta temperatura está abaixo de um valor mínimo.

Figura 8.15 – Planta simplificada de um bebedouro a gás refrigerante



A tecnologia baseada no elemento termoelétrico utiliza como base o efeito Peltier. O efeito Peltier utiliza a junção de dois materiais semicondutores com dopagem de cargas elétricas diferentes. Um material possui excesso de cargas negativas e outro excesso de cargas positivas. Quando a junção é submetida a uma tensão contínua e, conseqüentemente, a uma corrente contínua, isso causa uma diferença de temperatura nos dois materiais. O lado de maior temperatura pode ser acoplado a um dissipador de calor, fazendo com que haja um fluxo de calor do lado de menor temperatura para o meio ambiente, estabelecendo um processo contrário ao natural, em que o calor flui do lado de maior para o de menor temperatura. Apresentamos, na Figura 8.16, o efeito Peltier, simplificado, para aplicações em resfriamento de água. É, na realidade, uma bomba de calor, movida diretamente à energia elétrica. O efeito reversível também é conseguido, ou seja, a partir de uma diferença de temperatura, é possível gerar uma tensão elétrica – uma geração

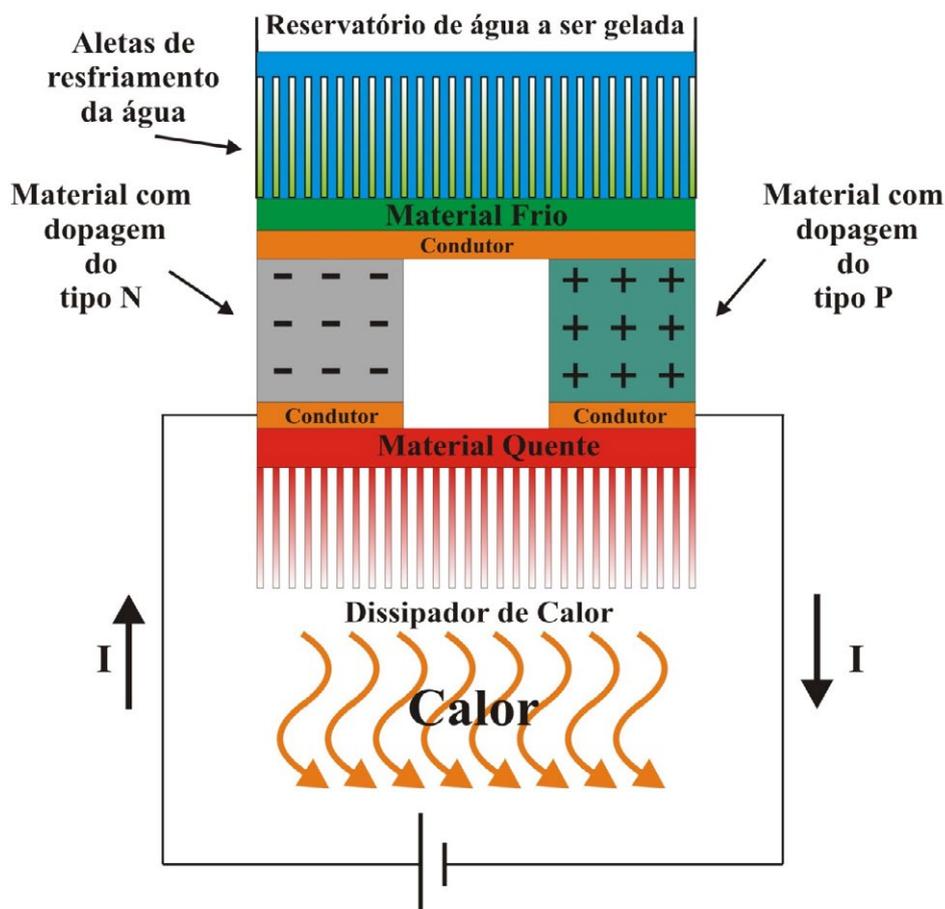
termovoltáica. Este efeito é utilizado nos sensores termopares. Os Termopares, como já foi enfocado no Capítulo 2, utilizam a tensão gerada a partir de uma diferença de temperatura.

A tecnologia baseada em efeito Peltier possui uma série de vantagens em relação aos sistemas a gás refrigerante:

- Não há partes móveis, não há motores elétricos;
- Vida útil física dos componentes maior;
- Controle de temperatura mais eficiente;
- Como não há partes móveis, não há ruído nem vibração;
- Células de tamanho pequeno, sendo possível construir arranjos variados;
- Operação em qualquer orientação tridimensional.

A grande desvantagem ainda é a menor eficiência em relação ao sistema a gás. Muitas pesquisas, no entanto, são realizadas na área de física de estado sólido, com efeito Peltier, em busca de maior eficiência e menor custo. É possível comprar no mercado células Peltier com custo por volta de 0,4 R\$/W (reais por unidade de watts).

Figura 8.16 – Modelo simplificado de uma célula Peltier sendo utilizada para resfriamento de água



Pesquisa e discussão em grupo

Por que os termostatos eletromecânicos convencionais lideram o mercado em quase todos os refrigeradores, bebedouros e condicionadores de ar de baixo custo? Antes da discussão pesquise na internet a faixa de preço (máximo e mínimo) desses termostatos.

Projeto

Pequise sobre o assunto e projete um resfriador de água para funcionar com tensão contínua, a partir de células Peltier e aletas de alumínio.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Norma NBR-5410**: Instalações elétricas de baixa tensão. ABNT: 2004.

COTRIM, Ademaro A. M. B. **Instalações elétricas**. São Paulo: Prentice Hall, 2009.

GE DO BRASIL. **GE Reports Brasil**. Disponível em: <<https://gereportsbrasil.com.br/>>. Acesso em: mar. 2018.

HOFFMAN, Pete. Basic Refrigeration Cycle. In: _____. **Air conditioning lecture**. Disponível em: <https://www.swtc.edu/ag_power/air_conditioning/lecture/basic_cycle.htm>. Acesso em: nov. 2017.

KEEFE, T. J. **The Nature of Light**. Disponível em: <<https://web.archive.org/web/20120423123823/http://www.ccri.edu/physics/keefe/light.htm>>. Acesso em: set. 2017.

KIGER, Patrick J. Separating myth from fact on CFL and LED light bulbs: five concerns addressed. **National Geographic**, 8 jan. 2014. Disponível em: <<http://energyblog.nationalgeographic.com/2014/01/08/separating-myth-from-fact-on-cfls-and-leds-five-concerns-addressed/>>. Acesso em: out. 2017.

LAUBE, Philip. Fundamentals: the p-n junctions. In: _____. **Semiconductor Technology from A to Z**. Disponível em: <<https://www.halbleiter.org/en/fundamentals/the-p-n-junction/>>. Acesso em: dez. 2017.

PHILIPS. **Lâmpadas LED**. Disponível em: <<http://www.philips.com.br/c-p/8718291686965/led-lampada>>. Acesso em: fev. 2018.

_____. **Philips Lighting**. Disponível em: <<http://www.lighting.philips.com/main/home>>. Acesso em: set. 2017.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Lighting Basics**. Disponível em: <<https://www.energy.gov/energysaver/articles/lighting-basics>>. Acesso em: jan. 2018.

WHELAN, M. Incandescent lamps. In: EDISON Techcenter. Disponível em: <<http://www.edisontechcenter.org/incandescent.html>>. Acesso em: fev. 2018.

9 Máquinas elétricas rotativas

As máquinas elétricas rotativas são, sem dúvida, os dispositivos elétricos mais utilizados na indústria, desde meados do século XX até os dias atuais. Seu uso está presente em processos muito simples, como o uso em ventiladores industriais, em processos mais elaborados, como, por exemplo, esteiras utilizadas em processos industriais complexos e em braços robóticos. As máquinas elétricas rotativas são utilizadas na conversão eletromecânica de energia, ou seja, a energia elétrica é convertida em mecânica para acionar máquinas, seja na indústria, seja no âmbito residencial. Este capítulo tem como objetivo expor os principais tipos de máquinas, suas partes construtivas, materiais que estão envolvidos na sua fabricação e características de funcionamento. É extremamente recomendável a releitura do Capítulo 3, introdução ao magnetismo, antes do estudo das máquinas rotativas.

9.1 Classificações das máquinas rotativas

As máquinas elétricas são classificadas, essencialmente, em função do tipo de tensão que pode ser fornecida ou recebida em seus terminais. Como existem dois tipos de fontes de tensão, as fontes CC e CA, as máquinas elétricas são classificadas em dois grandes grupos, quais sejam: as máquinas de corrente contínua, ou simplesmente máquinas CC, e as máquinas de corrente alternada, ou máquinas CA.

As máquinas CA, por sua vez, são classificadas em dois grandes grupos: as máquinas assíncronas e as síncronas. As máquinas assíncronas são também chamadas de máquinas de indução. Quanto ao número de fases, as máquinas CAs são classificadas de monofásicas, que são aquelas alimentadas por somente fase-neutro, e as máquinas trifásicas, alimentadas pelas três fases do sistema trifásico. Na Figura 9.1, mostra-se a classificação geral das máquinas rotativas mais utilizadas nas instalações industriais, residenciais e comerciais, bem como nos sistemas de geração de energia elétrica.

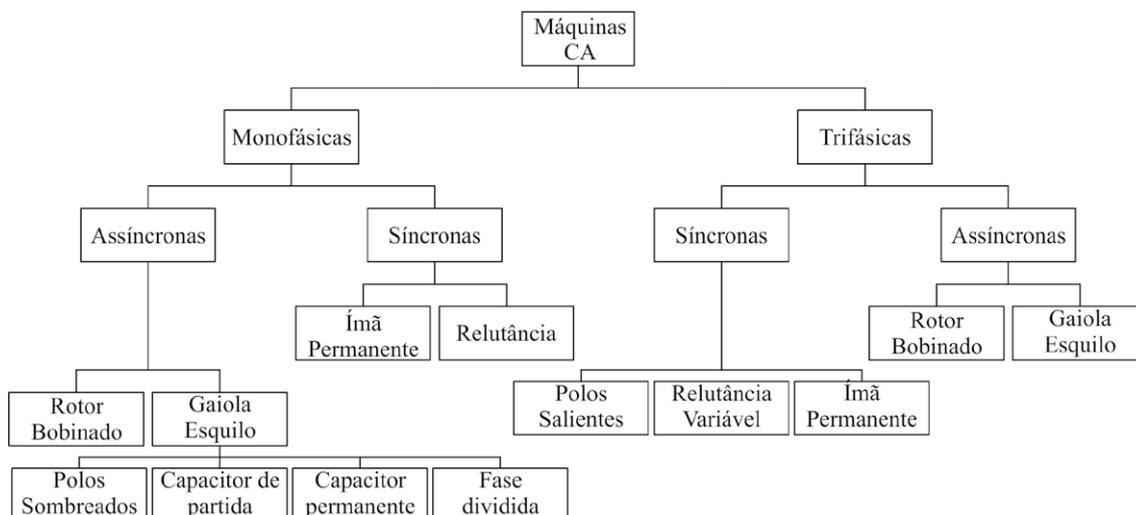
Uma ênfase deve ser dada às máquinas de indução. Tais máquinas são fortemente utilizadas nos processos industriais, devido à simplicidade de sua construção, robustez em relação a falhas, controle de velocidade (hoje efetuados por equipamentos, como os inversores de frequência¹) e custo-benefício. Já as máquinas CC, foram amplamente utilizadas na indústria na primeira metade do século XX, porém sua baixa densidade de potência por unidade de volume (são máquinas que fornecem pouca potência e ocupam um grande espaço, se comparadas com as máquinas CA) aliada à complexidade de suas partes construtivas e ao alto custo de manutenção, comparado com a CA, fizeram com que esse tipo de máquina perdesse espaço na indústria moderna para as máquinas CAs. Ainda existem aplicações localizadas que envolvem as máquinas CC, mas são restritas. Embora o uso desse tipo de máquina esteja em franco declínio², ela será explorada neste livro em virtude de suas

¹ Os inversores de frequência são conversores de potência, os quais condicionam a potência fornecida pela rede elétrica para a máquina de modo a efetuar o controle da velocidade de ponta de eixo.

² Existem, atualmente, as chamadas máquinas de corrente contínua, sem escovas. Elas são mais eficientes e possuem larga aplicação na refrigeração de computadores (*coolers*), na movimentação de HDs magnéticos, CDs

características de operação, as quais são introdutórias para o entendimento das demais máquinas elétricas rotativas. A seguir, serão abordados conceitos elementares e bastante comuns a todas as máquinas elétricas rotativas.

Figura 9.1 – Classificação geral das máquinas rotativas mais utilizadas



9.2 Conceitos preliminares

As máquinas rotativas podem, teoricamente, ser utilizadas como motores e geradores.

Motores: Converte energia elétrica em energia mecânica. Elas são utilizadas para acionar furadeiras, bombas hidráulicas, fresas, prensas e na tração elétrica, movendo barcos, trens e automóveis elétricos comerciais.

Geradores: Convertem energia mecânica em energia elétrica. São elas que aproveitam a queda de água, a força dos ventos, a queima de derivados de petróleo para gerar energia elétrica.

Apesar de, teoricamente, qualquer máquina rotativa ser potencialmente motor ou gerador, umas máquinas são utilizadas mais como motores e outras mais como geradores. A máquina de indução, por exemplo, é muito mais utilizada como motor. O gerador de indução possui alguns inconvenientes que tornam a geração por máquina de indução de difícil aplicabilidade. Já a máquina síncrona, é muito mais utilizada como gerador.

O princípio fundamental que dita o funcionamento das máquinas elétricas rotativas é a atração e repulsão de ímãs, fenômenos com os quais você já deve ter tido alguma experiência. Movimente um ímã nas proximidades de outro em repouso. Você verá uma tendência à movimentação deste último. Em geral, um campo magnético tende a se alinhar com outro,

e ou DVDs. O acionamento desse tipo de máquina exige, porém, o uso de conversores chaveados, o que acaba elevando o seu custo.

isto é, um ímã tende a se alinhar com outro. É esse princípio que rege o comportamento das máquinas. Em geral, há campo magnético no rotor e campo magnético no estator.

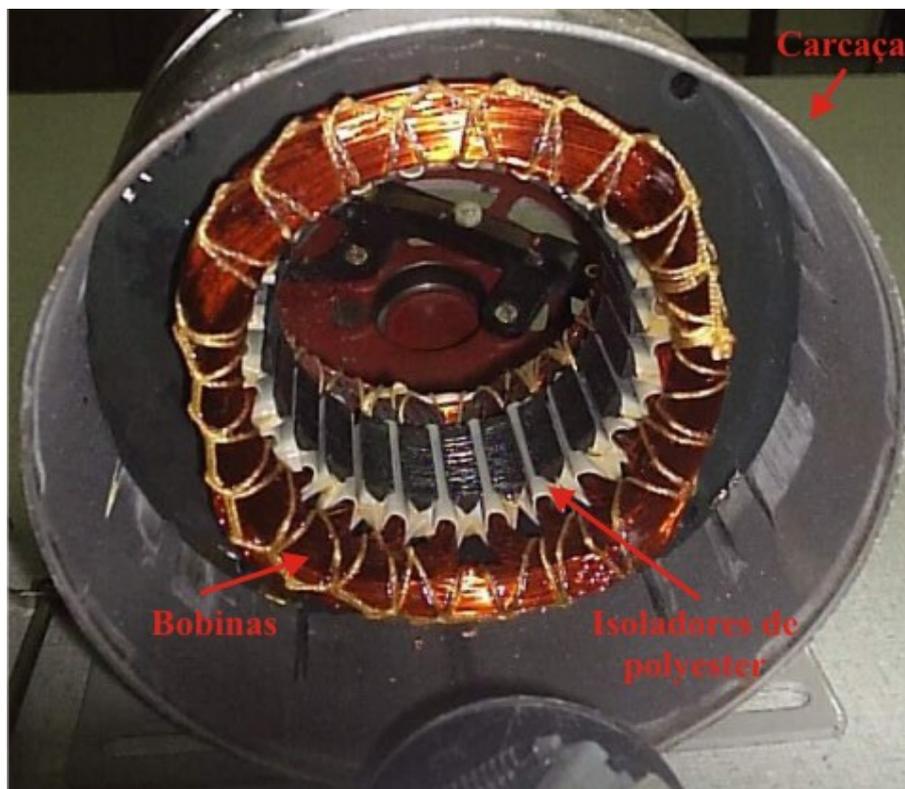
Rotor: é a parte da máquina rotativa que possui liberdade para girar; neste rotor há bobinas para criação de campo magnético. O rotor é montado num eixo mecânico que, por sua vez, é apoiado pelos rolamentos.

Estator: constitui a parte fixa da máquina. É no estator que fica a carcaça da máquina (parte externa que serve de apoio, de isolamento do meio externo e, em muitos casos, de dissipação de calor). No estator há bobinas para criação de campo magnético.

É da interação dos campos magnéticos de rotor e de estator que nasce a conversão eletromecânica de energia. O que difere cada máquina é o comportamento desses campos, como por exemplo, estáticos ou girantes.

Na Figura 9.2, vê-se o estator de uma máquina rotativa. Você deve observar as diversas partes do estator. A carcaça compoendo a parte externa. O núcleo, onde se encontram as bobinas do estator. Um detalhe importante a observar é a fibra de poliéster utilizada para realizar a isolação entre a bobina e o núcleo do estator. Se houver uma falha nessa isolação provavelmente a carcaça será energizada, submetendo o operador a um risco de acidente proveniente de choque elétrico. Vários acidentes fatais já ocorreram devido a esse problema. Por isto vale a dica que pode salvar uma vida: **antes de pegar numa carcaça de um motor ligado, realize um teste de energização da carcaça com uma chave teste e jamais entre num reservatório de água onde haja uma bomba submersa ligada.**

Figura 9.2 – Estator de uma máquina rotativa, com suas diversas partes



Os fios de cobre que compõem as bobinas são do tipo esmaltados, o que já foi abordado no Capítulo 7. Tais fios possuem uma camada de esmalte isolante que ajuda na isolação entre bobinas e entre bobinas e carcaça. Este aspecto brilhoso das bobinas é devido ao verniz eletroisolante. Esse verniz é aplicado depois de montadas as bobinas no estator. Uma das funções do verniz é aumentar a isolação, pois impregna em toda a bobina, penetrando nos espaços vazios. Além da isolação, a função de compactar a bobina é fundamental. Se não houvesse a compactação, a trepidação do motor desgastaria a isolação, culminando numa falha precoce. O verniz também contribui para aumentar a dissipação de calor pelas bobinas, contribuindo para baixar a temperatura do motor.

Dois conceitos importantes em máquinas elétricas rotativas são os relativos às bobinas, ou circuitos de campo, e o relativo à armadura. Os circuitos de campo são utilizados para produzir o campo principal da máquina elétrica. A corrente destinada à produção desse campo é chamada, nos livros técnicos, de *corrente de excitação da máquina*. Já os circuitos de armadura são utilizados para receber ou transmitir potência. O circuito de campo, uma vez excitado, pode fazer com que exista uma variação de fluxo magnético nos enrolamentos de armadura – e, lembremo-nos, variação de fluxo magnético está associada à tensão induzida, diz a lei de Faraday. Na máquina CC, esses dois enrolamentos são bem definidos. É por isso que a máquina CC é a máquina mais simples e didática de todas. Geralmente, o estudo de máquinas rotativas começa pela máquina CC.

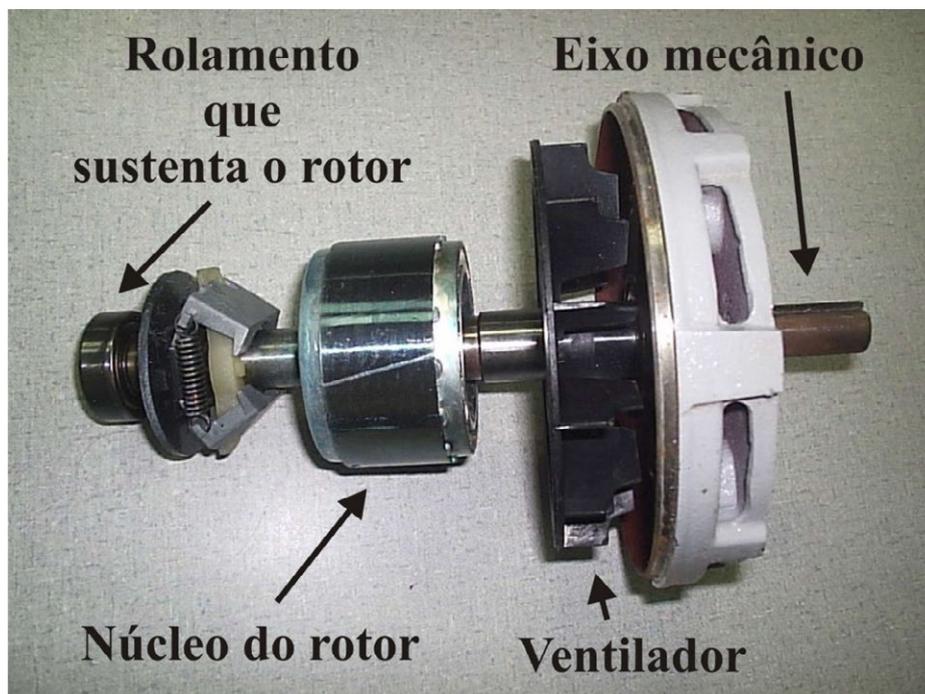
As máquinas rotativas possuem perdas elétricas que causam aquecimento. As perdas são localizadas:

- **no cobre dos enrolamentos:** São as chamadas perdas por efeito Joule. Os enrolamentos possuem resistências. Quando a corrente elétrica circula por esta resistência, há geração de calor.
- **no ferro da máquina:** São perdas relacionadas à frequência elétrica de alimentação. Essas perdas só existem em máquinas CA. Uma das medidas para redução de uma parcela dessas perdas é a laminação do núcleo. O núcleo é formado de um pacote de muitas lâminas isoladas. Na Figura 9.2, é possível perceber as lâminas, basta atentar para a superfície dos dentes. É bom lembrar que a laminação é um procedimento exclusivo das máquinas CAs.

Todas essas perdas geram calor, e a temperatura do motor é ditada pela capacidade de dissipação desse calor. Dessa forma, toda máquina possui ventiladores no rotor, que aproveitam o movimento circular para ventilar a máquina, reduzindo, assim, sua temperatura.

Na Figura 9.3 é mostrado um rotor de uma máquina rotativa. O eixo mecânico do rotor é o local onde todo rotor é montado. A ponta do eixo mecânico é atrelada na carga que o motor irá acionar, por exemplo, as hélices de um ventilador. Problemas de desbalanceamento do eixo do rotor causam trepidação em todo o motor, contribuindo para danificar outras partes, como, por exemplo, os rolamentos. Os rolamentos são fundamentais para mobilidade do rotor. Os rolamentos são a interface do estator e rotor. Rolamentos danificados podem ser uma fonte de perdas (calor) devido ao atrito, reduzindo a eficiência do motor.

Figura 9.3 – Rotor de uma máquina rotativa com suas diversas partes



Percebe-se, a esta altura, que a máquina rotativa pode apresentar problemas de ordem elétrica e de ordem mecânica:

- **Problemas elétricos:** falhas em isolamentos entre bobina-carcaça, bobina-bobina e falhas em conexões.
- **Problemas mecânicos:** desbalanceamento do eixo do rotor, falhas nos rolamentos.

9.2.1 Conceitos de mecânica aplicados às máquinas elétricas

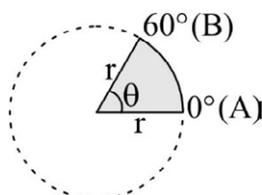
No princípio deste capítulo, já se pode observar que a máquina rotativa é um equipamento elétrico e ao mesmo tempo mecânico. Alguns conceitos que permeiam a parte de física relacionada à mecânica são fundamentais para o bom entendimento deste equipamento tão importante nos processos industriais.

9.2.1.1 Posição angular

A posição angular é entendida como o ângulo com o qual um objeto está orientado. Esse ângulo é medido desde um ponto de referência arbitrário, onde o objeto começa o movimento, até o ponto final do seu deslocamento. Por exemplo, na Figura 9.4, um objeto percorre um trecho circular, de raio r , do ponto **A** até o ponto **B**. O ponto **A** é tomado como

referência (0°), ao se deslocar para o ponto **B** e permanecer neste local. A posição angular (θ) do objeto será de 60° .

Figura 9.4 – Definição de posição angular em movimentos circulares uniformes



A posição angular pode ser medida em graus [$^\circ$] ou em radianos [rad].

9.2.1.2 Velocidade angular

A velocidade angular (ω) é a variação da posição angular no tempo. Ela pode ser assumida como sendo positiva, se ocorrer no sentido anti-horário, e negativa, se ocorrer no sentido horário. Sua unidade é igual ao radiano por segundo (rad/s). Comercialmente, todavia, a velocidade do eixo de uma máquina elétrica rotativa não é expressa em rad/s, pois deve haver uma aproximação para algo mais facilmente assimilável por quem vai lidar com as máquinas. Sabendo que a frequência é o número de repetições de um evento no intervalo de um segundo, a frequência de rotação do eixo de uma máquina pode ser obtida a partir da velocidade angular, de acordo com a seguinte expressão:

$$f_{rm} = \frac{\omega_m}{2\pi} \quad (9.1)$$

Onde:

ω_m – velocidade angular do eixo do motor.

Na indústria, a velocidade do eixo é trabalhada como o número de rotações por minuto. Uma vez que na expressão (9.1) a velocidade de rotação é expressa como o número de rotações por segundo, e sabendo que em um segundo existem 60 minutos, a conversão de rotações por segundo para rotações por minuto é feita segundo a expressão (9.2) a seguir.

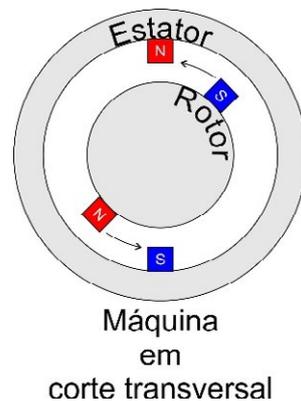
$$n_m = 60 \times f_m = \frac{60\omega_m}{2\pi} \quad (9.2)$$

Você deve observar que a representação de uma variável representativa de uma rotação expressa em minutos é feita utilizando-se a padronização **n**, seguida de um subíndice indicativo (s,r,m) e de uma unidade em [rpm].

9.2.1.3 Conjugado mecânico

A definição básica do conjugado em uma máquina elétrica rotativa passa pela definição de binário de duas forças. Conjugado é a força resultante que proporciona a componente de rotação do eixo da máquina. Em outras palavras, o conjugado é a força resultante que proporciona a rotação de um corpo ao redor de um eixo. No caso das máquinas, o corpo é o rotor. O conjugado de uma máquina é medido em [N.m], porém alguns fabricantes podem fornecer essa grandeza na unidade de kgf, a qual pode ser transformada para N.m, bastando-se dividir o valor dado em kgf por 9,8. O conjugado em uma máquina rotativa decorre da tendência natural do alinhamento de ímãs, uma vez que os campos produzidos no estator e no rotor podem ser entendidos como tais, conforme se vê na Figura 9.5. Observe que a componente linear das duas forças que agem no rotor é nula, só existindo componente de rotação.

Figura 9.5 – Máquina CA em corte transversal dando ênfase nos polos magnéticos do estator e do rotor, indicando sua tendência de alinhamento



Vale lembrar, como já foi mencionado, que: $1N \cdot m = \frac{1kgf}{9,8}$

A potência se relaciona tanto com o conjugado quanto com velocidade da máquina. Matematicamente tem-se a expressão (9.3).

$$C = \frac{P_m}{\omega_m} \quad (9.3)$$

Onde:

C – conjugado da máquina;

P_m – Potência da ponta de eixo do motor elétrico.

A potência da ponta do eixo é a potência de entrada do motor menos todas as perdas da máquina, incluindo as perdas elétricas e as perdas mecânicas de atrito e de ventilação da máquina.

9.2.1.4 Perdas mecânicas (perdas rotacionais)

Assim como a máquina possui perdas elétricas, também possui perdas de origem mecânica. Destacam-se as perdas de atrito e ventilação:

- **Perdas por atrito:** são aquelas perdas pelo atrito de algumas partes móveis, como, por exemplo, os rolamentos. Comumente, na literatura técnica, costuma-se modelar o atrito proporcional à velocidade angular. Quanto maior a velocidade, maior o atrito. Quando os rolamentos estão gastos, as perdas por atrito aumentam, aquecendo tais rolamentos. Na Figura 9.6, vê-se a foto do sulco de um rolamento danificado.

Figura 9.6 – Foto dos sulcos do rolamento danificado



- **Perdas por ventilação:** são aquelas perdas oriundas da movimentação do ventilador do rotor, destinado a resfriar as bobinas do rotor.

9.3 Partes construtivas das máquinas elétricas rotativas e seus materiais condutores e isolantes

Todas as máquinas rotativas são formadas, basicamente, de dois elementos principais. Um eixo rotativo, também chamado de **rotor**, e uma parte fixa, chamada de **estator**. No estator, ou no rotor, estão fixados os **enrolamentos** ou **grupos de bobinas**, conforme mostrado nas sessões anteriores. O rotor e o estator são constituídos de material ferromagnético³, no qual são inseridas as bobinas. Envolvendo o estator, existe uma carcaça, a

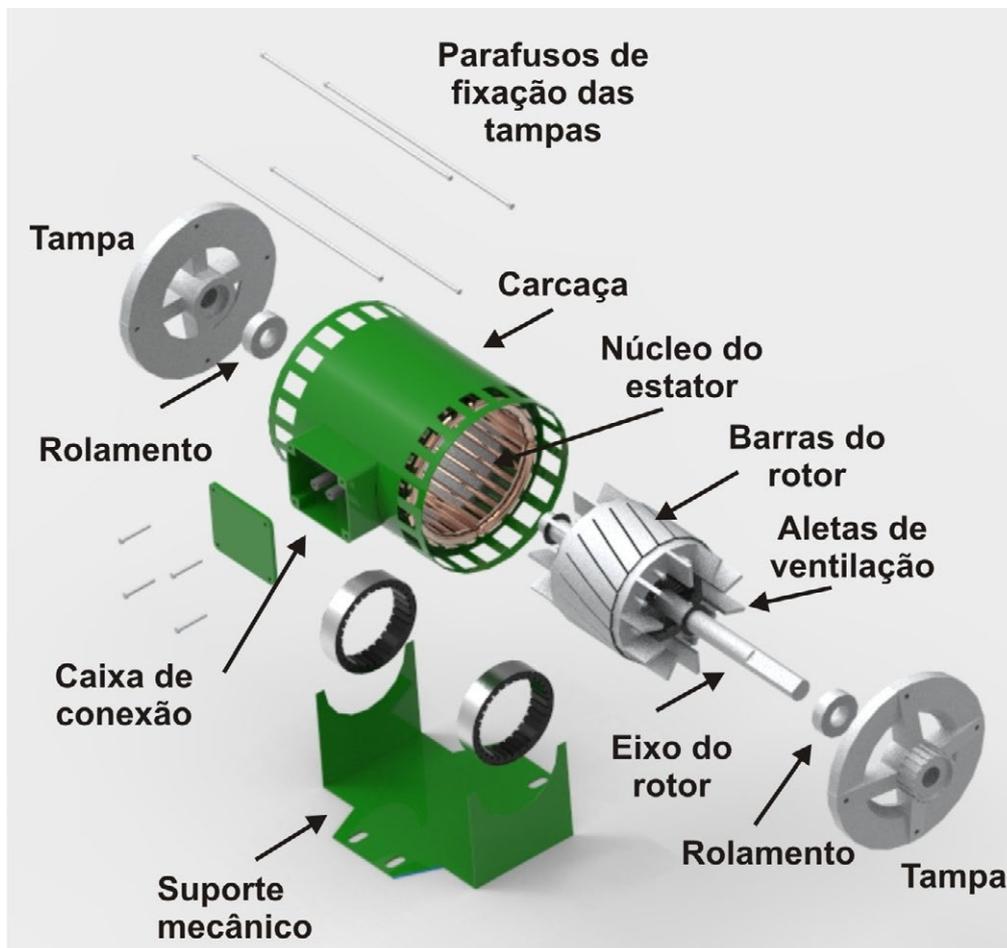
³ Os materiais ferromagnéticos são utilizados nas máquinas elétricas para conter e dar forma aos campos magnéticos originados pelas correntes que circulam no enrolamento. Sem eles, não haveria uma densidade de campo, necessária para a formação das forças magnéticas utilizadas para provocar os movimentos rotacionais nas máquinas elétricas.

qual tem a função de proteger o motor contra contatos com elementos e pessoas ao meio externo. Também é na carcaça que são fixados os elementos que proporcionam o suporte mecânico bem como o transporte das máquinas elétricas. A partir deste ponto, acompanhe a descrição das partes construtivas em paralelo com a visualização da Figura 9.7.

9.3.1 O condutor das bobinas

Os condutores que compõem as bobinas podem ser de cobre ou de alumínio. O alumínio é mais leve que o cobre, diminuindo o peso do motor. Em termos de resistividade, a do cobre é menor, por volta de $\rho_{Cu} = 1,72 \cdot 10^{-8} \Omega m$, a do alumínio é $\rho_{Al} = 2,82 \cdot 10^{-8} \Omega m$. Para a mesma capacidade de condução de corrente, é necessário um volume de alumínio 63% maior que o do cobre. Como, no entanto, a densidade do cobre é 3,3 vezes maior que a do alumínio, mesmo utilizando um volume maior de alumínio, o motor com condutor de alumínio será mais leve. A desvantagem do condutor de alumínio é o preço, que é maior que o do cobre. A grande maioria dos motores comerciais são construídos com condutores de cobre esmaltado, mencionado no Capítulo 7.

Figura 9.7 – Partes construtivas da máquina de indução em gaiola de esquilo



Na medição dos condutores, são utilizadas as unidades (mm^2) ou, a mais comum, (AWG). AWG significa as iniciais de *American Wire Gauge*, unidade padrão americana. No Anexo 2 consta uma tabela de condutores comerciais e suas características.

O condutor de cobre, conhecido também por fio de cobre esmaltado, possui um revestimento isolante sobre si mesmo. Por isso existe a área total do condutor e a área de condução, menor que a primeira. Ao realizar emendas com condutores de cobre, é necessário remover essa camada isolante.

Os motores elétricos comerciais utilizam uma densidade de corrente nos condutores por volta de 7 A/mm^2 . Se os valores de densidade estiverem acima de 7 A/mm^2 , o condutor irá aquecer, pois o calor gerado é maior que sua capacidade de dissipação desse calor. Se a densidade de corrente for menor que 7 A/mm^2 , implica superdimensionamento de cobre.

Exemplo 9.1

Uma bobina é circulada, com o motor a plena carga, por uma corrente de 2,62 A. Qual será o condutor utilizado?

Solução:

$$\text{Seção} = \frac{2,62 \text{ A}}{7 \text{ A/mm}^2} = 0,374 \text{ mm}^2$$

O condutor utilizado será o de 21 AWG, que possui uma seção condutora de $0,396 \text{ mm}^2$.

9.3.2 Isolantes

As fibras ou filmes isolantes são utilizados para separação de grupo de bobinas e revestimento das ranhuras. Diversos tipos são encontrados no mercado. Tais isolantes podem ser classificados em compostos e poliéster puro.

- Entre os isolantes compostos, destaca-se o Milaflex, fabricado pela ANELK. Esse isolante é composto por uma camada de isolante de celulose e (uma ou duas) camadas (filmes) de poliéster. Apresenta, segundo seu fabricante, boa resistência mecânica e térmica. Rigidez dielétrica indicada para produtos de classe E ($120 \text{ }^\circ\text{C}$), inclusive para produtos que operem em ambientes de alta umidade. Opção de uma face de filme de poliéster ou duas faces. Possui proteção para envelhecimento do filme.
- Isolantes de *poliéster* puro. Apresenta elevada resistência mecânica com boa estabilidade dimensional e durabilidade bem como boa impermeabilidade, resistência química e propriedades de isolamento térmica e elétrica. Esta fibra isolante pode ser cortada em sistema de lâminas rotativas ou corte em guilhotina. Pode ser ainda perfurada, moldada e dobrada, sem alteração das suas características físico-químicas. A Figura 9.8 mostra rolos de filme isolante de poliéster comercial.

Outra categoria de isolante importante são os “tubetes” isolantes para condutores, mais conhecidos por *espaguetes*. Tais isolantes se destinam ao envolvimento físico de partes do condutor esmaltado, sem a película isolante. Encontrado ou utilizado nas conexões de grupo de bobinas entre si e com os terminais externos. Os diâmetros disponíveis estão na faixa de 0,1 mm a 16 mm.

Figura 9.8 – Filmes isolantes de poliéster



9.3.3 Verniz eletroisolante

Os vernizes eletroisolantes, também denominados de verniz de impregnação, são líquidos à base de *poliéster* aplicados nos enrolamentos do motor, após a montagem das bobinas no estator, com a finalidade de compactação desses enrolamentos. A aplicação de verniz possui as seguintes funções, já mencionadas preliminarmente:

- **Melhorar a isolação:** ao se aplicar o verniz sobre os condutores, há infiltração deste líquido entre condutores, melhorando o nível de isolação entre eles.
- **Compactação:** Todo motor possui trepidação quando operando. Alguns motores trepidam mais que outros, caso do motor de indução monofásico, em que o fluxo de potência é pulsante. Essa trepidação promove atrito entre os condutores. Conseqüentemente, esse atrito deteriora a isolação do condutor a médio e longo prazo. O verniz compacta os condutores, diminuindo o atrito entre estes, reduzindo os danos sobre a isolação ao longo da sua vida útil física.
- **Dissipação de calor:** O verniz possui um coeficiente de transmissão de calor maior que o ar. Quando este produto ocupa o lugar do ar, infiltrando-se entre as bobinas e entre bobinas e estator, aumenta a dissipação de calor. A consequência disso é a redução da temperatura de operação. É bom lembrar que a temperatura é um dos principais aceleradores das falhas. Uma máquina que opera com temperatura menor, possui vida útil física maior.

As principais características dos vernizes eletroisolantes são:

- **Propriedades mecânicas e elétricas:** O verniz deve proporcionar boa resistência mecânica, baixo envelhecimento com o tempo, boa isolamento e dissipação de calor.
- **Aplicação:** pode ser feita com pincel, imersão e pistola. Alguns tipos admitem as três maneiras.
- **Cura:** Tempo de que o verniz precisa para secagem. Esta secagem pode ser ao vento ou em estufa. O tempo de secagem depende do tamanho do motor e temperatura. A estufa aumenta a temperatura e acelera a secagem. O verniz WEG LACKTHERM 1303 PE MOD B, por exemplo, permite seu manuseio após um período de 3 a 6 horas de secagem ao vento (25 °C). Em estufa de 50 °C a 80 °C, a secagem é acelerada para 0,5 a 1 hora para manuseio.
- **Classe de isolamento recomendada:** Dentro do possível, devem-se escolher vernizes compatíveis com equipamento de classe H, pois já atendem a equipamentos com classe de isolamento B. Essa classe de isolamento diz respeito à temperatura máxima que o material isolante suporta sem sacrifício das suas características.
- **Indicação:** Recomendação do fabricante do verniz sobre os limites de potência de motor para aplicação do verniz. Por exemplo, o verniz WEG LACKTHERM 1303 PE MOD B possui uma recomendação para motores elétricos até 50 cv. Deve-se atentar para essa recomendação na hora de adquirir o verniz para manutenção de determinado motor.

9.3.4 Soldas

As soldas são utilizadas para conectar os condutores que formam as bobinas aos cabos externos ou nas ligações entre grupos. Tais soldas são ligas de estanho e chumbo. As mais comuns são: (Sn40/Pb60), (Sn50/Pb50). O chumbo é um dos metais mais tóxicos ao organismo humano. Este metal interfere nas funções do cérebro, coração, intestinos, sistema reprodutor, sistema nervoso. Intoxicação com altas dosagens de chumbo pode ocasionar problemas sérios no sistema nervoso, anemias e, em casos extremos, a morte. É extremamente recomendável a utilização de máscaras na operação de soldas à base de chumbo, evitando-se, assim, inalação. Em 2006, a União Europeia começou uma campanha pela utilização da solda livre de chumbo, dando subsídios aos fabricantes de equipamentos eletroeletrônicos que passassem a utilizar as soldas livres de chumbo.

A mais utilizada é no formato barra, vista na Figura 9.9, no entanto pode ser encontrada em rolos.

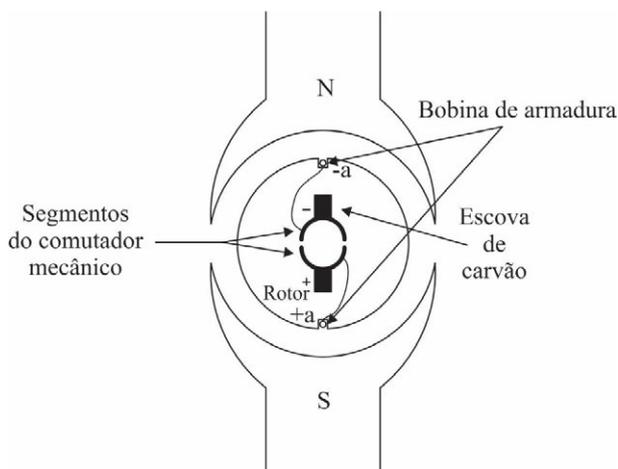
Figura 9.9 – Soldas Chumbo-Estanho Sn-Pb em barra



9.4 Máquinas de corrente contínua

Essencialmente, as máquinas CC operam em tensões em corrente contínua. Se a máquina está funcionando como motor, é alimentada por corrente contínua, precisando de uma fonte de tensão em corrente contínua. Se a máquina está operando como gerador, produz tensão contínua – em outras palavras, a máquina funciona como uma fonte de tensão. Para um melhor entendimento de sua operação, faz-se necessário recorrer à Figura 9.10. Apesar de o emprego desse tipo de máquina ter sido reduzido nos processos industriais, em função de aspectos construtivos que ficarão mais claros logo adiante, entender o seu funcionamento é fundamental para compreender como funcionam as demais máquinas, tanto as de indução quanto as máquinas síncronas. Ademais, novos tipos de máquinas – tais como as máquinas a ímã permanente – apresentam semelhanças de funcionamento bastante próximas das máquinas CC.

Figura 9.10 – Representação básica de uma máquina CC

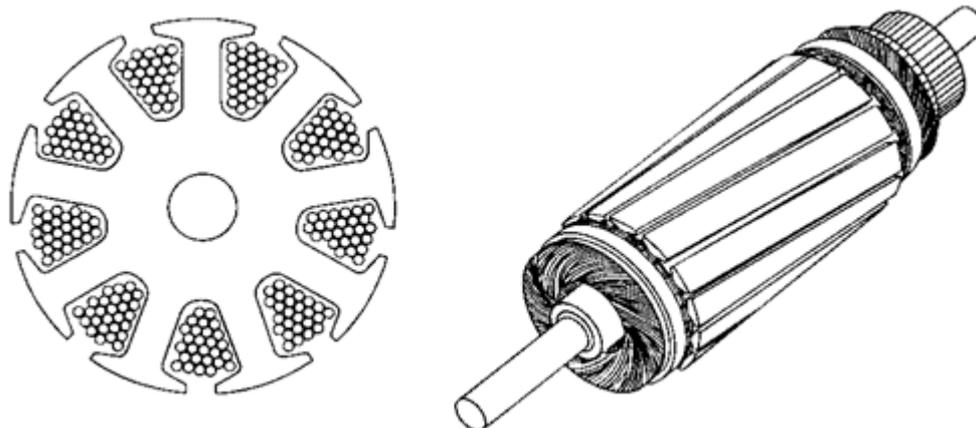


Conforme esquematizado na Figura 9.11 – que representa um corte transversal de uma máquina de corrente contínua –, as máquinas CC são constituídas por um rotor, que é composto de um **eixo mecânico** e por **bobinas no rotor**⁴, por **segmentos do comutador (lâminas do comutador)** e por **escovas de grafite** situadas próximas o suficiente para estabelecer contato elétrico em um par de comutadores mecânicos. A seguir, será detalhado o funcionamento de cada uma das partes específicas das máquinas CC. Observe, na Figura 9.11, que as bobinas do rotor estão perpendiculares à folha do livro.

9.4.1 Bobinas do rotor

Já foi mostrado na Figura 9.2 que as bobinas do rotor de uma máquina CC estão inseridas em ranhuras⁵ que se distribuem ao longo da periferia do rotor. É possível perceber que existem duas ranhuras no rotor para acomodar os terminais da bobina a . Os terminais das bobinas são marcados por um sinal de +(mais) e por um sinal de – (menos). A primeira marcação serve para indicar que a corrente está saindo por aquele terminal e a segunda marcação indica que a corrente está entrando por aquele terminal. Deve ser observado que cada terminal está ligado eletricamente com os comutadores mecânicos, os quais terão seu funcionamento descrito adiante neste texto. Cada bobina pode possuir N espiras, todas acomodadas nas suas respectivas ranhuras no rotor. O número de espiras é determinado no projeto da máquina. Um rotor é mostrado na Figura 9.11.

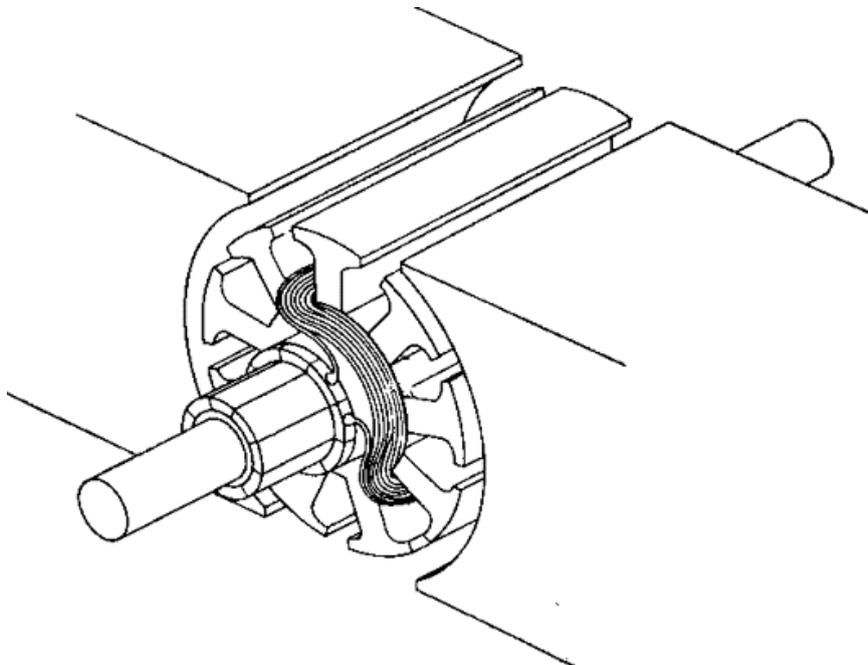
Figura 9.11 – Rotor do motor CC



Na Figura 9.12, abaixo, apresenta-se uma bobina do rotor do motor CC. Observe que um terminal da bobina se liga a uma lâmina comutadora, e o outro terminal se liga a outra lâmina, ou seja, cada bobina utiliza duas lâminas comutadoras.

⁵ Ranhuras são sulcos – em baixo relevo – construídos no rotor ou no estator.

Figura 9.12 – Bobina de um rotor de um motor CC e suas ligações com as lâminas comutadoras

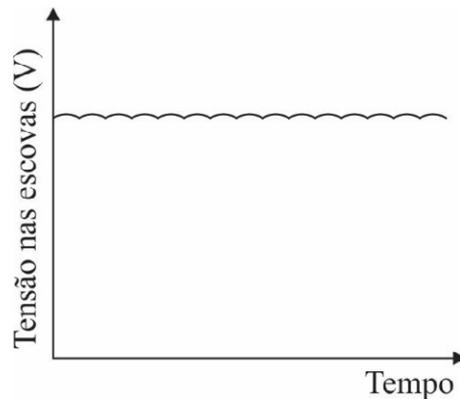


9.4.2 Comutadores mecânicos – máquina funcionando como gerador

Pelo fato de o rotor estar continuamente em movimento de rotação, e como há um campo fixo no estator das máquinas CC, haverá a indução de uma tensão alternada nas bobinas fixadas nas ranhuras do rotor e, conseqüentemente, uma corrente CA nessas bobinas. As máquinas CC trabalham somente com sinais contínuos; há a necessidade, evidentemente, de um processo que converta essa corrente alternada em corrente CC. Isso se deve à ação das lâminas do comutador e às escovas de grafite. Cada bobina do rotor tem os seus terminais ligados aos segmentos de comutação, e cada segmento de comutação, ao girar, pode entrar em contato com as escovas de grafite. Como as escovas de grafite estão fixadas no espaço, a corrente que circula entre uma e outra escova – entre os terminais das escovas – tem somente um sentido. Isso caracteriza uma fonte de tensão contínua⁶, a qual, indubitavelmente, está relacionada a uma tensão CC estabelecida entre as escovas de grafite. Recorrendo à Figura 9.13, logo abaixo, é possível entender o processo de retificação mecânica, implementado pelo comutador mecânico e pelas escovas.

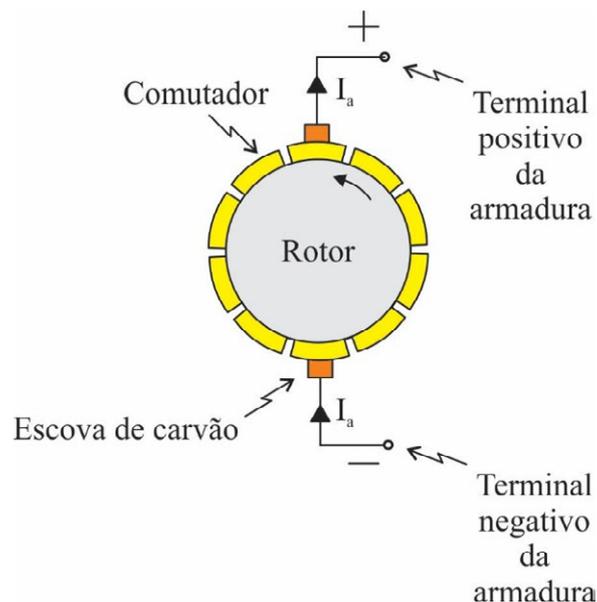
⁶ Você deve lembrar que as correntes contínuas percorrem um circuito do polo positivo para o negativo, considerando a convenção passiva.

Figura 9.13 – Tensão nos terminais de um par de escovas em função do tempo



É perceptível, observando a Figura 9.13, que a tensão sobre o par de escovas possui uma certa ondulação. Isso ocorre em virtude do processo de retificação mecânica implementado pelos comutadores e pelo par de escovas. Os comutadores mecânicos das diversas bobinas do rotor são construídos bem próximos uns dos outros, de modo que a ondulação da tensão CC nos terminais do par de escovas de grafite seja a menor possível. Para que você entenda o processo de retificação mecânica presente nas máquinas CC, na Figura 9.14 são detalhadas as composições físicas dos comutadores. Nela, pode-se observar que as lâminas estão muito próximas umas das outras e são em número elevado; também se vê que as escovas de grafite estão fixas no espaço e em relação aos comutadores. Enquanto o rotor gira, apenas duas lâminas estão em contato com as duas escovas – uma lâmina para cada escova. Quando o rotor gira, as correntes que circulam nas lâminas só podem percorrer as escovas em um único sentido. A pequena ondulação de tensão observada na Figura 9.13 ocorre porque existe um espaço entre um comutador e outro. Uma vez que circula corrente em um único sentido, está caracterizado que, do ponto de vista dos terminais externos à armadura, há a circulação de uma corrente contínua (característica fundamental de circuitos CC).

Figura 9.14 – Comutadores e escovas de grafite em uma máquina CC



9.4.3 Comutadores mecânicos – máquina funcionando como motor

Para o bom entendimento de como a máquina CC opera como motor, recomenda-se ler a seção 3.7, relativo à força resultante em condutores carregados no interior de campos magnéticos. Na Figura 9.15, há uma bobina do rotor de um motor CC, submetido a um campo magnético do estator. Acompanhando um giro mecânico completo desta bobina, temos:

- **Bobina a 0°**

Neste instante as lâminas dos terminais da bobina estão em contato com as escovas, e a corrente circula na bobina no sentido anti-horário. Pela regra da mão direita, já mencionada na seção 3.7, os lados da bobina serão submetidos a duas forças em sentido contrário, criando um binário ou conjugado no rotor.

- **Bobina a 90°**

Depois de $\frac{1}{4}$ de giro, as escovas já não estão mais em contato com as lâminas da bobina. Com isso não há mais corrente, não havendo, conseqüentemente, força. Nesta posição, a bobina não contribui mais para o conjugado do rotor. Felizmente, o motor é composto de várias bobinas e, neste instante, há outra bobina submetida a forças, contribuindo para o conjugado do rotor.

- **Bobina a 180°**

Apesar de a bobina só ter efetuado meia volta, neste instante, devido à ação do comutador, a corrente circula da mesma forma que antes, quando a mesma bobina estava a 0°. As duas forças se manifestam contribuindo, assim, para o conjugado da máquina.

- **Bobina a 270°**

Novamente as lâminas não estão em contato com as escovas, não havendo corrente nem forças resultantes. Haverá conjugado, no entanto, devido a outras bobinas que estarão a 0° ou a 180°.

Esse comportamento das forças magnéticas sobre as bobinas pode ser entendido como pulsos a cada vez que a bobina passar por 0° e por 180°. Felizmente, como já foi mencionado, há dezenas de bobinas no rotor, o que faz o conjugado da máquina praticamente contínuo, não se verificando, então, pulsações. Este é o comportamento da máquina CC como motor, utilizando a regra da mão direita estudada na seção 3.7. Na figura 9.16 é observado um comutador de uma máquina CC industrial.

Figura 9.15 – Acompanhamento de um giro mecânico de uma bobina no rotor da máquina CC

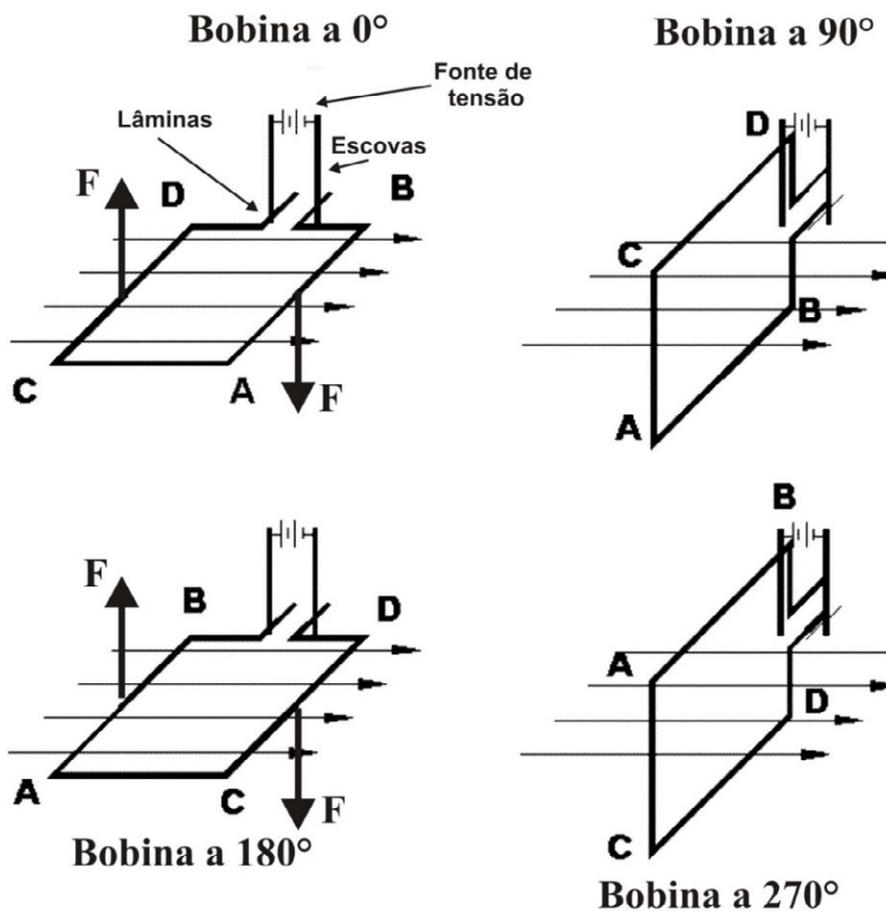


Figura 9.16 – Detalhe de uma escova de grafite em contato com as lâminas comutadoras numa máquina de 5 cv



9.5 Máquinas de indução

As máquinas de indução tiveram origem em 1881, quando as características desse tipo de máquina começaram a ser estudadas. Ainda não existia, porém, nenhum protótipo que fundamentasse as conclusões teóricas que os engenheiros eletricitistas apontavam. Em 1885, o engenheiro Galileu Ferraris construiu uma máquina CA de duas fases, baseada na aplicação do conceito de campo girante, embora tenha concluído erroneamente que esse tipo de máquina possuía um rendimento máximo de 50%. Dois anos mais tarde, Nikola Tesla apresentou um protótipo de máquina CA, bifásica, com rotor em curto-circuito, que lhe rendeu um bom financiamento por parte da empresa americana Westinghouse, mas o baixo rendimento desse tipo de máquina inviabilizou a sua produção em série, acarretando o abandono de suas pesquisas. Foi o Engenheiro Michel Von Dolivo Dobrowolsky, da empresa AEG, que, em 1889, entrou com o pedido de patente de um motor trifásico, com rotor de gaiola de esquilo. O motor que ele apresentou na patente possuía uma potência de 80 W, com um rendimento de aproximadamente 80% e com um ótimo conjugado de partida. Foi a partir do invento de Dobrowolsky que as vantagens da máquina de indução CA de gaiola sobre as máquinas CC ficaram evidentes: construção muito mais simples, silenciosa, menos manutenções e grande segurança de operação. Já em 1891 Dobrowolsky desenvolveu a primeira fabricação em série dos motores de indução, com potências entre 0,4 a 7,5 kW.

Diferente da máquina CC, a máquina de indução não possui contato elétrico entre estator e rotor (escova – lâmina). A transferência de energia entre estator-rotor acontece por indução magnética. Isto faz toda diferença, principalmente quanto à manutenção. As máquinas de indução possuem custo de manutenção menor bem como menor custo de fabricação, o que as torna extremamente competitivas em termos de mercado.

9.5.1 O Campo girante trifásico e princípio de funcionamento

O princípio fundamental de todas as máquinas, como já foi mencionado, está na tendência de um campo magnético se alinhar com outro. Na máquina CC, graças à ação do comutador, os dois campos, do estator e do rotor, estão estáticos. Na máquina de indução, é criado um campo girante no estator. Esse campo girante cria, por indução, o campo magnético girante do rotor. O resultado é o campo girante do rotor tender a se alinhar com o do estator, daí estabelecendo um conjugado estável no rotor.

Desta forma, o campo girante está no centro do comportamento da máquina de indução. Trata-se de um campo que gira continuamente de forma proporcional à frequência elétrica da rede e inversamente proporcional ao número de polos magnéticos. São duas as condições para que seja possível estabelecer um campo girante no estator das máquinas CA de indução. A primeira condição é que as bobinas do estator (as três fases) devem estar dispostas, no espaço de 120° umas das outras e ao longo da periferia do estator. Essa disposição espacial leva em consideração os eixos magnéticos da bobina de cada uma das três fases da máquina. A segunda condição é que as bobinas estatóricas das três fases sejam conectadas a uma fonte de tensão trifásica equilibrada. Ao serem percorridas por corrente elétrica equilibrada, cada uma das bobinas de fase produz o seu campo magnético, que ora é positivo e ora é negativo ao longo de si mesmo. Como cada bobina está posicionada em 120° no espaço e como cada campo magnético está defasado de 120° elétricos, ocorre uma combinação entre os campos

dos eixos de cada bobina, de modo que o campo resultante possui uma amplitude constante, porém gira espacial e radialmente ao longo do estator. Você deve lembrar que campo magnético é um ente vetorial e que, neste caso, determinar a resultante dos três campos é uma operação vetorial que soma os três vetores relativos a cada fase. Na Figura 9.17, são exibidos o posicionamento (visão em corte do rotor e do estator da máquina) das bobinas ao longo da periferia do estator bem como a angulação de cada eixo magnético das fases da máquina CA. Já na Figura 9.18, são mostrados os valores dos campos de cada eixo bem como o valor e o posicionamento do campo magnético resultante em instantes distintos de tempo.

Figura 9.17 – Eixos magnéticos das bobinas dispostas ao longo do estator

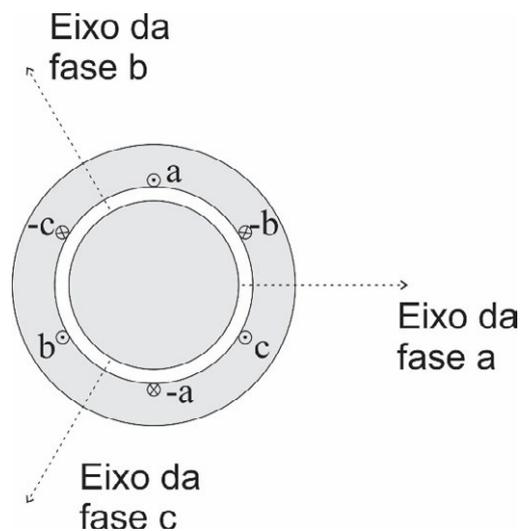
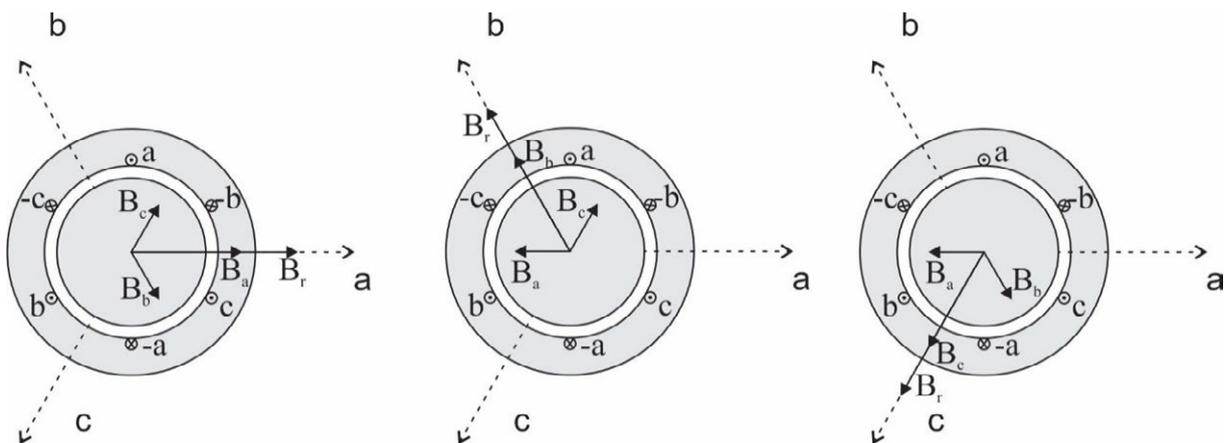


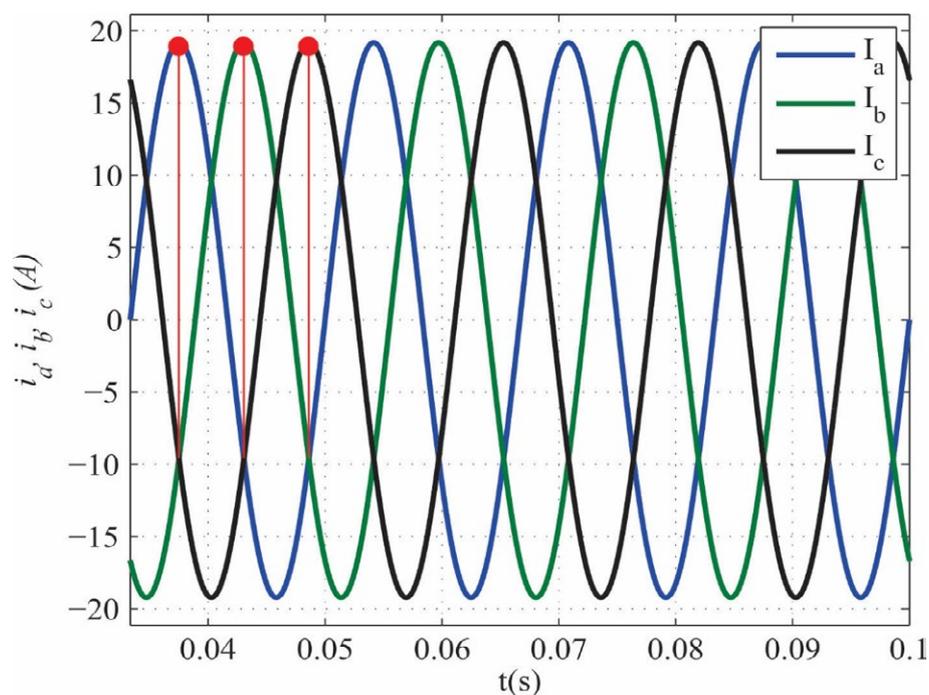
Figura 9.18 – Campo resultante em tempos diferentes ao longo do estator da máquina de indução



Cada um dos campos máximos ao longo das fases da máquina se dá no exato momento em que a corrente daquela fase em especial também possui o valor máximo. É possível observar que esse intervalo de tempo também deverá levar em consideração os campos das demais fases, os quais – de acordo com a Figura 9.19 – são iguais em módulo,

porém defasados em uma angulação diferente no espaço, fazendo com que o campo resultante (ou seja, o campo devido à combinação dos campos das fases a, b e c da máquina) possua uma mesma intensidade, porém esteja em lugares distintos no espaço, a depender do instante de tempo, sob análise no desenvolvimento das correntes do estator. Para um melhor entendimento, acompanhe os instantes de tempo considerados nas correntes do estator da máquina exibidos na Figura 9.19.

Figura 9.19 – Valor das correntes das três fases das bobinas dispostas ao longo do estator da máquina CA



As bobinas das máquinas de indução são inseridas em ranhuras dispostas ao longo da periferia do estator, conforme pode ser visto na Figura 9.20 – detalhe do núcleo do estator de uma máquina de indução. A quantidade, a profundidade e o distanciamento das ranhuras dependem do tipo de projeto da máquina, objeto este fora do escopo deste livro.

Figura 9.20 – Ranhuras para inserção das bobinas dos enrolamentos de uma máquina CA



A velocidade do campo girante de uma máquina de indução pode ser expressa de acordo com (9.4).

$$n_s = \frac{60 \times f_e}{\frac{P}{2}} \quad (9.4)$$

Em que n_s indica a velocidade do campo girante do estator, expressa na unidade rotações por minuto (rpm); f_e é a frequência elétrica da fonte de alimentação conectada ao estator da máquina de indução; e P é a quantidade de polos da máquina. A multiplicação por 60 ocorre devido ao que foi discutido na equação (9.2).

Ao observar a equação (9.9), é perceptível que, mantendo-se fixa a frequência elétrica da fonte que alimenta a máquina, a velocidade do campo girante do estator decresce quanto maior for a quantidade de polos da máquina. Nas Tabelas 9.1 e 9.2 são exibidas diversas velocidades de campo girante para uma máquina que é alimentada a uma frequência de 50 Hz (Tabela 9.1) e de 60 Hz (Tabela 9.2). Observe que, quanto maior a frequência de alimentação elétrica, maior a velocidade do campo girante, e quanto maior o número de polos, menor a velocidade do campo girante.

Tabela 9.1 – Velocidade do campo girante para $f = 50$ Hz

Número de polos	Velocidade – fonte a 50 Hz
2	3000 rpm
4	1500 rpm
6	1000 rpm

Tabela 9.2 – Velocidade do campo girante para $f = 60$ Hz

Número de polos	Velocidade – fonte a 60 Hz
2	3600 rpm
4	1800 rpm
6	1200 rpm

Uma vez estabelecido um campo girante no estator da máquina, haverá a indução de tensões e correntes no rotor dessa máquina. Havendo correntes circulando no rotor, também surgirá um campo girante nesse rotor (esse campo girante é uma reação àquele que lhe deu origem). O campo do rotor, então, tentará se alinhar com o campo girante do estator, mas, ao fazer isso, acaba arrastando mecanicamente os condutores do rotor. É devido a esse arraste mecânico do rotor da máquina, para que o campo do rotor se alinhe ao do estator, que há o movimento de rotação nas máquinas de indução.

9.5.2 Rotor de gaiola de esquilo e rotor bobinado

As máquinas de indução possuem dois tipos de rotor: o rotor em gaiola de esquilo e o rotor bobinado (Figuras 9.21 e 9.22). A diferença básica entre os dois é que, no primeiro, não há qualquer possibilidade de acesso ao seu circuito interno e, no segundo, existe essa possibilidade através dos anéis coletores. Do ponto de vista construtivo, as máquinas com rotor em gaiola de esquilo são bem mais simples que as de rotor bobinado, visto que o rotor em gaiola de esquilo é formado por um conjunto de barras metálicas curto-circuitadas em suas extremidades e envolvidas por um material magnético. Já no rotor bobinado, além do material magnético, há a necessidade de enrolar bobinas com o mesmo número de polos que o estator e também de prover um meio de conexão das extremidades dessas bobinas nos anéis coletores. Em outras palavras, o custo da produção do rotor bobinado é bem maior que a do rotor gaiola de esquilo. Assim, o preço do motor de rotor bobinado é maior que o de gaiola de esquilo.

Figura 9.21 – Rotor gaiola de esquilo

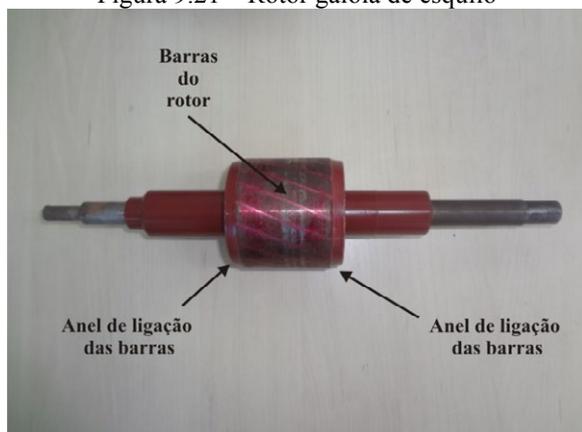
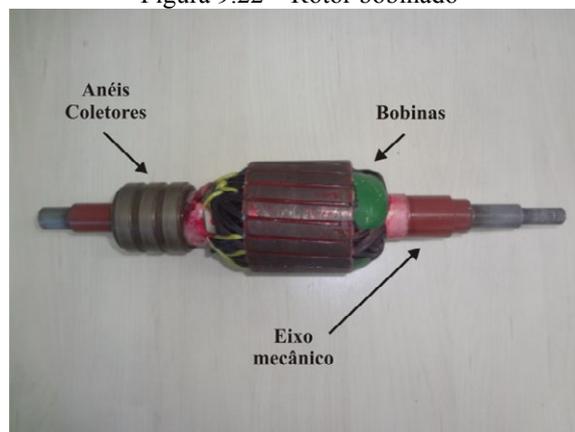


Figura 9.22 – Rotor bobinado



A seguir serão detalhados alguns conceitos importantes quanto à diferença de velocidades nas máquinas de indução.

9.5.3 O escorregamento

De acordo com a equação (9.9), uma máquina de indução de quatro polos, alimentada por uma fonte de tensão de 60 Hz, deveria girar a uma velocidade de 1800 rpm. Se, entretanto, você adquirir uma máquina de indução com as mesmas características citadas acima, irá perceber que, na placa de identificação, a velocidade mecânica de rotação do eixo da máquina é diferente do que você esperaria se levasse em consideração tão somente a equação (9.9). Geralmente, o valor da velocidade do eixo de uma máquina de indução trifásica é diferente da velocidade do campo girante estabelecido em seu estator. Vejamos o porquê.

Os circuitos do rotor são percorridos pelo campo girante estabelecido no estator; para esses circuitos há, portanto, uma variação de fluxo. Pela lei de indução de Faraday, há, nos circuitos do rotor, a indução de tensões, as quais, por sua vez, originam correntes, as quais dão origem ao campo do rotor. Após estabelecido, o campo do rotor tenderá a se alinhar com

o campo do estator. Na tentativa de tentar se alinhar com o campo do estator, o campo do rotor acaba arrastando mecanicamente os circuitos do rotor. Caso o rotor gire na mesma velocidade que o campo do estator, não haverá mais variação de fluxo nos enrolamentos do rotor, dessa forma não haverá mais tensões induzidas nos circuitos do rotor, conseqüentemente não haverá conjugado. Em outras palavras, para haver conjugado mecânico no rotor, é necessária uma diferença de velocidade entre o rotor e o campo girante do estator. Essa diferença de velocidades é conhecida como *escorregamento* entre rotor e estator.

O escorregamento pode ser quantificado de dois modos. O primeiro é por meio da simples diferença de velocidades, tal como na equação (9.5):

$$n_{esc} = n_s - n_r \quad (9.5)$$

em que n_r é a velocidade mecânica do rotor. Você deve observar que a unidade da equação (9.10) ainda é medida em rpm.

O segundo modo de expressar o escorregamento é levando em consideração a diferença de velocidades entre campo do estator e rotor *em relação* ao campo do estator. Este é o escorregamento percentual ou relativo, expresso em (9.6):

$$s = \frac{(n_s - n_r)}{n_s} \quad (9.6)$$

em que s indica o escorregamento. Neste modo de expressar, o escorregamento é adimensional e, se este escorregamento for multiplicado por 100, será obtida a diferença percentual de velocidades entre o rotor e o campo girante do estator. Observando a equação (9.6), é possível chegar à conclusão de que, quando o rotor está parado (máquina desligada ou com rotor travado), o escorregamento s é igual a 1. Se por algum motivo a velocidade do rotor for igual à velocidade do campo girante do estator, o escorregamento s será igual a zero. Também é possível expressar a velocidade de rotação do rotor, em função do escorregamento e da velocidade do campo girante do estator, rearranjando-se, algebricamente, a equação (9.6) para obter-se a equação (9.7):

$$n_r = (1 - s) \times n_s \quad (9.7)$$

Pelo fato de existir uma diferença relativa de velocidades entre o rotor e o campo girante do estator, a frequência das tensões e correntes induzidas nos circuitos do rotor é diferente da frequência das correntes que percorrem os enrolamentos do estator. A frequência das tensões e correntes induzidas no rotor é expressa por (9.8).

$$f_r = s f_e \quad (9.8)$$

em que f_r é a frequência das tensões e correntes induzidas no rotor. O escorregamento, geralmente, não vem expresso diretamente nas placas de identificação das máquinas de indução, conforme será visto logo adiante. Há a possibilidade de o escorregamento tal como expresso na equação (9.11) possuir um valor negativo; isso ocorre quando a máquina de indução está trabalhando como gerador.

9.5.4 Esquemas de enrolamento dos motores de indução

Os enrolamentos dos motores de indução são distribuídos em ranhuras ao longo da periferia interna do estator. Cada fase da máquina possui seu conjunto de bobinas, de modo que a distribuição dos condutores que formam as bobinas de cada fase é feita de maneira tal a produzir uma densidade de fluxo (de campo) aproximadamente senoidal. Na Figura 9.23, parte do estator é vista de forma planificada. As bobinas podem ser enroladas nessas ranhuras de dois modos: modo concêntrico (todas as bobinas possuem o mesmo centro) – Figura 9.23 (a) – e modo progressivo (os centros das bobinas avançam) – Figura 9.23 (b), admitindo-se que os terminais de um enrolamento de quaisquer das fases sejam P – de princípio – e F – de fim. Independentemente do modo de enrolar, as bobinas de uma máquina de indução produzem uma força magnetomotriz⁷ com uma distribuição aproximadamente senoidal ao longo do entreferro da máquina, conforme explicitado na Figura 9.24. Com a ajuda dessa figura, percebe-se, a esta altura, que o campo girante é uma composição de ondas de campos magnéticos. O campo girante também é uma onda que se propaga de forma circular.

Figura 9.23 – Grupo de 4 bobinas (a) concêntricas e (b) progressivas, respectivamente, representadas de forma planificada

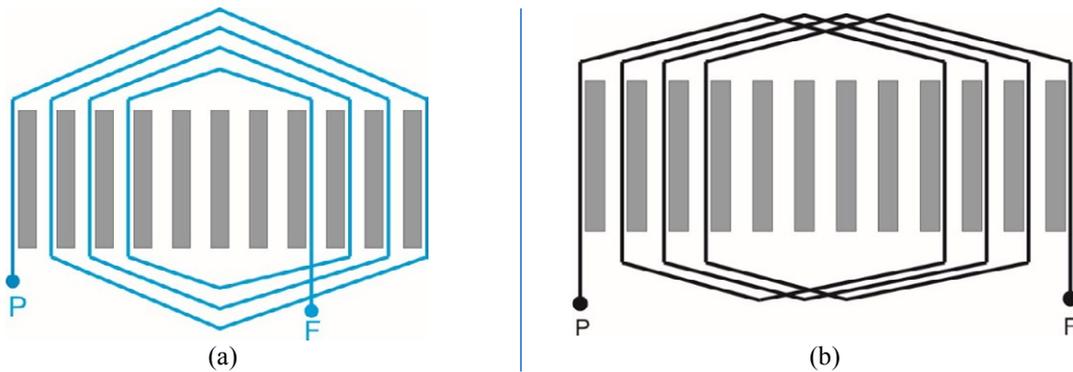
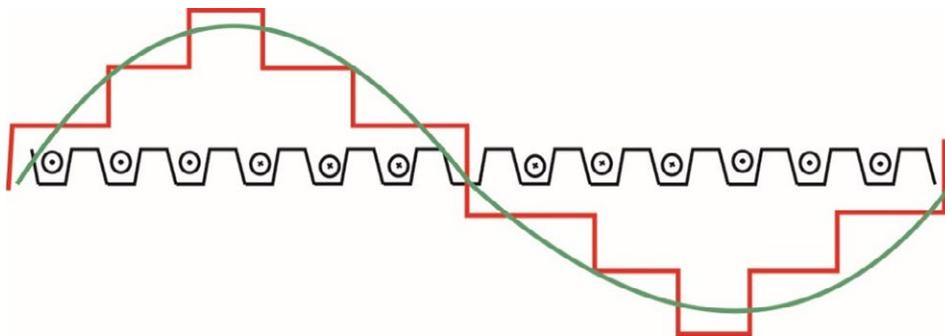


Figura 9.24 – Distribuição da força magnetomotriz ao longo da periferia do entreferro nas máquinas de indução em vermelho e aproximação da componente fundamental em verde



⁷ A força magnetomotriz pode ser entendida como a fonte que produz o campo magnético. Como mostrado neste livro, o campo magnético é produzido por cargas elétricas em movimento. Como a corrente elétrica é um conjunto de cargas elétricas em movimento, isso quer dizer que correntes elétricas produzem campos magnéticos. A definição de força magnetomotriz, na sua forma matemática, é tão somente o produto da corrente pela quantidade de espiras que esta corrente percorre, de modo que a unidade da força magnetomotriz é igual à espira.

Nos Anexos 4, 5 e 6, são mostrados esquemas planificados de motores comerciais com estator de 24 ranhuras, tanto monofásicos com trifásicos. É de fundamental importância que se procure entender esses esquemas, posto que a disposição dos grupos de bobinas está relacionada ao princípio de funcionamento dos motores de indução.

9.5.5 Placas de identificação das máquinas de indução

Por imposições normativas, em todas as máquinas rotativas devem ser fixadas placas de identificação, as quais devem conter informações elétricas e mecânicas importantes, chamadas de especificações nominais da máquina. As principais informações contidas em uma placa de identificação de motores são:

- **Tipo do motor:** trifásico/ monofásico.
- **Potência nominal do motor:** A potência de ponta de eixo para que o motor foi projetado. É a carga máxima que pode ser exigida do motor sob condições normais. Esta potência pode ser identificada em cv, hp. É bom lembrar que:
 $1 \text{ cv} = 736 \text{ W}$
 $1 \text{ hp} = 746 \text{ W}$
- **Ligações com as devidas tensões e correntes a plena carga:** Um motor de seis terminais possui 2 ligações: delta (v), estrela ($\sqrt{3}v$). Já um motor de 12 terminais possui 4 ligações: delta paralelo (v), estrela paralelo ($\sqrt{3}v$), delta série ($2v$), estrela série ($2\sqrt{3}v$). Os termos entre parênteses correspondem à tensão de linha de cada ligação. Os esquemas de ligação são descritos nas placas. Antes de ligar um motor, é extremamente recomendado que se atente ao esquema de ligação. Ligações erradas podem danificar o motor, acarretar danos ao sistema elétrico, além de submeter os operadores a risco de acidentes.
- **Frequência de alimentação:** frequência da tensão de alimentação da rede. Normalmente 60 Hz.
- **Velocidade a plena carga:** velocidade em rpm, quando o motor opera com carga nominal. Esta velocidade está um pouco abaixo da velocidade síncrona do campo girante. Por exemplo: um motor de 4 polos possui uma velocidade síncrona do campo girante de 1800 rpm no sistema de 60 Hz – a velocidade do rotor a plena carga é 1750 rpm.
- **Fator de serviço:** percentual de sobrecarga máxima a que pode ser submetido o motor. Exemplo: FS = 1,15 implica que o motor pode ter um sobrecarga de 15%, sem sofrer danos.

- **Classe de isolamento:** indica a classe dos materiais isolantes utilizados no motor. É indicado por uma letra que corresponde ao limite de temperatura de serviço.

A	105 °C
E	120 °C
B	130 °C
F	155 °C
H	180 °C

- **Grau de proteção IP:** identifica o grau de proteção do motor em relação à presença de água e grãos. O primeiro número indica o grau de proteção contra grãos de poeira, e o segundo o grau de proteção contra água. Nas Tabelas 9.3 e 9.4 são mostradas as características de proteção relativa à numeração. Exemplo: Um motor IP 55 possui proteção contra poeira e contra jatos de água leves. Este motor não está protegido para jatos potentes nem muito menos imersão em água.

Tabela 9.3 – Grau de proteção à presença de grãos

1º Número Proteção contra poeira	Característica de proteção
0	Sem proteção
1	Protegido de grãos maiores que 50mm
2	Protegido de grãos maiores que 12,5mm
3	Protegido de grãos maiores que 2,5mm
4	Protegido de grãos maiores que 1mm
5	Protegido contra poeira
6	À prova de poeira - lacrado

Tabela 9.4 – Grau de proteção à presença de água

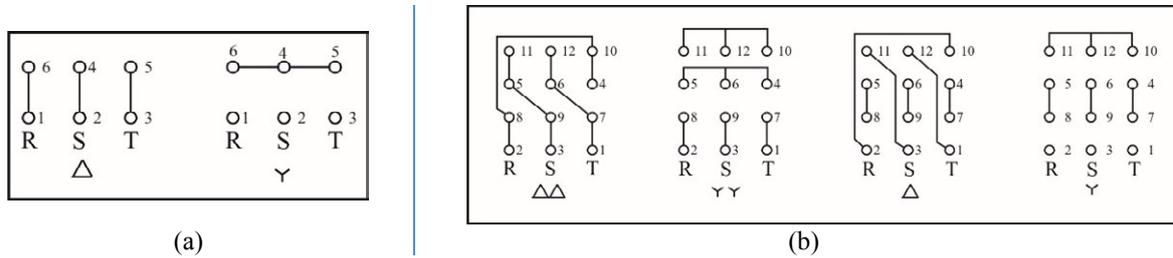
2º Número Proteção contra água	Característica de proteção
0	Sem Proteção
1	Proteção contra gotas verticais
2	Proteção contra gotas verticais até 15°
3	Proteção contra boriffo
4	Proteção contra jorro
5	Proteção contra jatos leves
6	Proteção contra jatos potentes
7	Protegido contra imersão temporária
8	Protegido contra imersão contínua

- **Categoria:** define o tipo de motor em relação ao conjugado de partida, corrente de partida, velocidade a plena carga. Esses valores são ditados por normas e podem ser do tipo N, H e D.
- **Categoria N:** Conjugado de partida normal, corrente de partida normal e baixo escorregamento. São os motores mais comuns para acionamento de cargas normais como: bombas hidráulicas prediais e máquinas operatrizes.
- **Categoria H:** Conjugado de partida alto, corrente de partida normal e baixo escorregamento. São motores que acionam cargas que exigem um maior conjugado de partida, como peneiras, correias transportadoras, britadores.
- **Categoria D:** Conjugado de partida alto, corrente de partida baixa e alto escorregamento (7% a 11%). Possui alta resistência elétrica no rotor, frequentemente barras de latão (FITZGERALD, 2017). Utilizados para acionamento de cargas intermitentes, como bate-estacas, prensas, tesouras, etc.
- **Relação I_p/I_n :** É a relação entre a corrente de partida e a corrente nominal da máquina. É muito importante para que se tenha a ideia do valor da corrente solicitada pela máquina no momento da partida. Essa informação é muito utilizada por projetistas de esquemas de acionamentos elétricos⁸.

Para exemplificar um pouco esses conjuntos de informações, tomemos por base as formas de ligação. Se a máquina de indução possuir seis terminais, deve vir expressa na placa de identificação a especificação numérica dos terminais (ou alfa numérica) bem como cada terminal deve ser conectado para perfazer uma determinada ligação, conforme exibido nas Figuras 9.25 (a) e (b). Por exemplo, se for necessário ligar a máquina em Δ , então os terminais 6 – 1, 4 – 2 e 5 – 3 devem ser curto-circuitados; após esse procedimento, os terminais equivalentes devem ser ligados nas fases da rede de alimentação, as quais foram representadas por L1, L2 e L3. Ao fazer a ligação em Δ , deve ser observado que as tensões aplicadas nas bobinas não podem ser superiores a 220 V – Figura 9.25 (a). Se o motor possuir um maior número de terminais, a placa de identificação deverá identificar, além de cada um desses terminais, suas formas de ligação, não deixando de informar os níveis suportáveis de tensão, como é o caso de um motor de 12 terminais, em cuja placa as formas de ligação podem ser exibidas como disposto na Figura 9.25 (b).

⁸ Os acionamentos elétricos são metodologias de ligar corretamente a máquina de indução, sem que suas elevadas correntes de partida prejudiquem os sistemas aos quais estão sendo ligados. Os acionamentos elétricos também possibilitam o controle da velocidade e do torque impostos ao eixo da máquina.

Figura 9.25 – Ligações externas para motores de (a) seis e (b) doze terminais.
Da esquerda para direita, tensão menor para maior



9.5.6 Motor de indução monofásico

O motor de indução monofásico é uma categoria de motores destinados a operar em monofásico, ou seja, sua alimentação é monofásica. A grande maioria das residências, por exemplo, é atendida pelo sistema monofásico (fase e neutro). Caso seja necessário utilizar uma bomba hidráulica para abastecer um reservatório, a opção do motor monofásico é a mais atrativa. Há basicamente três tipos comerciais de motores de indução monofásico, que serão descritos a seguir.

9.5.6.1 Motor com capacitor na partida

O motor monofásico de indução com capacitor na partida é o mais presente nas instalações monofásicas, pois é útil para acionar bombas, serras, furadeiras e outras cargas de baixa potência. O motor de indução monofásico possui dois tipos de enrolamentos, como pode ser verificado na Figura 9.26: o enrolamento de trabalho, que é ligado continuamente à fase e ao neutro – T1 e T2, conforme ilustrado na Figura 9.26, e o enrolamento auxiliar de partida, que é ligado em série com um capacitor. A função desse capacitor é fazer com que a corrente no enrolamento auxiliar adiante de 90° em relação ao enrolamento de trabalho. Isto é possível escolhendo um capacitor cuja reatância seja igual à reatância do enrolamento auxiliar. Isto faz com que o circuito, bobina e capacitor apresentem características somente resistivas. Para mais detalhes sobre reatâncias indutivas e capacitivas, ler o Capítulo 6. Como as duas correntes dos dois enrolamentos estão defasadas de 90° , os campos gerados por elas serão defasados no tempo de 90° . Dois campos defasados no tempo e no espaço de 90° criam um campo resultante girante, semelhante ao campo girante trifásico. Desta forma, há conjugado de partida estável sobre o rotor em gaiola. Após o motor partir e o rotor alcançar uma velocidade considerável, entra em cena a chave centrífuga. Ela desliga todo circuito auxiliar, fazendo com que o motor opere somente com enrolamento de trabalho. Em outras palavras, o enrolamento auxiliar só é necessário na partida.

Figura 9.26 – Esquema simplificado de um motor de indução monofásico (capacitor de partida)

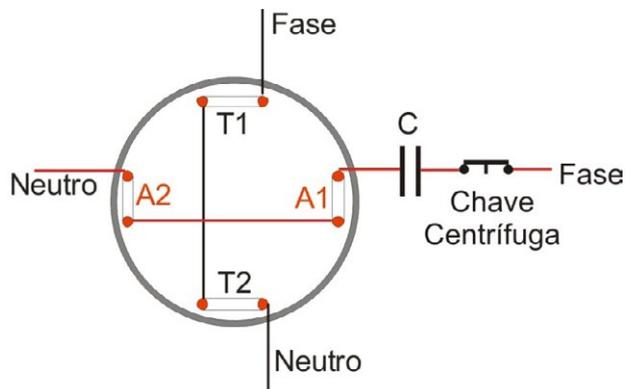
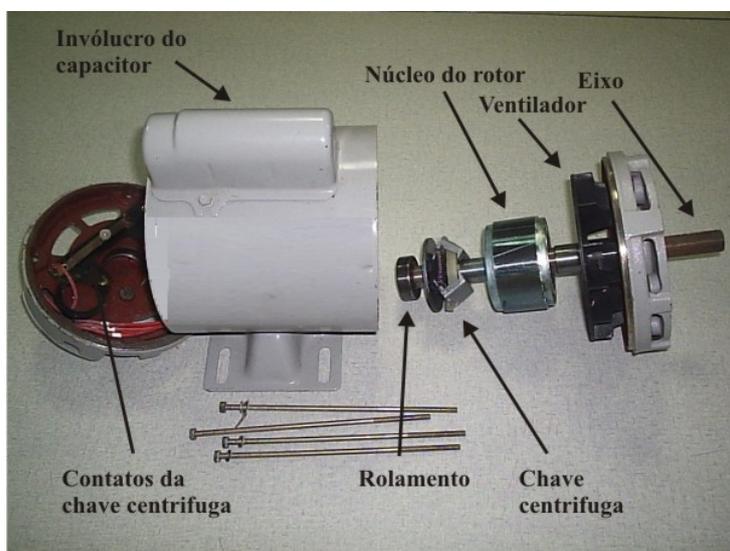


Figura 9.27 – Capacitores CA para motores monofásicos



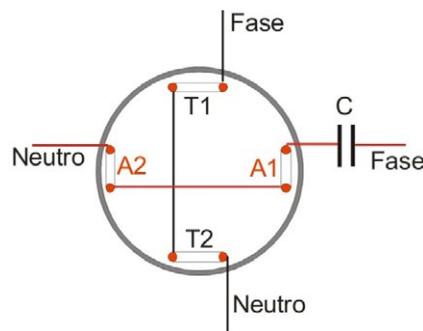
Figura 9.28 – Motor de indução monofásico com partida auxiliar utilizando capacitor



9.5.6.2 Motor com capacitor permanente

Da mesma forma que o motor de indução com capacitor de partida, o enrolamento auxiliar, juntamente com o capacitor, é utilizado para auxiliar a partida. Depois que o rotor atinge uma velocidade considerável, o circuito auxiliar, formado por enrolamento auxiliar e capacitor, permanece ligado, ou seja, neste tipo de motor não há chave centrífuga, como pode ser visto na imagem da Figura 9.29.

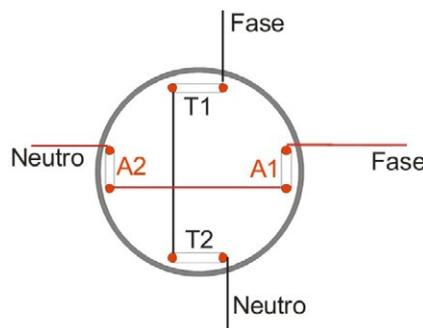
Figura 9.29 – Esquema simplificado de um motor de indução monofásico (capacitor de permanente)



9.5.6.3 Motor sem capacitor (*Split-Phase*)

O motor de indução sem capacitor, ou chamado de fase dividida (*Split-phase*), utiliza a seção do fio do enrolamento auxiliar para defasar as correntes. Seu esquema simplificado pode ser visto na Figura 9.30. Reduzindo-se a seção do condutor, sua resistência aumenta, fazendo com que a corrente do enrolamento auxiliar se aproxime da fase da tensão. Observe que, na presença do capacitor, a corrente do enrolamento auxiliar chega muito próximo à fase da tensão, fazendo com que as duas correntes, de trabalho e auxiliar, estejam quase a 90° . Isto não ocorre no motor de fase dividida – as duas correntes estão defasadas com um ângulo menor que 90° . Isto acarreta diminuição de conjugado de partida da máquina. O motor de fase dividida é recomendado para acionar cargas com baixo conjugado de partida, como, por exemplo, ventiladores. Já para bombas hidráulicas, é recomendada utilização de motores a capacitor.

Figura 9.30 – Esquema simplificado de um motor de indução monofásico (motor fase dividida)



Características gerais dos motores monofásicos:

- Disponibilidade em baixas potências.

Apesar de existirem motores monofásicos de, por exemplo potência de 10 cv ou 12 cv, não é comum a utilização de potências acima de 5 cv. Uma necessidade de utilização de motores com mais de 5 cv, já merece um estudo da aplicação dos motores trifásicos, que possuem uma série de vantagens técnicas em relação aos monofásicos, tais como preço, custo da manutenção, corrente de partida, possibilidade de acionamento com inversores trifásicos. Os motores trifásicos estão disponíveis numa ampla faixa de potência.

- Devido ao fluxo de potência do motor em estudo ser monofásico, tal motor é mais ruidoso e trepada mais que os trifásicos.

9.6 Máquinas síncronas

As máquinas síncronas são muito importantes para as atividades do dia a dia, pois são utilizadas, prioritariamente, como geradores, próprias para operarem em tensão alternada. No Brasil, por exemplo, as máquinas síncronas têm papel fundamental no fornecimento de energia ao Sistema Interligado Nacional (SIN). Trata-se de um sistema hidro-termo-eólico no qual são predominantes usinas hidrelétricas. Esse sistema se estende por grandes áreas do Brasil e é subdividido em quatro grandes subsistemas: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e a maior parte na região Norte. Nas usinas hidrelétricas, as máquinas síncronas são utilizadas como elementos de conversão eletromecânica de energia, transformando a energia potencial mecânica das quedas de água das represas em energia elétrica, a qual é transmitida pelo SIN. Outras fontes primárias de energia utilizam a máquina síncrona para gerar energia elétrica, por exemplo: as termoeletricas – tanto as que utilizam derivados de petróleo quanto as que utilizam carvão mineral –, os geradores eólicos e até termonucleares. As plantas simplificadas das diversas fontes de energia primária são mostradas no Capítulo 12. Nesta seção, serão abordados aspectos introdutórios ao comportamento e partes construtivas das máquinas síncronas. Para isto, utilizaremos a classificação geral das principais máquinas síncronas.

9.6.1 Classificação das máquinas síncronas

O princípio de funcionamento das máquinas síncronas é o mesmo das máquinas abordadas anteriormente, a diferença é que o circuito de campo desse tipo de máquina está no rotor. Como esta é uma abordagem introdutória ao estudo das máquinas, nesta seção o enfoque será voltado para as máquinas síncronas trifásicas por serem as mais presentes nos processos de geração de energia elétrica. O estator é semelhante ao da máquina de indução. Para cada par de polos, o estator da máquina síncrona trifásica é composto de três grupos de

bobinas, um para cada fase, semelhante à máquina de indução. Dessa forma, a máquina síncrona gera três grupos de tensões defasados entre si de 120° – é o nosso sistema trifásico.

Vimos anteriormente que a máquina de indução é conhecida como assíncrona. O rotor gira numa velocidade menor que a do campo girante de estator. Na máquina síncrona, seu rotor gira na mesma velocidade do campo girante de estator. Ambos, campo girante e rotor, estão em sincronismo, daí a máquina ser conhecida como síncrona. Dessa forma, se o estator de uma máquina síncrona de 2 polos está gerando uma tensão com frequência de 60 Hz, seu rotor está obrigatoriamente girando a 3600 rpm. Nas grandes usinas hidrelétricas, os geradores são muito grandes. Há rotores por volta de 30 toneladas que giram em baixa velocidade, ou seja, por volta de 100 rpm. Tais máquinas precisam de muitos polos para gerar numa frequência de 60 Hz. Assim, uma máquina operando a 100 rpm, gerando uma frequência de 60 Hz, necessita de 72 polos. Os rotores dessas máquinas são tão pesados que precisam de um procedimento rotineiro, o qual, entre uma parada operacional e uma inicialização, leva vários minutos.

Quanto ao rotor, é a forma de classificação da máquina síncrona mais usual. Tem-se as seguintes máquinas:

9.6.1.1 Máquina síncrona de rotor cilíndrico

Como já foi enfatizado, o rotor da máquina síncrona opera na mesma velocidade do campo girante do estator. Isto se deve pelo fato de o campo magnético de rotor, ou campo de excitação, ser fixo. Na máquina síncrona de rotor cilíndrico ou de polo saliente, o campo é criado graças à circulação de corrente contínua. O campo de excitação da máquina é alimentado por corrente contínua. O coletor permite levar a corrente da fonte CC até os enrolamentos do rotor. Na Figura 9.31, é mostrada uma planta simplificada de uma máquina síncrona de rotor cilíndrico. O coletor é formado por anéis coletores que são montados no eixo da máquina. Esses anéis giram solidários ao eixo mecânico da máquina. Em contato com esses anéis, deslizam as escovas de grafite que são ligadas à fonte de tensão contínua.

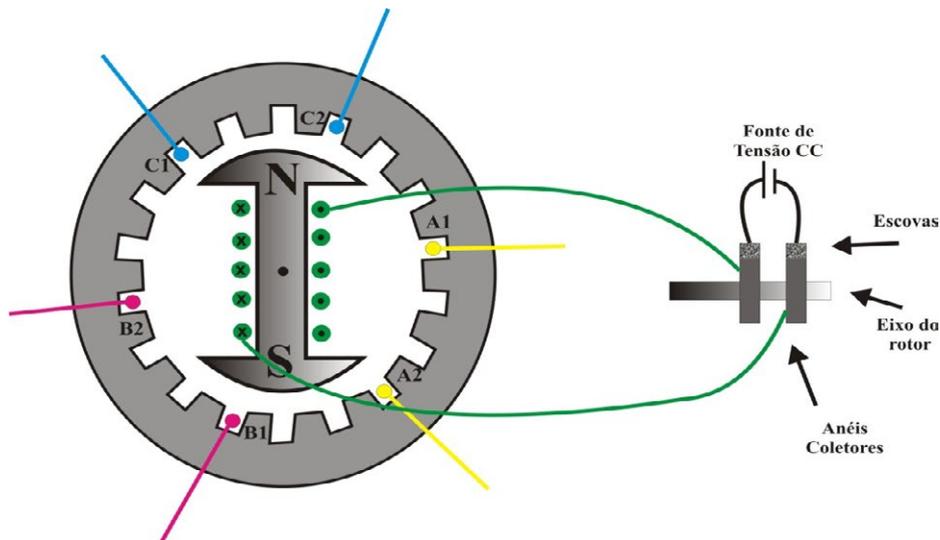
A bobina do rotor cria o campo magnético do rotor, a partir de uma corrente contínua que circula por esta bobina, o que é possível comprovar com a regra da mão direita. É possível observar que, como o rotor é cilíndrico, não há nenhuma direção que possua maior ou menor relutância magnética. Dizemos que, neste caso, o rotor só apresenta conjugado devido à excitação, ou seja, devido à corrente que circula pela bobina do rotor.

As máquinas síncronas de rotor cilíndrico são máquinas destinadas a operar em alta velocidade. É comum termoeletricas utilizarem máquinas de rotor cilíndrico de 2 e 4 polos.

repulsão dos dois eletroímãs criada, uma ou outra, por duas correntes, ou seja, há uma força devido às duas correntes, à excitação. Na máquina de polo saliente, há dois tipos de conjugados. O conjugado de excitação, por conta dos eletroímãs do rotor e do estator, e o conjugado de relutância em relação ao ferro do próprio rotor.

Máquinas síncronas de rotor de polo saliente são muito utilizadas em aplicações de baixa velocidade, como é o caso das usinas hidrelétricas. Neste tipo de aplicação, é comum máquinas de muitos polos.

Figura 9.33 – Planta simplificada de uma máquina síncrona de rotor de polo saliente



9.6.1.3 Máquina síncrona de rotor de ímã permanente

No Capítulo 3, foi enfocada a tecnologia dos ímãs permanentes. Vimos também que, nas últimas décadas, houve um aumento considerável na energia dos ímãs permanentes, principalmente com o advento das ligas de materiais terras raras. Este tipo de máquinas síncrona evoluiu na mesma proporção em que evoluíram os ímãs, ganhando muito em densidade de potência por kg bem como em custo de fabricação em relação às outras máquinas síncronas. Essa máquina não possui bobinas no rotor, desta forma, não possui coletor, como pode ser visto na Figura 9.34. Essa característica a torna muito robusta em relação a falhas, além de ter produção simples.

Duas aplicações desta máquina podem ser destacadas.

- **Na geração eólica.** Esse tipo de máquina síncrona conectada a turbinas eólicas é muito utilizado. É possível encontrar no mercado disponibilidade de potências que vão desde 500 W até 60 kW, para aplicações exclusivas na geração eólica.
- **Nos veículos híbridos.** Esses veículos são projetados para serem movidos por um motor a combustão e por um motor elétrico, a partir de um banco de baterias, vistos na Figura 9.35. Um sistema de transmissão híbrido permite que o veículo em baixas velocidades seja tracionado pelo motor elétrico e, quando em altas velocidades,

pelo motor a combustão. O aproveitamento da energia cinética do veículo nas paradas é o grande diferencial deste tipo de tecnologia. No ato de frear o veículo, a máquina síncrona de polo saliente passa a funcionar como um gerador. O conversor estático processa essa energia, transferindo-a para as baterias. Esse procedimento aumenta muito a autonomia das baterias. É comum motores síncronos de ímã permanente na faixa de 90 cv nesses veículos. Vale lembrar que os veículos híbridos operam tanto com combustível fóssil quanto com energia elétrica. O automóvel *Prius* Híbrido da Toyota é um exemplo desse tipo de veículo. Já os veículos elétricos são opções que funcionam somente com energia elétrica, caso do *Model S* da empresa Tesla motors.

Figura 9.34 – Máquina síncrona de rotor de ímã permanente

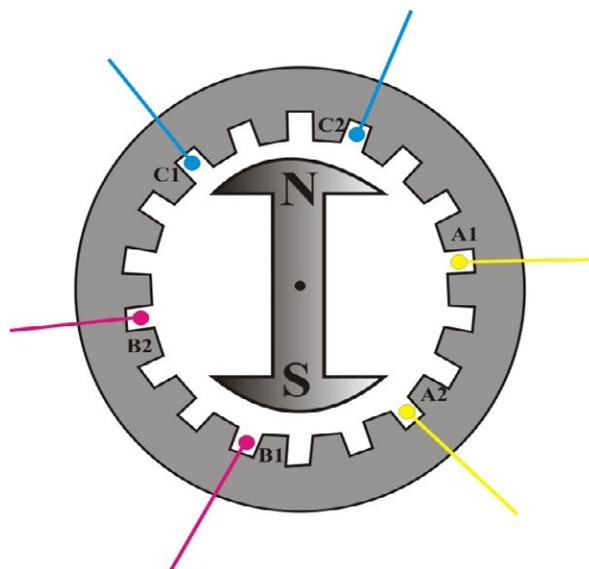
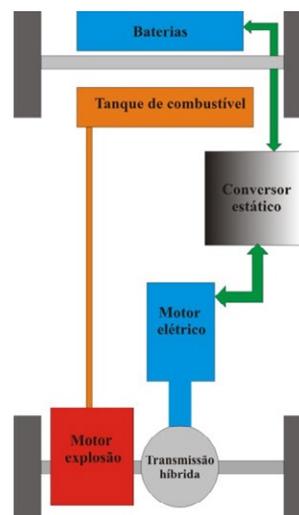


Figura 9.35 – (a) Turbina eólica; (b) Planta simplificada de um veículo híbrido



(a)



(b)

REFERÊNCIAS

ABB. **Motores e geradores elétricos**. Disponível em: <<http://new.abb.com/motors-generators/pt>>. Acesso em: jan. 2018.

ANELK. **Papéis e fibras isolantes**. Disponível em: <<http://www.anelk.com.br/laminados.htm>>. Acesso em: set. 2017.

CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. Tradução: Anatólio Laschuk. Porto Alegre: McGraw Hill, 2013.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., Charles; UMANS, Stephen D. **Electric machinery**. Nova York: McGraw Hill, 2003.

GOTTLIEB, Irving. **Practical electric motor handbook**. Oxford: Elsevier, 1997.

GRUPO VOGES. **Catálogos de motores elétricos**. Disponível em: <<http://www.voges.com.br/?section=produtos>>. Acesso em: maio 2017.

KOSOW, Irving I. **Máquinas elétricas e transformadores**. São Paulo: Editora Globo, 1989.

LIPO, Thomas A. **Introduction to AC machine design**. Madison: Wisconsin Research Center, University of Wisconsin, 2004.

WEG. **Catálogos de motores elétricos de indução**. Disponível em: <http://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-EI%C3%A9tricos/c/BR_MT>. Acesso em: ago. 2017.

10 Qualidade de energia – conceitos básicos

Os sistemas de potência CA foram originalmente concebidos para trabalhar com tensões e correntes senoidais. Ainda no início do século XX, entretanto, foram disponibilizadas algumas tecnologias para o condicionamento da potência e conversão de sinais CA em sinais CC. Embora as tecnologias de manipulação e processamento da potência remontem aos tempos do desenvolvimento e proliferação das tecnologias de geração e transmissão CA, foi com o advento da eletrônica de estado sólido que realmente o processamento de potência ganhou força e um forte impulso. Na década de 1940, por exemplo, foi criado o transistor e, em apenas 20 anos, o mercado já disponibilizava, para as indústrias, sistemas e equipamentos com capacidade de manipular potências na ordem dos kW com esses componentes.

O advento da tecnologia dos componentes semicondutores (tecnologia de estado sólido, conforme citado acima) possibilitou a proliferação de equipamentos com características não lineares, tais como retificadores, conversores CC/CC, conversores CC/CA (inversores), conversores CA/CA (gradadores) e conversores CA/CC/CA (conversores *back-to-back*). Estes equipamentos são necessários para as mais diversas aplicações da atualidade, desde TVs a acionamento de motores na indústria. Com o uso continuado de tais equipamentos cada vez mais intenso, foi possível perceber novos problemas nos sistemas de potência. Esses problemas estão relacionados com o funcionamento desses equipamentos que utilizam chaves a estado sólido, o que acabou proporcionando o surgimento de uma área da engenharia elétrica focada em critérios de **qualidade de energia**. Pode-se definir, então, Qualidade de Energia como:

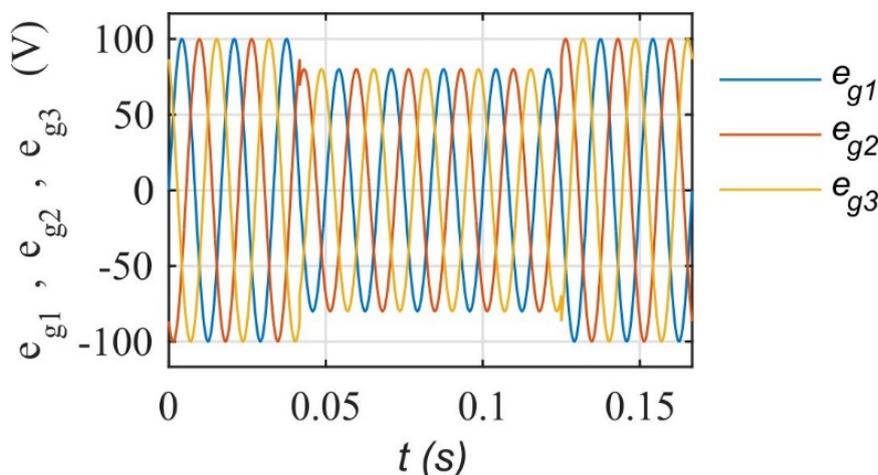
A área de conhecimento que estuda os problemas que interferem na eficiência do sistema elétrico de corrente alternada bem como as soluções para esses problemas.

Este capítulo começa enfocando os principais problemas em qualidade de energia bem como suas causas e efeitos. Problemas esses que interferem diretamente na eficiência do sistema elétrico de corrente alternada. Seguindo, o capítulo enfoca as técnicas de levantamento e quantificação desses problemas. Por último, as soluções que melhoram a qualidade de energia no sistema elétrico.

10.1 Afundamento de tensão

O afundamento da tensão é uma diminuição do nível de tensão de uma instalação elétrica entre 10 e 90% do seu valor RMS, em um período que pode durar entre meio ciclo (10,3 ms se for um sistema em 60 Hz) a um minuto. Para entender melhor, favor recorramos à Figura 10.1.

Figura 10.1 – Afundamento de tensão em um sistema trifásico



Na Figura 10.1, as tensões de uma rede trifásica – chamadas de e_{g1} , e_{g2} e e_{g3} – possuem um valor RMS de 100 V. Em um determinado período de tempo ocorre uma diminuição – afundamento – desse valor de tensão para 90 V RMS.

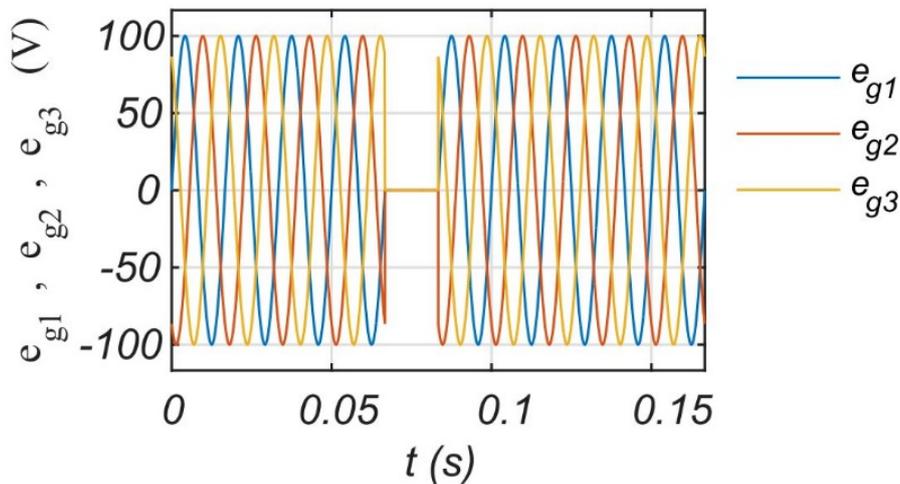
As principais causas desse tipo de problema são originadas de faltas na rede elétrica de distribuição, faltas na instalação consumidora ou, na maioria das vezes, a energização de um equipamento que demande alta potência num curto espaço de tempo, como é o caso da partida direta de motores acima de 5 cv.

Uma das principais consequências advindas de um afundamento de tensão é o mal funcionamento de equipamentos de informática (computadores, notebooks, roteadores, switches). Se o afundamento ocorrer num ambiente industrial, os impactos negativos serão nos equipamentos que contêm microprocessadores, tais como CLPs, inversores e soft-starters; também podem ocorrer trepidações nos contatos de contadores – muitas vezes responsáveis pelo acionamento de máquinas elétricas que poderiam parar ou perder eficiência –, uma vez que as bobinas desses contadores dependem da tensão para atuar devidamente, o que seria alterado pela trepidação.

10.2 Interrupções de curta duração

As interrupções curtas são caracterizadas por uma parada total no fornecimento de tensão – ou corrente – em um sistema elétrico. Recebem esse nome por causa da duração da interrupção, que pode variar de poucos milissegundos até um ou dois segundos. Na Figura 10.2, é possível perceber que existe uma pequena interrupção, nas três fases do sistema, por um breve período – apenas um ciclo de 60 Hz ou 16,7 ms –, caracterizando, portanto, uma interrupção curta.

Figura 10.2 – Interrupção curta



As principais causas desse tipo de problema estão relacionadas à atuação de dispositivos de proteção e isolamento de faltas. As faltas que originam essas atuações são problemas de isolamento ou de raios. As instalações residenciais e industriais atingidas por interrupções curtas são comprometidas na sua proteção elétrica. Também podem ocorrer perdas de informação em PCs; outros dispositivos microprocessadores conectados à rede também podem ser afetados, caso não possuam tecnologias incorporadas que os deixem insensíveis a esse tipo de problema. Nas indústrias, as interrupções curtas podem afetar contadores eletromecânicos, prejudicando, deste modo, os processos que dependam das máquinas acionadas por esses contadores afetados durante a interrupção.

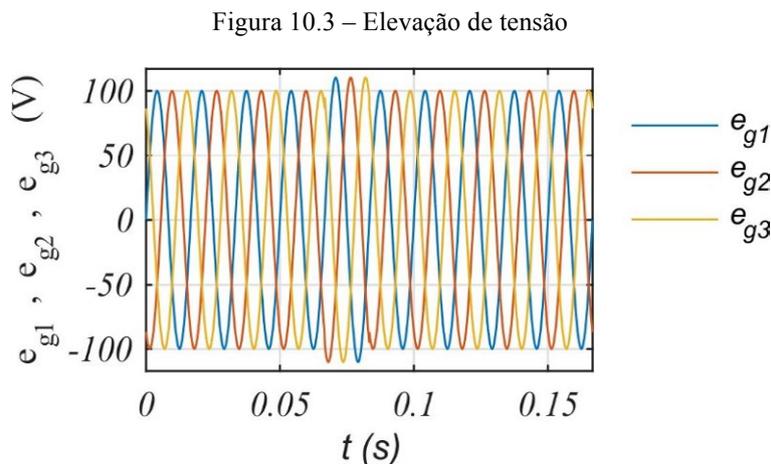
10.3 Interrupções de longa duração

As interrupções longas são caracterizadas por uma total interrupção da alimentação por mais de dois segundos. As causas são inúmeras, como, por exemplo, falha humana na operação do sistema elétrico, falhas de equipamentos, como transformadores e disjuntores, quedas de árvores sobre a fiação da rede de distribuição, tempestades que originem raios e curtos, fogo próximo às linhas de transmissão ou incorreta coordenação da proteção. As consequências dessas interrupções e seus prejuízos são inúmeros. São alguns exemplos:

- Geladeira sem funcionar, repleta de alimentos perecíveis;
- Processos produtivos interrompidos pela consequente parada de computadores e de outras máquinas;
- Luzes desligadas, tornando áreas mais perigosas;
- Semáforos desligados, aumentando o risco de acidentes de trânsito.

10.4 Elevação de tensão de curta duração

Trata-se de uma elevação momentânea e curta – pouco mais de um ciclo – do nível de tensão fornecido a uma instalação elétrica. Esta elevação deve ocorrer, necessariamente, dentro do máximo valor permitido em normas (no Brasil, essas normas são fornecidas pelas concessionárias de distribuição de energia). Na Figura 10.3, demonstra-se uma elevação de tensão num sistema trifásico – as três fases do sistema apresentam, momentaneamente, uma elevação do seu valor, porém num intervalo de tempo não superior a um ciclo (16,7 ms) e com uma amplitude apenas 10% acima da nominal.

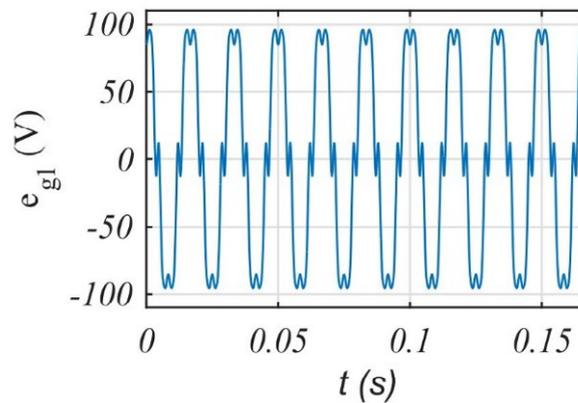


As causas da elevação acima representada podem ser devido à ligação ou desligamento de cargas de elevada potência, fontes mal dimensionadas e ou transformadores com regulação ruim. As consequências de uma má instalação são a perda de dados em sistemas microprocessados, flutuações do nível de luminosidade em ambientes e danos em equipamentos sensíveis a esse tipo de problema.

10.5 Distorção harmônica

As distorções harmônicas são caracterizadas por deformações no perfil do sinal alternado senoidal – afetam tensão e ou corrente, tal como mostrado na Figura 10.4, na qual é exibida uma fase de tensão afetada por distorção harmônica. Deve ser observado que esse tipo de sinal é destoante de um perfil senoidal. Quanto maior for a contaminação por componentes harmônicos, pior será a distorção final do sinal. As causas desse fenômeno podem ser diversas, tais como, máquinas elétricas trabalhando na região de saturação magnética, arcos elétricos originados no sistema devido ao funcionamento de equipamentos específicos (como é o caso dos fornos a arco), uso de máquinas de solda elétrica, uso de retificadores para o acionamento de equipamentos eletroeletrônicos ou para interface e carregamento de barramentos em inversores destinados ao acionamento de máquinas elétricas.

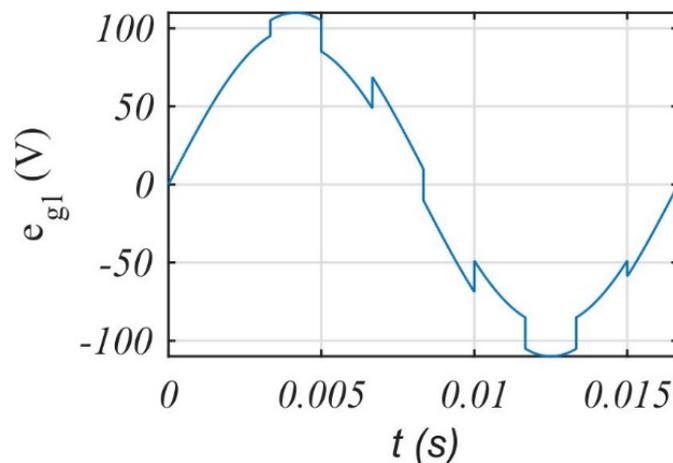
Figura 10.4 – Sinal de tensão distorcido pela presença de componentes harmônicos



As consequências para o sistema elétrico afetado por harmônicos são graves, podendo ocorrer ressonâncias, carregamento do neutro em sistemas elétricos trifásicos a quatro fios, sobreaquecimento de cabos e equipamentos elétricos, diminuição da eficiência em motores elétricos, trepidação e perda da eficiência em motores elétricos de indução, interferência eletromagnética em equipamentos destinados às telecomunicações em geral, erros de medição em sistemas baseados na média das grandezas, atuação incomum de equipamentos de proteção e diminuição do fator de potência. Como este tipo de problema tem consequências muito abrangentes no sistema elétrico de potência, a conceituação de componentes harmônicos será feita mais adiante neste capítulo.

10.6 Picos de tensões esparsos (*voltage spikes*)

Picos de tensão esparsos são variações muito rápidas no perfil senoidal de uma tensão. Duram de alguns microssegundos a poucos milissegundos (sempre muito inferiores ao período do sinal de tensão), conforme pode ser verificado na Figura 10.5.

Figura 10.5 – Picos de tensão esparsos (*voltage spikes*)

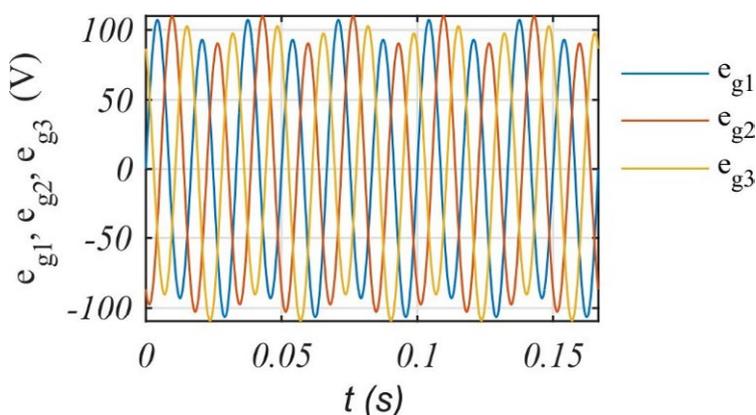
As causas dos picos esparsos na tensão estão relacionadas a quedas de raios em linhas ou redes de distribuição; também são originados devido ao chaveamento de capacitores em bancos de capacitores destinados à correção do fator de potência ou à desconexão repentina de cargas com elevada potência.

Os equipamentos eletrônicos em geral são os mais fortemente atingidos, e, em casos mais sérios, podem ser totalmente destruídos. Também pode ocorrer degradação dos materiais de isolamento e interferência eletromagnética, o que pode rapidamente se espalhar pela rede elétrica.

10.7 Flutuação de tensão ou corrente

Flutuação de tensão ou corrente são oscilações na amplitude dos sinais de corrente e tensão que ocorrem periodicamente com o tempo. As oscilações possuem frequência menor que os sinais afetados. Na Figura 10.6, por exemplo, é apresentado um sinal de tensão afetado por uma flutuação.

Figura 10.6 – Flutuação de tensão em sistema trifásico



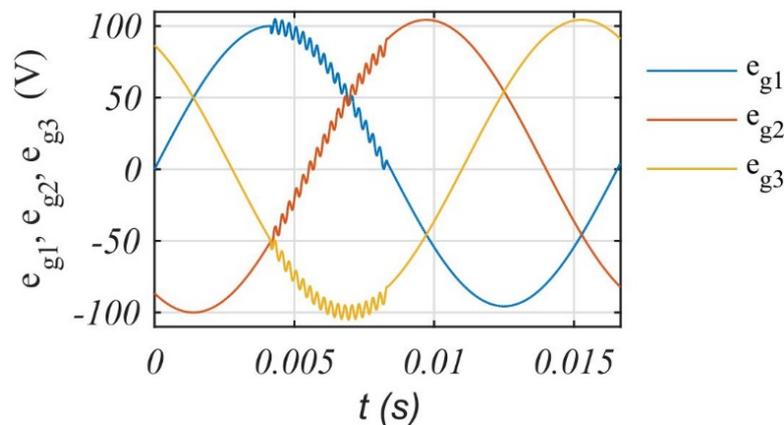
As causas mais comuns das flutuações de tensão são os arcos elétricos, acionamentos e paradas frequentes de motores – tais como os utilizados em elevadores – e cargas oscilatórias. As consequências mais comuns são as oscilações na iluminação, as quais causam desconforto visual e perda de eficiência de trabalho pelas pessoas.

10.8 Ruídos de tensão ou corrente

Esse tipo de problema é causado pela superposição de um sinal de alta frequência ao sinal da rede. Tanto as tensões como as correntes podem ser afetadas. Como exemplo, na Figura 10.7 são exibidos três sinais de tensão de uma rede trifásica, contaminados por um ruído de alta frequência. Nos sinais de tensão mostrados nessa figura, há um ruído de alta frequência em um quarto do período de cada um. Dependendo do tipo de carga conectada às

fases da rede, apenas uma ou duas fases podem ser afetadas, mas já é o suficiente para que o problema se espalhe para as demais fases, a depender da forma de conexão dos equipamentos alimentados pela rede e da impedância da instalação. Quanto menor for a frequência da fonte de ruído, mais perceptível serão os seus efeitos no perfil de onda do sinal afetado.

Figura 10.7 – Três tensões de fase de um sistema trifásico contaminado por um ruído de alta frequência



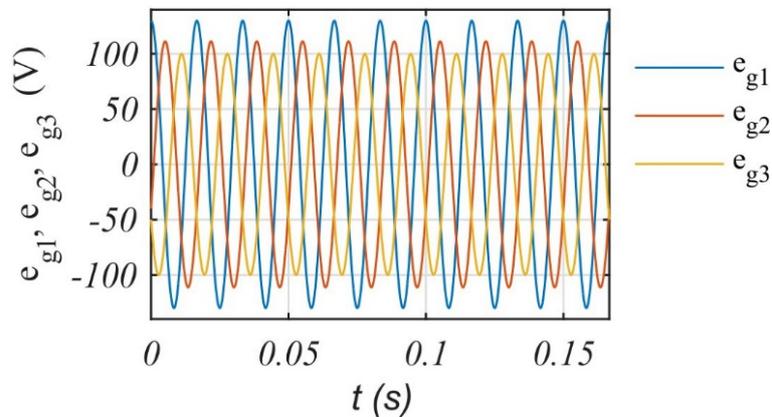
As causas do ruído são, principalmente, interferências eletromagnéticas oriundas de micro-ondas, sinais de difusão televisiva, radiação de máquinas de soldar, equipamentos como fornos a arco, equipamentos eletrônicos, entre outros; um aterramento mal dimensionado também pode originar ruídos de alta frequência no sistema elétrico. Qualquer carga que trabalhe com variações de corrente em equipamentos fortemente indutivos pode originar ruídos na rede elétrica.

As consequências são mais intensas em equipamentos com microprocessadores, porque pode ocorrer perda de informação de dados. Felizmente esse tipo de problema não é destrutivo como os demais, ou seja, um sistema contaminado por ruído geralmente não implica perda de equipamentos.

10.9 Desequilíbrios de tensão ou corrente

Esse tipo de problema ocorre quando existem diferenças entre as amplitudes e ângulos de fase em um sistema equilibrado. Nos sistemas equilibrados, as amplitudes dos sinais – tensão ou corrente – devem ser exatamente os mesmos, e os ângulos entre uma fase e outra devem ser de 120° . Na Figura 10.8, como exemplo, são mostradas as tensões de fase em um sistema trifásico que apresenta desequilíbrios em termos de amplitude. Uma das fases, a fase e_{g3} , não foi afetada pelo desequilíbrio, mas as fases e_{g1} e e_{g2} o foram.

Figura 10.8 – Sistema de três tensões desequilibradas com desequilíbrio



Os sistemas, como o apresentado na Figura 10.8, também são conhecidos como sistemas desbalanceados. As causas mais comuns para esse desbalanceamento ou desequilíbrio são quedas de uma fase, componentes de sequência negativa – sequência cba – que são inseridas no sistema por cargas não lineares, alguns tipos de faltas em sistemas elétricos, como as faltas de fase à terra e algumas cargas monofásicas quando instaladas em fases individuais do sistema trifásico de forma heterogênea.

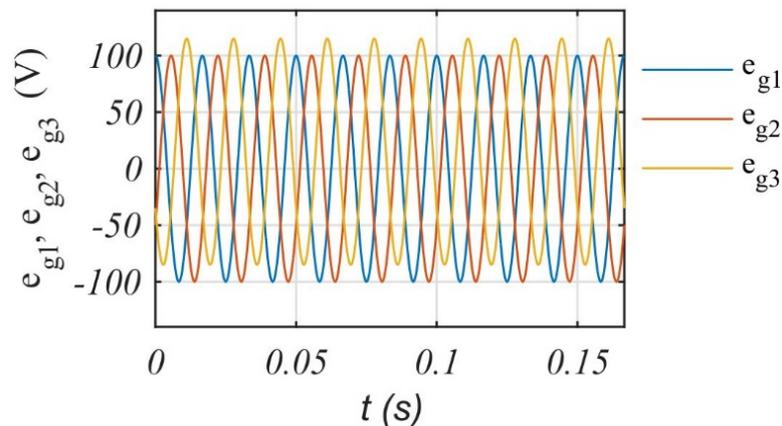
Quando um sistema trifásico é afetado por sinais de tensão ou correntes desequilibrados, poderá ocorrer um aumento de corrente no neutro, com seu possível sobreaquecimento. Nas máquinas elétricas de indução trifásicas, poderão ocorrer algumas trepidações no eixo e decréscimos do torque disponível na ponta do eixo.

10.10 Interferência de Componentes CC (Offsets) em sinais CA

Esse tipo de problema ocorre quando existe um componente de corrente contínua inserida em sistemas CA. Os componentes CC deslocam verticalmente – para cima ou para baixo – os sinais alternados de tensão ou de corrente. Na Figura 10.9, exibimos três sinais de tensão, com um deles deslocado para cima em virtude da presença de um offset CC na fase e_{g3} .

A presença do sinal CC é facilmente detectável nessa figura, uma vez que os sinais não afetados pelo Offset oscilam em torno de zero – possuindo, portanto, valor médio nulo. O sinal de tensão da fase e_{g3} claramente não oscila em torno de zero.

Figura 10.9 – Sistema trifásico apresentando um Offset CC na terceira fase, e_{g3}



As causas são diversas, desde a fenômenos naturais – como perturbações geomagnéticas – até a utilização de equipamentos que possuam retificadores de tensão e corrente – tais como retificadores em meia onda.

Os problemas originados pela presença de um Offset CC em sistemas trifásicos são os mais diversos: podem-se citar o aumento da saturação em transformadores e diminuição da vida útil dos isolamentos.

10.11 Inter-harmônicos

Os inter-harmônicos são uma classe especial de componentes harmônicos, os quais se caracterizam por componentes cujas frequências não são múltiplos inteiros da frequência fundamental. A rede elétrica brasileira, por exemplo, possui uma frequência fundamental de trabalho de 60 Hz, um inter-harmônico pode ser um sinal – de tensão ou de corrente – com uma frequência de 12,6 Hz (60 Hz multiplicado por 0,21). É um campo vasto ainda a ser explorado por engenheiros e especialistas em qualidade de energia, uma vez que seus efeitos totais ainda são desconhecidos.

Os inter-harmônicos são causados por conversores da eletrônica de potência, notadamente os inversores e ciclo conversores. Alguns motores de indução também podem ser a fonte de inter-harmônicos, isso em virtude da distribuição dos seus enrolamentos. Dispositivos que trabalham com arcos elétricos também são fonte de inter-harmônicos – os mais conhecidos são os equipamentos de solda elétrica.

Alguns impactos negativos são parcialmente conhecidos, tais como os elencados a seguir:

- Variações rápidas da iluminação elétrica – conhecido como *flicker*;
- Problemas na excitação de turbo geradores;

- Sistemas com correntes contaminadas por inter-harmônicos também irão originar tensões com inter-harmônicos, espalhando¹ o problema para outros locais da instalação elétrica;
- Interferência em sinais de controle – notadamente em sistemas microprocessados;
- Ressonância paralela, causando perdas de equipamentos conectados ao sistema.

Como a análise de sinais contaminados por harmônicos é importante atualmente, serão apresentados a seguir conceitos importantes no entendimento dos componentes harmônicos.

10.12 Fator de potência

O fator de potência é importante em vários sistemas elétricos, desde a geração à ponta de carga². Foi visto no Capítulo 6 que o fator de potência de um circuito elétrico é a relação entre a potência ativa e a potência aparente. Se essa relação for unitária, significa que toda a potência fornecida é ativa, ou seja, efetivamente realiza um trabalho destinado a uma aplicação – iluminação, força motriz, compressão, etc. Quanto menor for o fator de potência, mais reativos estarão circulando no sistema de potência ou no circuito elétrico. Desse modo, o fator de potência é um indicativo de que uma instalação está trabalhando próxima ou não das características nominais dos equipamentos. O que causa um baixo fator de potência são cargas indutivas ou reativas, transformadores trabalhando a vazio ou máquinas elétricas acionando cargas muito abaixo da sua potência de ponta de eixo. O principal fator negativo num sistema com baixo fator de potência é o aumento do aquecimento dos condutores elétricos, perda da eficiência no sistema ou multas oriundas da cobrança dos reativos adicionais que a concessionária teve que fornecer.

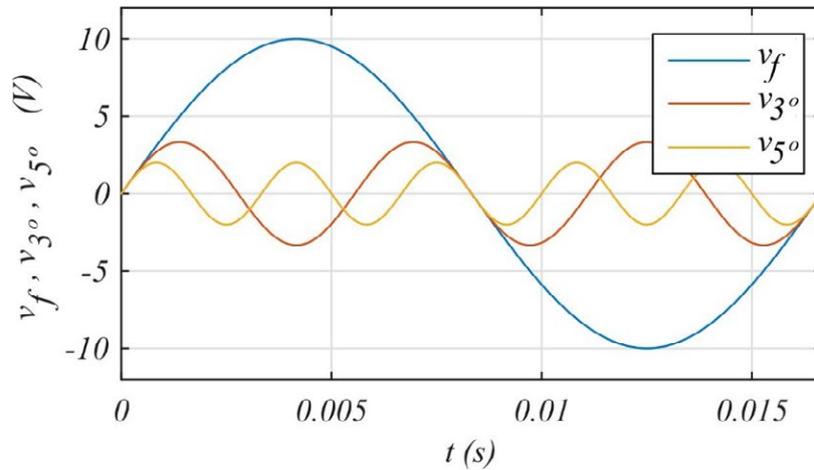
10.13 Componentes harmônicos – causas e efeitos

Os sinais de tensão e corrente senoidais explorados neste livro são formas de onda particulares dos sistemas elétricos, conforme definição no Capítulo 6, mas existem outras formas de onda com um aspecto que lembra as formas de onda senoidais – tais como as ondas quadradas, ondas triangulares e ou dente de serra – e que também estão presentes nos sistemas elétricos de potência nos dias de hoje em virtude dos vários equipamentos em uso na atualidade. Para começar a análise que se seguirá, a Figura 10.10 (a) (b) é de importância capital.

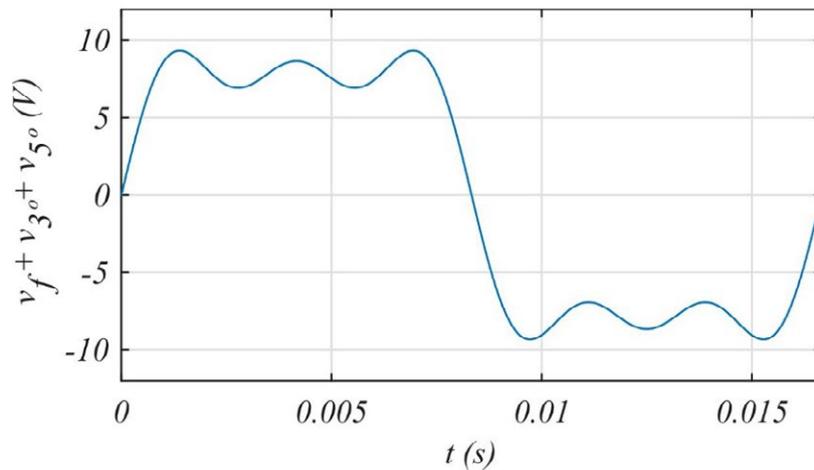
¹ A magnitude dessa difusão é determinada pela impedância do sistema próximo à fonte de inter-harmônico. Quanto maior for a impedância do sistema, menor será o impacto oriundo dos inter-harmônicos no sistema elétrico afetado.

² A ponta de carga é uma denominação dos sistemas de potência; tal ponta se refere às cargas instaladas após as subestações das concessionárias de distribuição – em resumo, são os consumidores comerciais e residenciais.

Figura 10.10 – Sinal de tensão fundamental. (a) tensão fundamental e seus componentes harmônicos separados, (b) sinal fundamental combinado (somado) com seus componentes harmônicos



(a)



(b)

Na Figura 10.10 (a) são mostrados um sinal de tensão, com frequência de 60 Hz, chamado de sinal fundamental ou v_f , e dois outros sinais de tensão. Um deles, chamado de v_{3° , possui uma frequência de 180 Hz, e o outro, chamado de v_{5° , possui uma frequência de 300 Hz. Veja que as frequências de v_{3° e v_{5° equivalem, respectivamente, a três e cinco vezes a frequência do sinal fundamental de 60 Hz. Na Figura 10.10 (b), um sinal com um aspecto distorcido é exibido; a priori, sua frequência é de 60 Hz, porém ele apresenta algumas deformações no seu perfil, tanto no semiciclo positivo quanto no semiciclo negativo. Os sinais v_{3° e v_{5° , cujas frequências são múltiplos do sinal fundamental em 60 Hz, são conhecidos como **componentes harmônicos**. A definição pode ser, portanto, elaborada:

Harmônicos são sinais com frequências múltiplas de uma frequência fundamental e que possuem a mesma forma do sinal fundamental.

Da definição acima e recorrendo-se novamente à Figura 10.10 (a), pode-se perceber que os sinais v_{3° e v_{5° são senoidais tanto quanto v_f ; a diferença é que suas amplitudes são menores e, claro, suas frequências são maiores quando comparadas com v_f . Nos sistemas elétricos, os componentes harmônicos somam-se ao componente fundamental; é por causa disso que ocorrem distorções como as observadas no sinal de tensão da Figura 10.10 (b), o qual é formado pela soma de v_f , v_{3° e v_{5° . Como existe uma soma, podemos definir um sinal senoidal de tensão ou corrente qualquer como na expressão (10.1).

$$x_{v,i} = A \operatorname{sen}(2\pi f_1 t) + \sum_{h=2}^{\infty} \frac{A}{h} \operatorname{sen}(2\pi f_h t) \quad (10.1)$$

Em que $x_{v,i(t)}$ é o componente fundamental do sinal senoidal (seja de tensão ou corrente, por isso a escolha da representação de $x_{v,i}$) e $\frac{A}{h} \operatorname{sen}(2\pi f_h t)$ são os componentes harmônicos do sinal fundamental. É importante reparar que os componentes harmônicos são sinais com frequências que começam do dobro em diante. Veja, por exemplo, a Tabela 10.1 abaixo, a qual enfatiza a componente fundamental de um sinal de 60 Hz e seus componentes harmônicos.

Tabela 10.1 – Sinal fundamental (60 Hz) e seus componentes harmônicos

	1°	3°	5°	7°	9°	11°	13°	15°	17°
f (Hz)	60	180	300	420	540	660	780	900	1020

Voltando para a Figura 10.10 (a), o sinal v_{3° é conhecido como terceiro componente e o sinal v_{5° é conhecido como quinto componente, justamente porque suas frequências são, respectivamente, três e cinco vezes a frequência de 60 Hz.

Uma vez que foi definido o que vêm a ser os harmônicos, convém entender como quantificar os harmônicos em um determinado circuito ou sistema. Por este motivo, será apresentado um critério de qualidade de energia chamado de **distorção harmônica total** – DHT (ou THD, do inglês *Total Harmonic Distortion*).

Analisar sinais com harmônicos é uma tarefa relativamente simples nos dias de hoje. Conforme mostrado no capítulo sobre medições, existem, basicamente, duas grandes famílias de instrumentos de medição – tanto para tensão quanto para corrente ou potência. O primeiro tipo é o RMS de média simples, o qual funciona supondo que os sinais a serem medidos são senoidais puros – ou seja, sinais com 60 Hz ou 50 Hz –, e o segundo é o RMS verdadeiro, que é o instrumento que calcula o valor RMS, levando em consideração cada componente harmônico existente (ou não) no sinal. Desta forma, um instrumento de medição RMS verdadeiro possui um sistema embarcado de aquisição de sinais, de forma a analisar o espectro contido no sinal medido e também calcular o valor RMS, segundo a expressão (10.2).

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N X_N^2}{N}} \quad (10.2)$$

A expressão (10.2) indica que o valor RMS verdadeiro, tal como processado pelos instrumentos RMS verdadeiros, mostra o sinal medido, eleva ao quadrado cada valor amostrado, em seguida soma os valores quadráticos amostrados e divide esses valores pelo número de amostras para, por fim, extrair a raiz quadrada desse resultado. É um processo relativamente simples e fácil de ser implementado nos dias atuais, em virtude de se poder utilizar microcontroladores versáteis e de baixo custo disponíveis no mercado.

Existe um indicador de qualidade de energia bastante utilizado para expressar com precisão quanto um determinado sinal está contaminado por harmônicos. Esse indicador é conhecido como **THD** (**total harmonic distortion** – ou distorção harmônica total) e é expresso por:

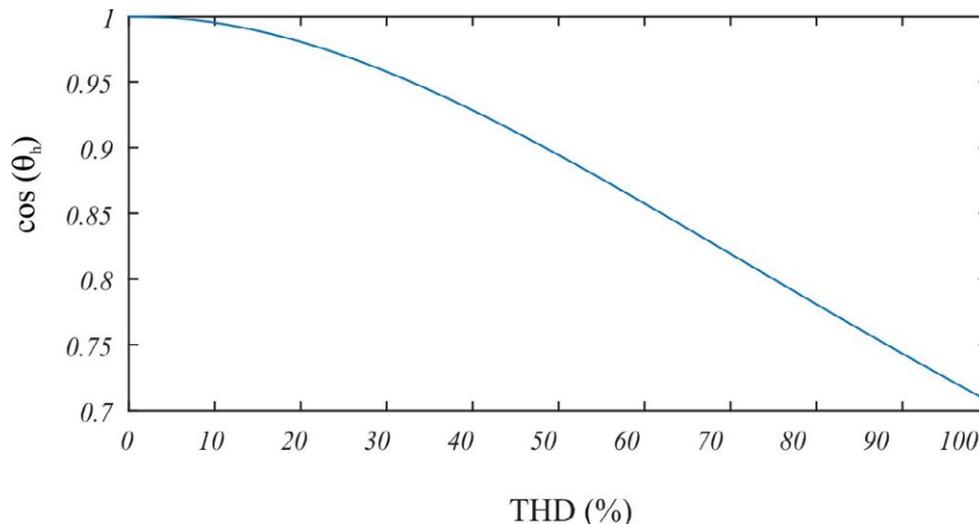
$$THD = \sqrt{\sum_{h=2}^n \left(\frac{x_h}{x_f}\right)^2} \quad (10.3)$$

A expressão (10.3) a THD x_f^2 indica a amplitude do componente fundamental (de tensão ou corrente) do sinal em análise e x_h^2 indica as diversas amplitudes dos componentes de harmônicos (também de tensão ou corrente), desde a ordem 2 até a ordem n – geralmente a ordem está limitada pelo grau de análise que é necessário para aquele sinal em especial. O sinal da distorção harmônica também interfere em outro aspecto da qualidade de energia elétrica: o fator de potência. Se for considerado um determinado fator de potência devido a uma situação sem harmônicos, com presença de harmônicos, entretanto, tal fator pode ser definido a partir da seguinte equação (10.4):

$$\cos(\theta_h) = \frac{\cos(\theta_f)}{\sqrt{1 + (THD)^2}} \quad (10.4)$$

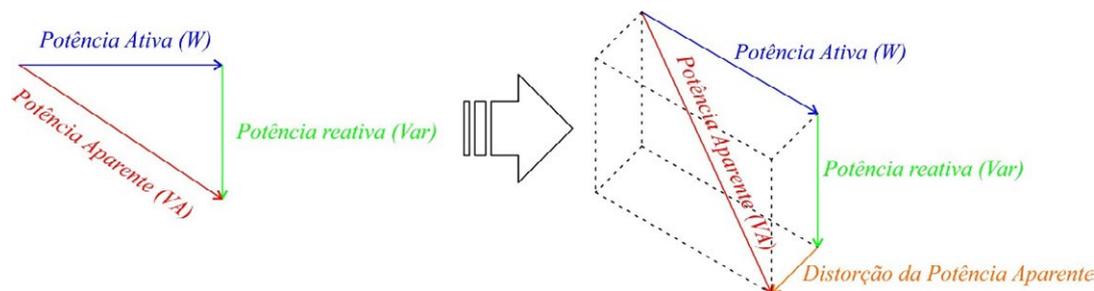
Você poderá perceber que a equação 10.4 indica que o fator de potência em uma instalação contaminada por harmônicos – $\cos(\theta_h)$ – é menor que a fundamental – $\cos(\theta_f)$ – quanto maior for a distorção de harmônicos do sinal. Para uma melhor compreensão do impacto da distorção harmônica sobre o fator de potência em uma instalação elétrica, ilustre-se, na Figura 10.11, o comportamento de uma instalação que, fundamentalmente, possui um fator de potência unitário, mas que, devido à distorção harmônica total crescente, tem esse valor gradativamente diminuído – atente para o detalhe de que $\cos(\theta_h)$ indica o fator de potência na presença de harmônico.

Figura 10.11 – Comportamento do fator de potência em função do crescimento da distorção harmônica total



O impacto negativo da distorção harmônica em uma instalação elétrica não é sentido tão somente no fator de potência. Ele se estende para as potências de uma instalação – é recomendável rever os conceitos de potências abordados no Capítulo 6 desta obra. Para uma melhor compreensão da discussão que se seguirá, a Figura 10.12 deve ser observada com atenção.

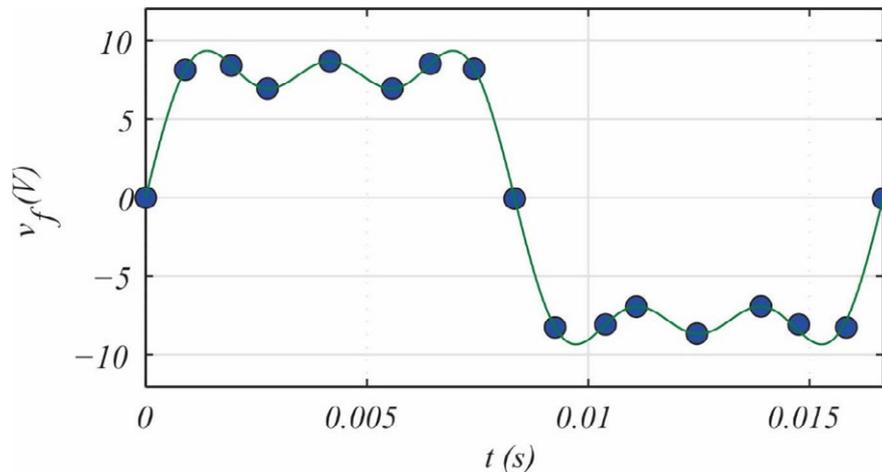
Figura 10.12 – O paralelepípedo de potências



As três potências em um circuito trifásico são usualmente relacionadas no triângulo de potências, conforme mostrado na Figura 10.12. Ocorre que, quando existem componentes harmônicos em um sistema elétrico – ou circuito elétrico –, a distorção harmônica provoca uma distorção de potência aparente, o que implica dizer que, numa instalação elétrica contaminada por harmônicos, a potência aparente total (VA) é aumentada devido ao aparecimento da **Distorção da Potência Aparente**. Quando a potência ativa (W), a potência reativa (Var) e a distorção de potência aparente são computadas, tem-se o paralelepípedo de potências, conforme apresentado na Figura 10.12.

Adentrando um pouco mais nas discussões sobre o cálculo expresso em (10.2), você deve recorrer à Figura 10.13 a seguir.

Figura 10.13 – Processo de amostragem do sinal distorcido para o cálculo do valor RMS de forma correta

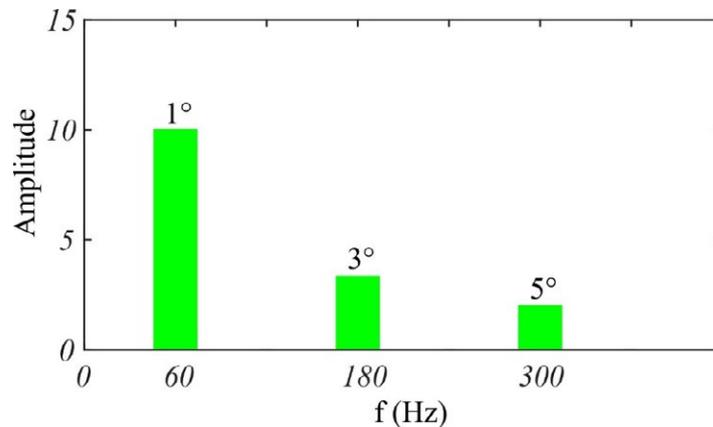


Cada um dos pontos em azul, na figura acima, são as amostras do sinal tomadas pelo instrumento de medição RMS verdadeiro. Esses pontos são utilizados para implementar a expressão 10.2, a fim de que o valor RMS verdadeiro seja calculado. Existem metodologias mais rebuscadas para se calcular o valor RMS verdadeiro em um sinal. Tais métodos utilizam equipamentos especialmente desenvolvidos para esta finalidade chamados de *qualímetros*³. Um qualímetro tem a possibilidade de efetuar algumas operações matemáticas especiais, tal como a *fft*⁴, para mostrar tanto o componente fundamental do sinal sob análise quanto seus sinais componentes harmônicos, de forma gráfica e bastante intuitiva. O sinal da Figura 10.10 (b), por exemplo, quando analisado por um qualímetro, produz um conjunto de gráfico de barras com a indicação do componente fundamental e dos seus harmônicos, tal como mostrado na Figura 10.12. Nessa figura podem ser facilmente identificados o sinal fundamental – neste caso o primeiro harmônico na frequência de 60 Hz – e seus harmônicos, ou seja, os sinais de 300 Hz (5º harmônico) e de 720 Hz (7º harmônico). Um gráfico como o da Figura 10.12 é conhecido como espectro harmônico e é exibido nos qualímetros quando o usuário está executando alguma análise de sinal.

³ Trata-se de um instrumento de medição da qualidade de energia elétrica, com um microprocessador embarcado, para a realização de diversas operações matemáticas nos sinais lidos de corrente e de tensão. Atualmente, eles ainda são pouco utilizados por possuírem valores que, no Brasil, ainda são elevados.

⁴ A FFT é uma expressão em inglês que significa *Fast Fourier Transform*. Nada mais é que um conjunto de operações matemáticas que individualizam o componente fundamental e seus harmônicos.

Figura 10.14 – Espectro do sinal presente na Figura 10.10 (b)



Ao utilizar um qualímetro em um sinal CA, como mostrado na Figura 10.15, que na verdade é uma onda quadrada, tem-se o resultado do espectro de harmônicos, exibido na Figura 10.14, imediatamente anterior.

Figura 10.15 – Um sinal CA de onda quadrada

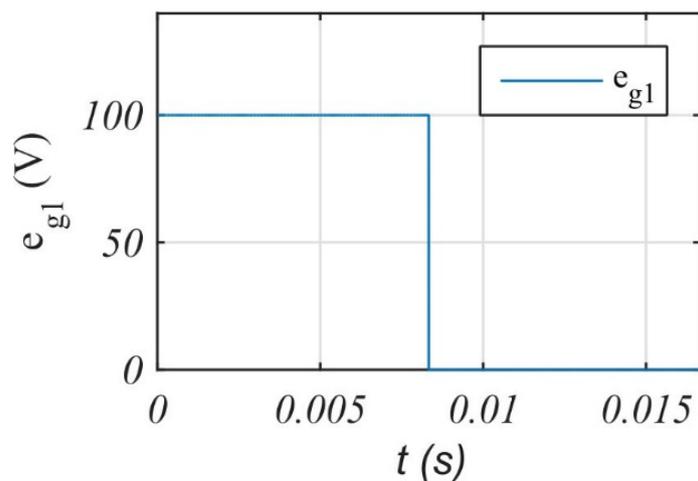
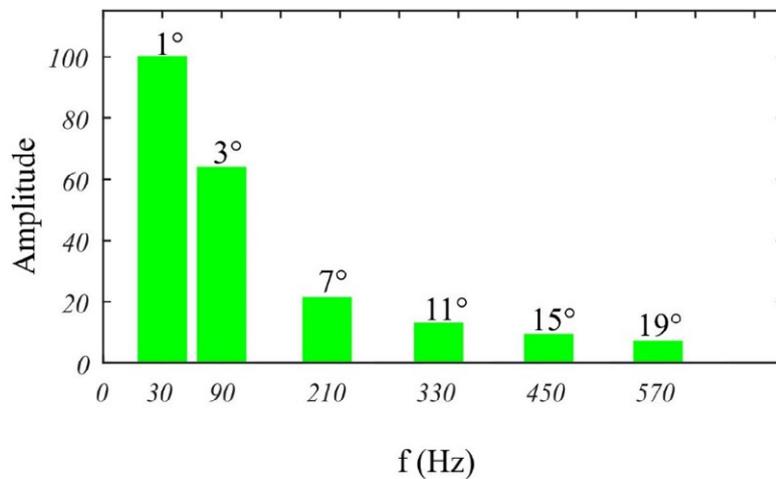
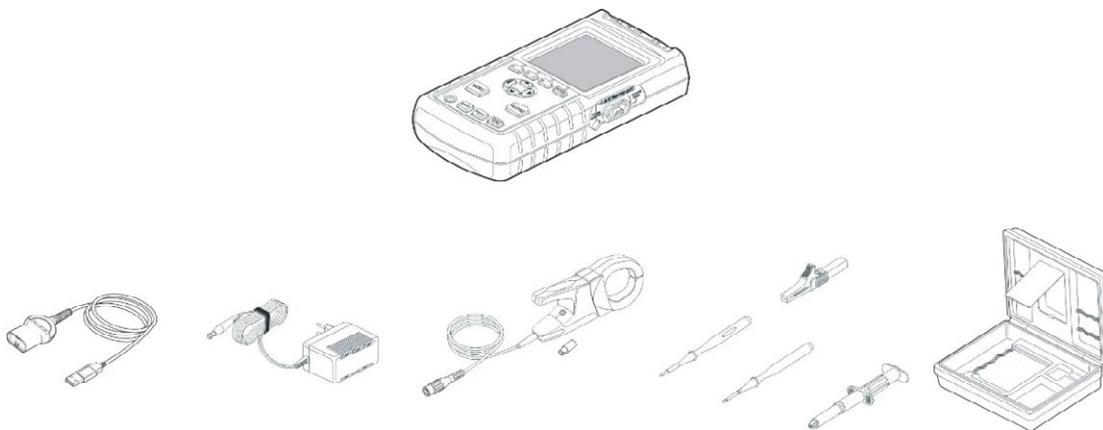


Figura 10.16 – Espectro de uma onda quadrada



É interessante perceber que o sinal de onda quadrada possui a fundamental (1º harmônico) em 30 Hz e os componentes harmônicos distribuídos em várias frequências, que vão desde o terceiro harmônico até o 19º harmônico. Quanto mais distante de um sinal senoidal puro, mais poluído por harmônicos é o sinal sob análise, conforme pode ser constatado na Figura 10.14. O aspecto geral de um qualímetro comercial é tal como mostrado na Figura 10.17.

Figura 10.17 – Qualímetro comercial e alguns acessórios



O qualímetro é um dispositivo de mão, bastante semelhante a um multímetro, porém com dimensões um pouco maiores. O instrumento possui alguns acessórios, como cabo de conexão com um PC – cabo USB –, uma fonte de alimentação separada, garras para medição de corrente, pontas de tensão e caixa acondicionadora para guardar o equipamento. Por ser um instrumento de mão, pode ser utilizado nos mais diversos ambientes industriais e ou comerciais. O próprio instrumento já possui um display LCD, para que o operador consiga visualizar os espectros do sinal – Figuras 10.12 e 10.14 –, além de outras características adicionais, tais como comportamento instantâneo – característica de osciloscópio, nesse caso – e a visualização dos fasores do sistema sob análise. Alguns qualímetros ainda dispõem para o usuário uma memória adicional, para que sejam feitas medições ininterruptas, por dias ou semanas, em uma determinada instalação. A conexão do qualímetro com a rede elétrica pode

ser feita de forma direta – desde que a isolamento do equipamento suporte os níveis de tensão e corrente do sistema a ser analisado – ou de forma indireta, através de transformadores de tensão. Existem mais funcionalidades e possibilidades de análise oferecidas na atualidade pelos qualímetros, porém cada uma delas está sujeita à especificação e produção do fabricante do equipamento.

Por força do preço e do acesso, existem equipamentos mais simples para a detecção de harmônicos – a quantificação gráfica e mais detalhada só com os qualímetros. Na Figura 10.18 são mostrados: (a) um multímetro RMS verdadeiro; (b) um alicate amperímetro baseado na média simples, e; (c) um alicate amperímetro RMS verdadeiro. Os instrumentos com a função de medição RMS verdadeiro apresentam uma identificação em seus painéis frontais, tal como mostrado pelas setas em vermelho nas Figuras 10.18 (a) e 10.18 (c). Se seu instrumento de medição não apresentar essa identificação frontal, significa dizer que ele não conseguirá medir efetivamente um sinal senoidal poluído com harmônicos. Devido ao rápido desenvolvimento da instrumentação, cada vez mais equipamentos destinados ao estudo da qualidade de energia são desenvolvidos no mercado.

Figura 10.18 – Instrumentos utilizados na medição: (a) multímetro RMS verdadeiro, (b) alicate amperímetro baseado na média, (c) alicate amperímetro RMS verdadeiro



10.14 Normas dedicadas à qualidade da energia

Existem normas relacionadas ao controle e limitação dos índices de qualidade de energia – notadamente THD e fator de potência –, que podem diferir ligeiramente de país para país, porém seguindo duas fortes padronizações internacionais. Essas normas foram implementadas para reduzir os impactos negativos relacionados às problemáticas da qualidade de energia e indicam um limite da amplitude dos componentes harmônicos de corrente e a máxima distorção que as concessionárias devem permitir em suas instalações. No Brasil, por

exemplo, no módulo 8 do PRODIST⁵ são estabelecidos os níveis máximos de distorção harmônica para os diversos valores nominais de tensão em um sistema de distribuição. Quanto ao fator de potência, no Brasil, a Resolução Normativa n° 414 da ANEEL estabelece um fator de potência mínimo de 0,92 – indutivo ou capacitivo – para unidades consumidoras conectadas em níveis de tensão inferiores a 230 kV.

Do ponto de vista internacional, a sociedade internacional de engenheiros eletricitas e eletrônicos **IEEE**⁶ disponibilizou a norma IEEE 519, a qual estabelece em detalhes quais são os principais problemas oriundos da qualidade de energia bem como os níveis máximos de distorção aceitáveis para corrente e tensão. É nessa norma que são baseadas as maiorias das normas sobre qualidade de energia utilizadas no mundo. Do ponto de vista de correntes elétricas e para médias e baixas potências (abaixo de 1 MW), a máxima distorção harmônica admissível para as correntes é de 5% e, para as tensões, de 3%. A norma IEEE 519 também preconiza que, quanto maior for o nível de tensão do sistema, menor deve ser o nível de distorção harmônica.

Outras normas importantes são as normas europeias (IEC 61000-3-2 e IEC 61000-3-4) que descrevem os limites de emissão de harmônicos em equipamentos com corrente menor que 16 A e maior que 16 A, respectivamente. O destaque dessas normas é a extrema praticidade. Trazem uma série de tabelas descrevendo a máxima corrente em cada harmônico para várias categorias de equipamentos. A partir dessas descrições, é conhecido o espectro máximo de corrente emitida que é permitido a um determinado equipamento.

10.15 Soluções dedicadas à qualidade de energia

Atualmente existe um grande esforço por parte dos pesquisadores e engenheiros da área na busca de soluções que garantam uma minimização adequada dos problemas oriundos da qualidade de energia elétrica nos diversos sistemas e instalações industriais, comerciais e residenciais. De forma ampla, essas soluções são agrupadas em duas grandes famílias, as quais são:

- Soluções com elementos discretos (circuitos passivos)
- Soluções a estado sólido (circuitos ativos).

Nas subseções seguintes, esta obra pretende abordar sucintamente cada uma delas.

⁵ AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**. Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica. Brasília: ANEEL, 2008.

⁶ Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE. Trata-se da maior sociedade internacional de profissionais do mundo. É composta não só de engenheiros, mas também de cientistas engajados no aprimoramento e desenvolvimento de soluções na área de engenharia elétrica.

10.15.1 Soluções com elementos discretos (circuitos passivos)

A solução com elementos discretos foi uma das primeiras desenvolvidas; consiste de indutores e ou capacitores apropriadamente associados e conectados com o sistema a ser compensado. Inicialmente os elementos discretos podem ser utilizados tanto para minimização de harmônicos quanto para a compensação de reativos. Ambas as soluções serão tratadas aqui e logo a seguir.

10.15.1.1 Bancos de capacitores para correção do fator de potência

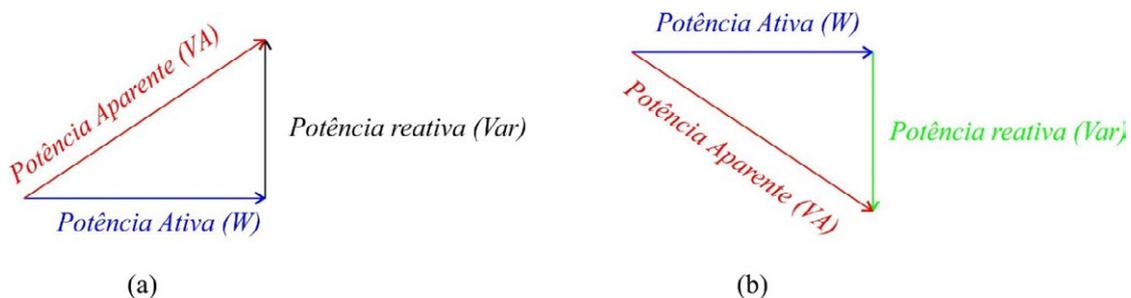
Em sistemas indutivos, os capacitores são utilizados para fornecer a quantidade de energia demandada por uma instalação – monofásica ou trifásica –, e sua atuação pode ser melhor entendida se recorrermos ao que foi discutido sobre potência complexa no Capítulo 6. Por questões de praticidade, essa discussão, porém, será brevemente revista aqui. Do ponto de vista de potência, em um sistema elétrico não contaminado por harmônicos, a potência complexa para sistemas indutivos e capacitivos pode ser caracterizada, respectivamente, por (10.5) e (10.6).

$$S = P + Q_j j \quad (10.5)$$

$$S = P - Q_c j \quad (10.6)$$

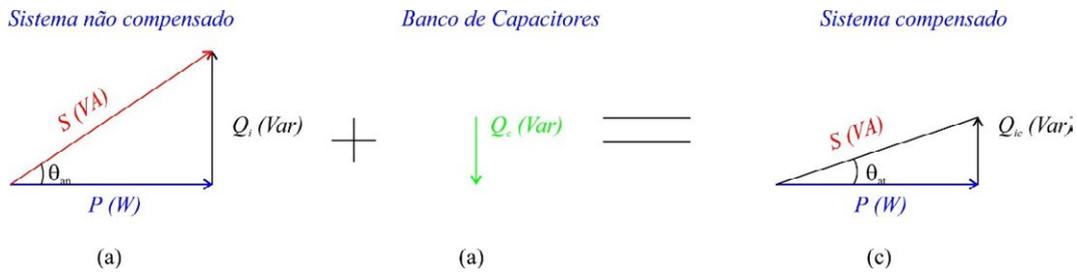
Já para um sistema indutivo e capacitivo, os triângulos de potências podem ser representados tal como na Figura 10.19.

Figura 10.19 – Triângulos de potência para sistemas indutivos (a) e capacitivos (b)



Ao observar as Figuras 10.19 (a) e (b) e correlacionar com as equações (10.5) e (10.6), o leitor poderá ser induzido a pensar que, ao adicionar capacitores a uma instalação elétrica, haverá um aumento do fator de potência – porque haverá uma diminuição da potência reativa líquida no circuito ou no sistema compensado. Adicionalmente, poderá recorrer a uma interpretação gráfica, tal como a exposta na Figura 10.20.

Figura 10.20 – Interpretação da correção do fator de potência utilizando capacitores



A Figura 10.20 indica que, quando um banco de capacitores é adicionado a uma instalação com características indutivas, ocorrerá uma diminuição da potência reativa total, vista pelo sistema no qual está instalado o referido banco. Como consequência, haverá uma redução do ângulo entre a potência aparente da instalação com o banco – em outras palavras, o fator de potência da instalação irá aumentar, desde que a potência ativa dessa mesma instalação seja conservada. Isto posto, vê-se que a potência complexa, após a adição de um banco de capacitores, é dada por (10.7), enquanto que o valor da potência reativa de compensação Q_c pode ser obtida de (10.8), ou seja:

$$S_n = P + (Q_i - Q_c)j \tag{10.7}$$

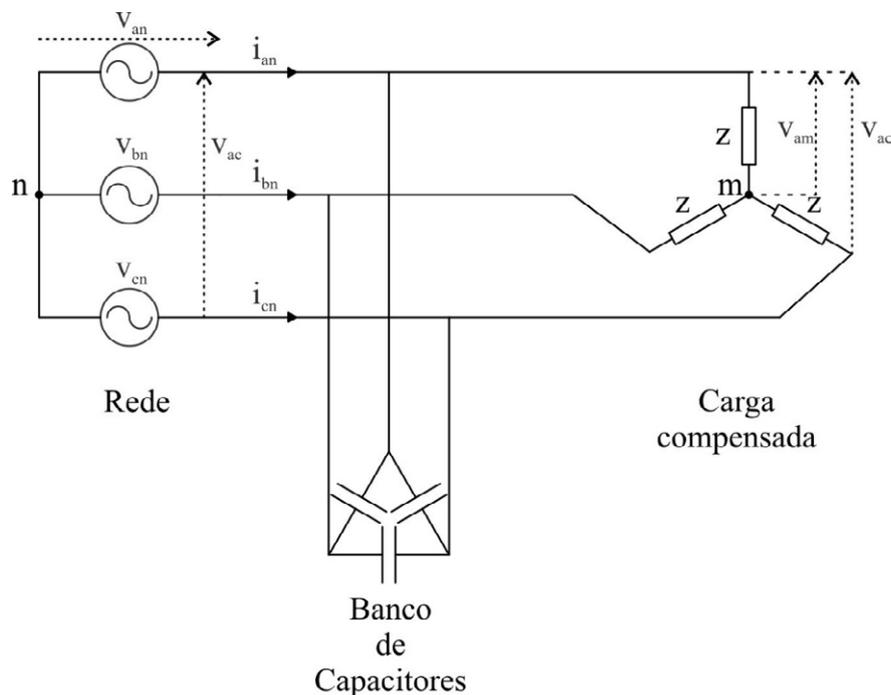
$$Q_c = \frac{Q[\tan(\theta_{an}) - \tan(\theta_{at})]}{\tan(\theta_{an})} \tag{10.8}$$

Na equação (10.8), θ_{an} é o ângulo do triângulo de potências, antes da inserção do banco; θ_{at} é o ângulo, após a inserção do banco de capacitores, ou seja, é o ângulo pretendido do triângulo de potências, após a inserção do banco. Em resumo, a equação (10.8) pode ser utilizada para o dimensionamento do banco de capacitores, uma vez que, para um sistema monofásico, ou para apenas uma das fases de um sistema trifásico e considerando a tensão fasorial nominal do sistema como sendo igual a V_n , é possível estabelecer que a capacitância do banco pode ser calculada por (10.9).

$$C_b = \frac{Q_c}{2\pi f} V_n^2 \tag{10.9}$$

Pode-se concluir, portanto, que os bancos de capacitores, quando utilizados para compensação de fator de potência, são instalados em paralelo com o sistema. Em caso de um banco trifásico, a conexão do banco do banco geralmente é em Δ , conforme exposto na Figura 10.21.

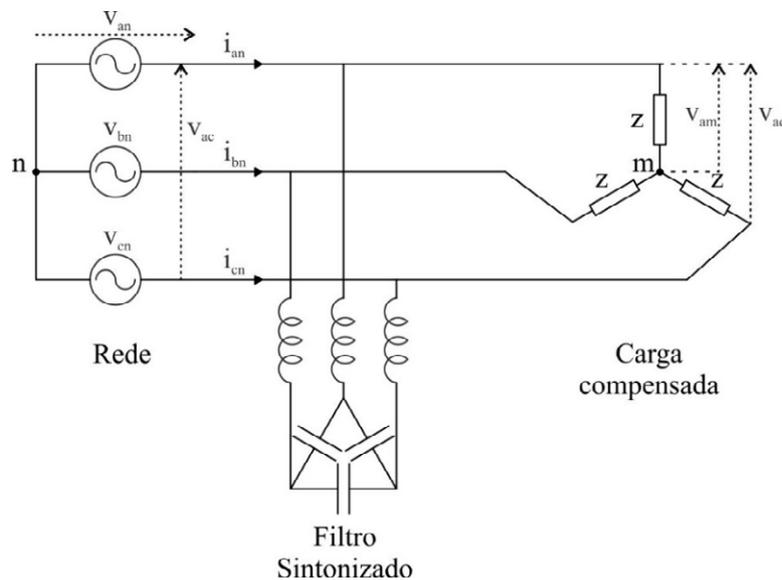
Figura 10.21 – Instalação de um banco de capacitores em um sistema trifásico (correção de fator de potência)



10.15.1.2 Instalação de reatores de dissintonia e filtros sintonizados

Quando os capacitores e indutores são associados em paralelo de uma maneira planejada, todos podem servir como caminhos de baixa impedância para componentes harmônicos presentes no sistema elétrico. Por este motivo, a associação de indutores e capacitores em série e ou paralelo é utilizada para a correção passiva da distorção harmônica provocada por cargas instaladas no sistema. Existem alguns problemas associados à ressonância oriunda da instalação de bancos de capacitores, mas que são eliminados por esse tipo de solução. Na Figura 10.22, mostra-se um filtro passivo LC sintonizado.

Figura 10.22 – Instalação de um filtro LC passivo sintonizado, utilizado para diminuição do conteúdo harmônico, em um sistema de potência



Tanto os bancos de capacitores quanto os filtros sintonizados são soluções que garantem bons resultados para as cargas e para a situação no momento do projeto. Com o tempo, notadamente em instalações dinâmicas, tanto o banco quanto o filtro passivo sintonizado começam a perder sua eficiência de compensação, uma vez que não são capazes de variar dinamicamente suas características de compensação em função das mudanças de carga.

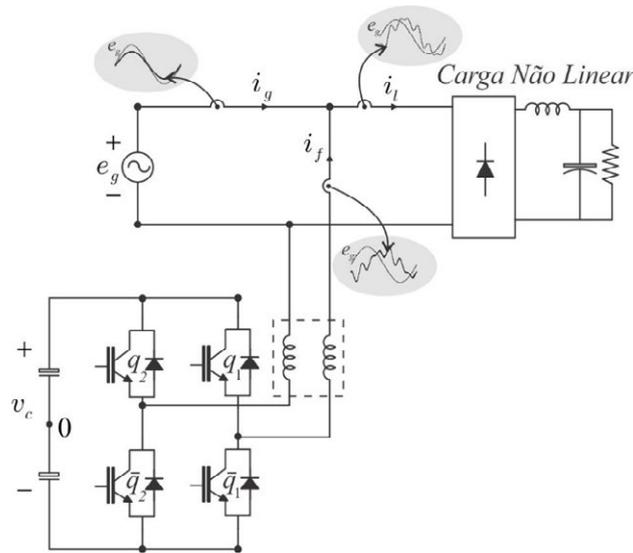
10.15.2 Soluções a estado sólido (circuitos ativos)

Com o desenvolvimento da eletrônica de potência, foi possível o desenvolvimento de conversores de potência com a capacidade de compensar o fator de potência de instalações e também eliminar harmônicos – de tensão ou de corrente. Na atualidade, essa solução vem se popularizando em virtude da diminuição do custo associado aos elementos ativos – no caso, as chaves de potência – que são partes essenciais dos conversores destinados a este fim.

10.15.2.1 Filtros ativos de potência em paralelo

Uma vez que a compensação de harmônicos de corrente num sistema elétrico implica a diminuição dos harmônicos de tensão, em geral os *filtros ativos em paralelo* são utilizados com mais frequência. Um filtro ativo de potência em paralelo é mostrado na Figura 10.23 a seguir.

Figura 10.23 – Filtro ativo de potência em paralelo para um sistema monofásico

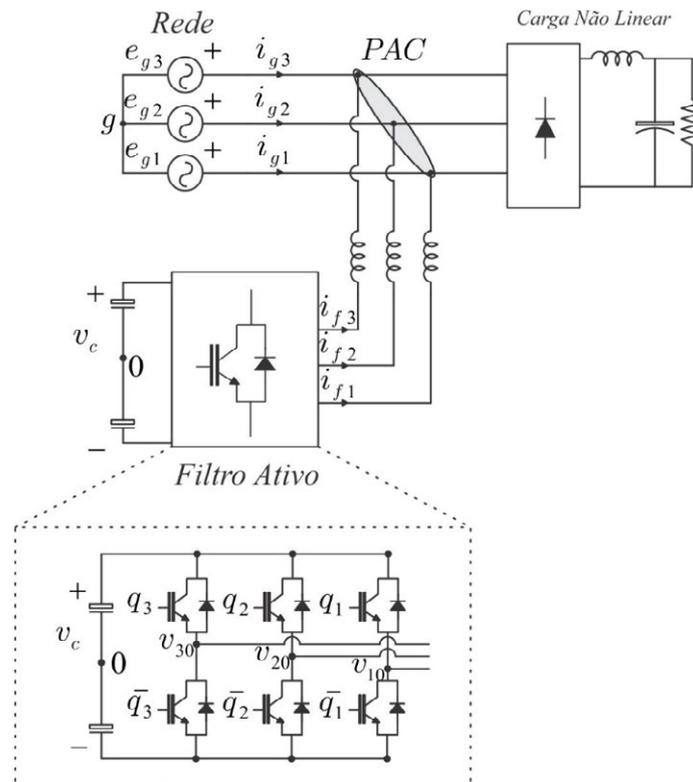


Dependendo do projeto, os filtros ativos de potência em paralelo podem compensar tanto harmônicos quanto reativos. Por questões de custo e diminuição dos componentes passivos – capacitores e filtros indutivos –, um filtro ativo paralelo pode ser projetado só para eliminação de harmônicos. Levando em consideração a compensação de reativos e de harmônicos, na Figura 10.23 a atuação do filtro ativo em paralelo é exibida em linhas gerais. A carga não linear demanda uma corrente que é poluída por conteúdo harmônico e não está em fase com a tensão da rede e_g – neste caso está demandando potência reativa. O filtro ativo de potência em paralelo injeta, no sistema, uma corrente i_f , para eliminar os harmônicos e fornecer a parcela de potência reativa demandada pela carga não linear. Para a rede elétrica, cabe, então, fornecer somente uma corrente i_g em fase com a sua tensão e_g ; dito de outro modo, a corrente da rede é puramente senoidal, e o seu fator de potência é unitário. Deve ser observado que o filtro ativo em questão é constituído por chaves de potência – no caso da Figura 10.23 por quatro chaves, em virtude de o sistema a ser compensado ser monofásico – e por elementos passivos, representados pelos indutores entre o conversor e a rede, assim como por capacitores – que na Figura 10.23 estão submetidos a uma tensão v_c .

Os capacitores dos filtros ativos constituem os chamados *barramentos ou links CC*. Para um sistema trifásico, existe um conversor similar ao monofásico, conforme mostrado na Figura 10.24. O funcionamento é basicamente o mesmo; a diferença reside na quantidade de componentes no conversor de filtro – reparar que são, agora, seis chaves de potência – assim como no de componentes passivos – neste caso são seis indutores de filtro. O ponto de conexão do filtro com a rede e a carga é chamado de Ponto de Acoplamento Comum – PAC. Uma vez conectado ao PAC, o filtro ativo de potência tem a capacidade de, via sensores de tensão e corrente e um sistema microprocessador, observar dinamicamente o comportamento da corrente da rede para que intervenções dinâmicas de compensação tomem lugar. Caso o filtro ativo detecte que não há necessidade de compensação, este pode ser desligado e entrar no modo *stand-by* – aguardando o momento da compensação. Do ponto de vista de eficiência da compensação, sua limitação está relacionada com as estratégias de controle, associadas ao

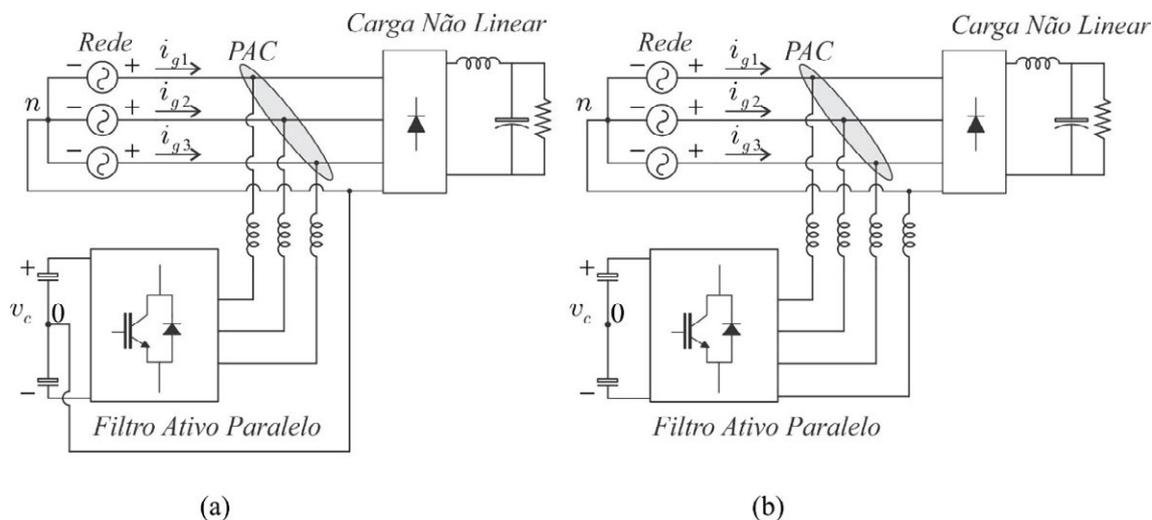
filtro, e com as características de projeto desse filtro; entretanto, diferentemente das soluções que empregam somente capacitores e indutores, os filtros ativos em paralelo possuem a capacidade da compensação dinâmica tanto de reativos quanto de componentes harmônicos, o que torna essa solução bastante interessante na atualidade.

Figura 10.24 – Filtro ativo de potência em paralelo para sistemas trifásicos



Como os sistemas trifásicos podem ser a três fios – sistemas sem acesso ao neutro – ou a quatro fios – sistemas com acesso ao neutro –, existem basicamente dois tipos de filtros ativos em paralelo: os filtros ativos a três e a quatro fios. Um filtro ativo trifásico para sistemas a três fios já foi exibido na Figura 10.24; já, para sistemas a quatro fios, existem duas possibilidades, conforme exibido nas Figuras 10.25 (a) e 10.25 (b) a seguir.

Figura 10.25 – Filtros ativos em paralelo para sistemas a quatro fios. (a) Filtro ativo com seis chaves, com conexão ao neutro no ponto central do barramento. (b) Filtro ativo com oito chaves, sem acesso ao ponto central do barramento



REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**. Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica. Brasília: ANEEL, 2008.

ELLIS, Robert G. **Power System Harmonics: a reference guide to causes, effects and corrective measures**. Technical Paper. Cambridge, Canada: Allen-Bradley, 2001.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **Norma IEC 61000-3-2**. Electromagnetic compatibility (EMC) – Limits for harmonic current emissions. IEC, Geneva, 2018.

MACIEL, Alvaro M.; DIAS, José Artur A. Introdução aos filtros ativos de potência em paralelos. In: COSTA JÚNIOR, Ademar G.; MENEZES FILHO, José B. (Orgs.). **Estudos e aplicações em sistemas de controle, telecomunicações, acionamentos e sistemas elétricos: enfoques com inovações tecnológicas**. João Pessoa: Editora IFPB, 2016. p. 151-169.

SHAH, Kikunj. **Harmonics in power systems: Causes, effects and control**. Technical Paper. Alpharetta, GA, USA: Siemens, 2013.

SOCIEDADE Brasileira de Qualidade de Energia Elétrica. Disponível em: <<http://www.sbqee.org.br/sbqee/pagina-inicial>>. Acesso em: out. 2018.

THE INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems**. Norma STD 519. Nova York: IEEE Power Energy Society, 2014.

11 Aplicações em corrente contínua

Neste capítulo serão mostradas, de forma introdutória, duas aplicações da eletricidade contínua, em dois campos diferentes. A primeira mostra como a eletricidade se integra à mecânica na operação eficiente dos veículos automotores. A segunda mostra como a eletricidade pode contribuir para proteger o patrimônio das pessoas, a partir da gerência de sistemas de alarmes. Dois campos diversos em que a eletricidade está presente. Tais aplicações, apesar de serem estudos introdutórios, mostrarão a você, leitor, duas áreas de atuação em que os futuros técnicos poderão se aprofundar, a fim de prestarem serviços em instalação e manutenção desses sistemas.

11.1 Introdução ao circuito elétrico automotivo

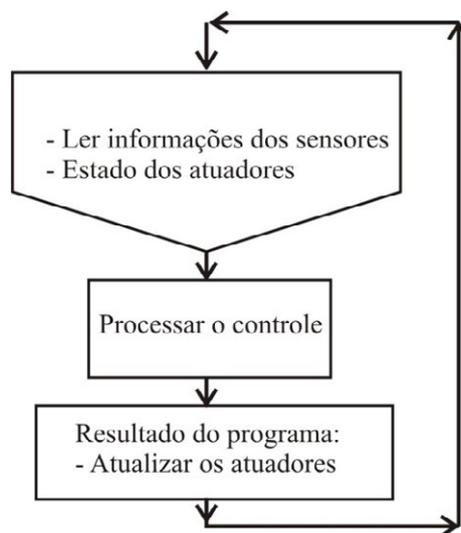
No decorrer do livro, foram estudados os circuitos de corrente contínua ou alternada. Um dos exemplos mais importantes da aplicação dos circuitos elétricos são veículos automotores, presentes no nosso cotidiano e que nos fazem perceber que a teoria desenvolvida ao longo do livro está muito próxima de todos nós, mesmo que de forma imperceptível. Para se ter noção da presença da eletricidade nos veículos atuais, é comum encontrar mais de 1 km de condutores dentro desses veículos conectando lâmpadas, chaves, sensores e atuadores.

Esta seção apresenta uma introdução a esses circuitos, utilizando-se alguns sistemas que compõem os veículos automotivos. Esses sistemas são destinados a controlar algum parâmetro do veículo, como temperatura do bloco do motor, composição da mistura de combustível e oxigênio, quantidade de gases liberados, entre outros elementos. Por isto, esses sistemas são genericamente conhecidos como sistemas de controle. Tais sistemas de controle estão presentes nos processos produtivos, no condicionador de ar residencial, na geladeira, no forno residencial e em muitos outros exemplos do nosso dia a dia. Em grande parte dos veículos, o sistema de controle é digital, ou seja, é baseado em processamento digital (num computador dedicado). Os sistemas de controle digitais são fisicamente compostos de uma central de processamento (computador dedicado àquele controle), sensores (transdutores) e atuadores. Vejamos algo mais sobre esses sistemas.

- **Central de processamento:** É na realidade um computador que executa um programa pré-estabelecido. É o cérebro do sistema. Sua tarefa é ler as informações dos sensores, o estado dos atuadores e executar o programa de controle baseado nessas informações lidas. O resultado são decisões de atualização dos atuadores instante a instante. É um programa executado continuamente, como mostrado na Figura 11.1. É o computador que decide a atualização dos atuadores. Às vezes, o controle é tão simples que não exige uma central de processamento (por exemplo, um controle liga-desliga da maioria dos ferros de passar). Neste caso, o termostato liga o circuito, quando a temperatura do ferro baixa além da temperatura mínima, e desliga, quando a temperatura do ferro sobe além da temperatura máxima, criando, assim, um ciclo que vai da temperatura mínima até a máxima, ficando por sua vez em torno de uma média. Tal comportamento já foi abordado no Capítulo 8.

- **Sensores:** São componentes destinados a ler certas grandezas e transformá-las em sinais elétricos. Podemos ter, como exemplo, um termistor NTC, também já mostrado no Capítulo 2, que possui sua resistência que varia negativamente com a temperatura. Sensores indutivos (detectam a presença de metais) e sensores capacitivos (detectam a presença de isolantes) são exemplos muito presentes nos processos produtivos.
- **Atuadores:** Atuam diretamente na grandeza a controlar. Alguns exemplos: uma resistência elétrica (gera calor e aumenta temperatura), um ventilador (reduz a temperatura), uma válvula de solenoides para controle de fluxo de líquidos (mostrada no Capítulo 3).

Figura 11.1 – Sistema de controle executado pelo computador dedicado



Os principais sistemas de controle automotivo são: **Sistema de iluminação, sistema de partida, sistema de ignição e injeção, sistema de arrefecimento do motor e sistema de geração.**

Será abordado, de forma introdutória, cada um deles e a participação dos circuitos elétricos nesses sistemas.

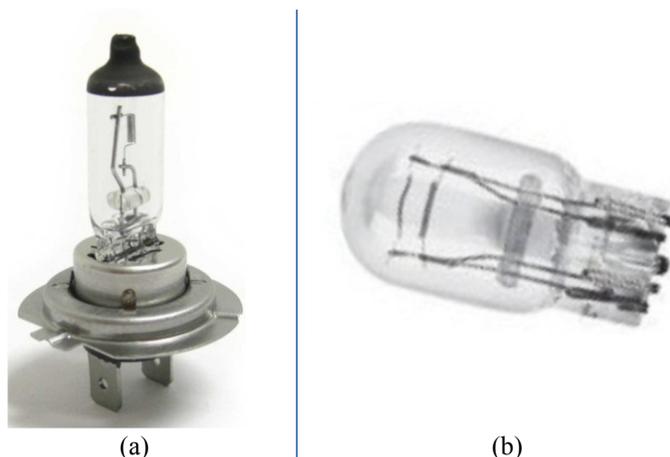
11.1.1 Sistema de iluminação

O sistema de iluminação dos veículos automotores é composto por mais de 30 lâmpadas, dependendo muito da marca e tipo do veículo. A maioria dessas lâmpadas é do tipo halógena; no entanto, a lâmpada a LED vem ganhando cada vez mais espaço, motivado pelo baixo consumo e principalmente pela vida útil física muito maior que a halógena.

As lâmpadas halógenas são lâmpadas a filamento de tungstênio, como as antigas lâmpadas incandescentes residenciais. A diferença entre as duas é o interior do bulbo. As lâmpadas halógenas possuem gás halógeno Iodo ou Bromo no seu interior, por isto, possuem

vida útil física maior que as lâmpadas incandescentes, além de terem a capacidade de operar numa temperatura mais alta. A lâmpada H7, vista na Figura 11.2 (a), de 55 W e 12 V é muito popular nos faróis baixos dos veículos, e a lâmpada 5 W, vista na Figura 11.2 (b), é utilizada nos porta-luvas e porta-malas.

Figura 11.2 – (a) Lâmpada H7 55 W / 12 V; (b) Lâmpada 5 W / 12 V



A lâmpada a vapor, de xenônio, que produz uma luz azulada, possui uma eficiência maior que as halógenas. A Resolução 384 de 2011 do CONTRAN (Conselho Nacional de Trânsito) proíbe, no entanto, no Brasil, a instalação de lâmpadas de descarga em faróis. Segundo a Resolução, tal lâmpada ofusca os condutores e pode contribuir para acidentes graves. No Capítulo 8 – Introdução às cargas elétricas domésticas, vimos mais detalhes sobre o princípio de funcionamento das lâmpadas elétricas.

O acionamento das lâmpadas elétricas nos veículos automotores varia de acordo com a potência da lâmpada. Lâmpadas de baixa potência, como as lâmpadas dos porta-malas e porta-luvas, são acionadas diretamente – representadas na Figura 11.3. Já as lâmpadas de maior potência são acionadas indiretamente, a partir de relés eletromagnéticos – representadas na Figura 11.4. A função dos relés é acionar uma carga de corrente elétrica alta, a partir de uma corrente baixa. Como a corrente que liga a bobina é baixa, é necessária uma chave que suporte baixa corrente. Lembre-se de que os contatos físicos das chaves elétricas possuem resistências elétricas e que, quanto maior a corrente nesta resistência, maior o aquecimento na chave, conseqüentemente menor sua vida útil física. Assim, há uma vantagem grande em se utilizar relés para acionar cargas de alta corrente.

Figura 11.3 – Lâmpadas acionadas diretamente

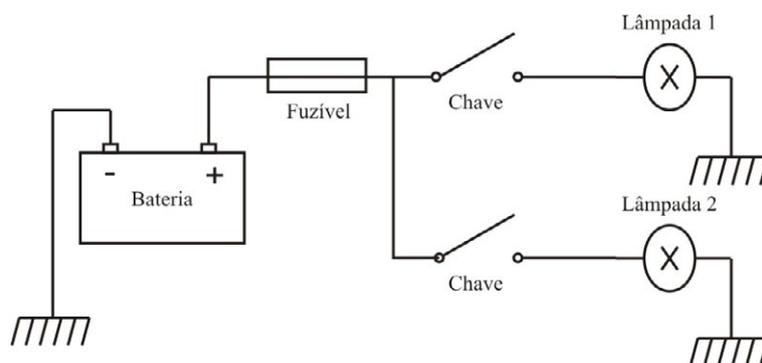
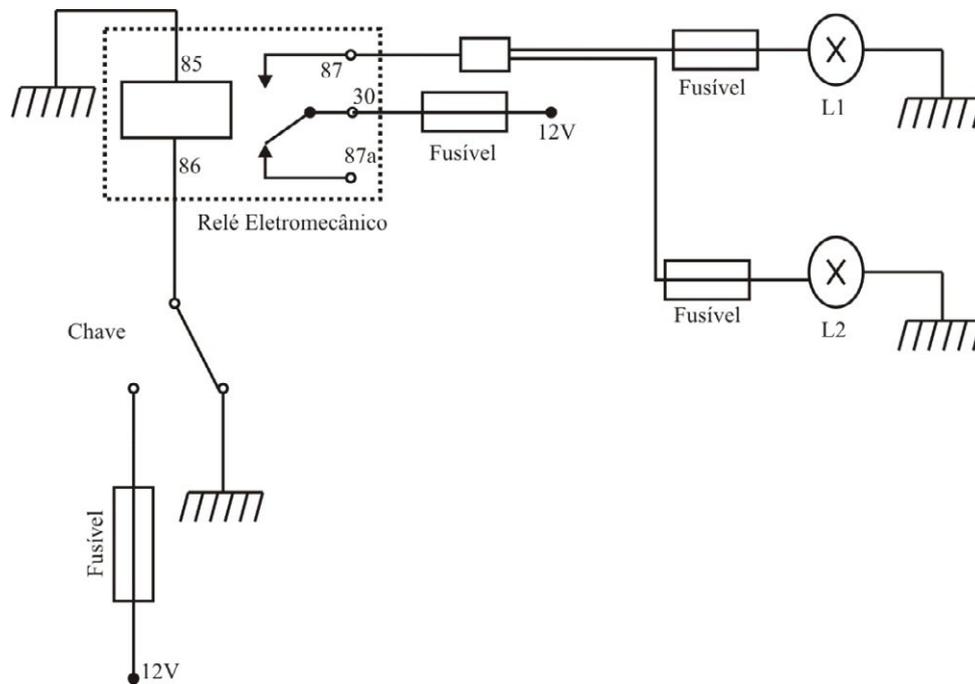


Figura 11.4 – Lâmpadas acionadas indiretamente, por relé



Um exemplo típico de luz acionada diretamente (sem presença de relé) é o sistema de sinalização do freio (Figura 11.5). O comando da ignição habilita o interruptor do pedal de freio que é uma chave situada no próprio pedal. Observe a presença do fusível geral que protege o sistema de problemas nas instalações gerais e o fusível local que protege o sistema de problemas localizados nos condutores e receptáculos das lâmpadas. O fusível local possui uma corrente nominal menor que o geral. O objetivo da proteção em cascata é isolar o problema numa região do circuito a menor possível, evitando que todo o sistema entre em colapso devido a uma falha.

Na Figura 11.6, é mostrado o acionamento das luzes do farol alto. Na maioria das vezes, são lâmpadas halógenas com potência por volta de 50 W. Tal potência produz uma corrente de mais de 5 A, para as duas lâmpadas de 10 A – corrente muito alta para ser acionada diretamente por uma chave simples. Desta forma, é necessária a presença de relés eletromecânicos. A chave de ligação das luzes habilita a chave de ligação dos faróis. A chave de lampejo funciona independentemente da ligação das luzes. O relé é acionado pelos dois caminhos, pelas chaves dos faróis altos e pela chave de lampejo. Nessa mesma figura, há também a presença de um potenciômetro para regular o nível de iluminação do painel. Potenciômetros são componentes que permitem ao usuário variar a resistência elétrica a partir de um seletor. Neste caso, quando se aumenta a resistência, diminui-se a corrente para a lâmpada, diminuindo-se, conseqüentemente, seu brilho. Em sentido inverso, quando se diminui a resistência, aumenta-se a corrente, aumentando seu brilho. Potenciômetros foram abordados com mais detalhes no Capítulo 2.

Figura 11.5 – Sistema de sinalização de freio

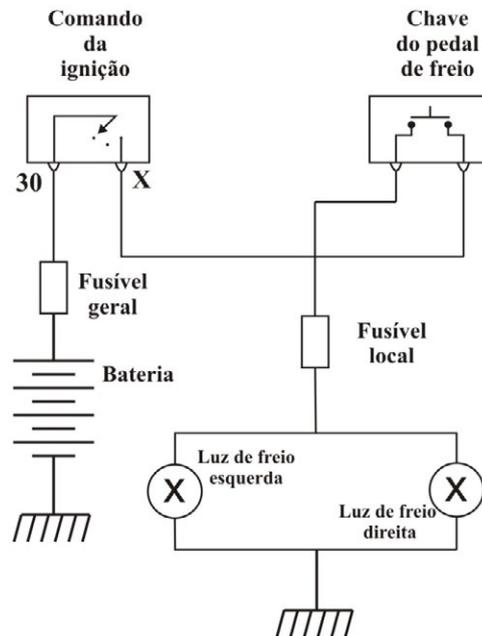
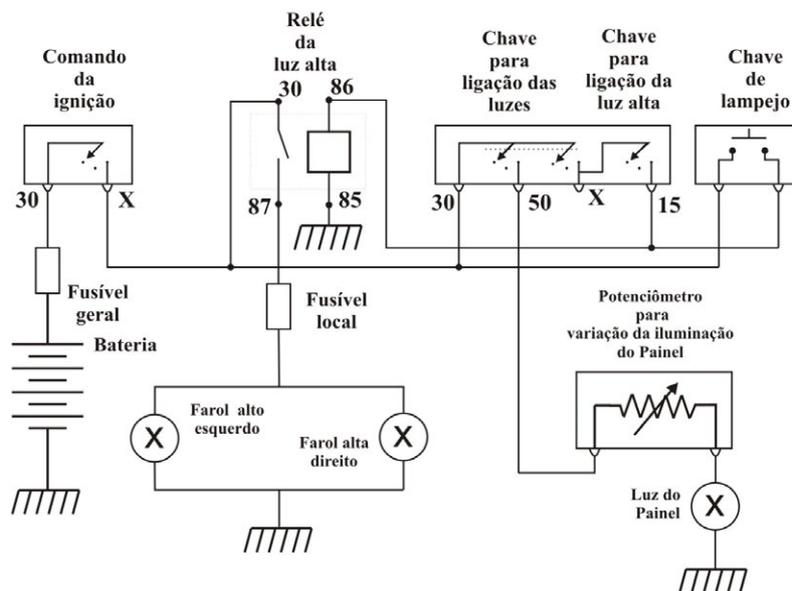
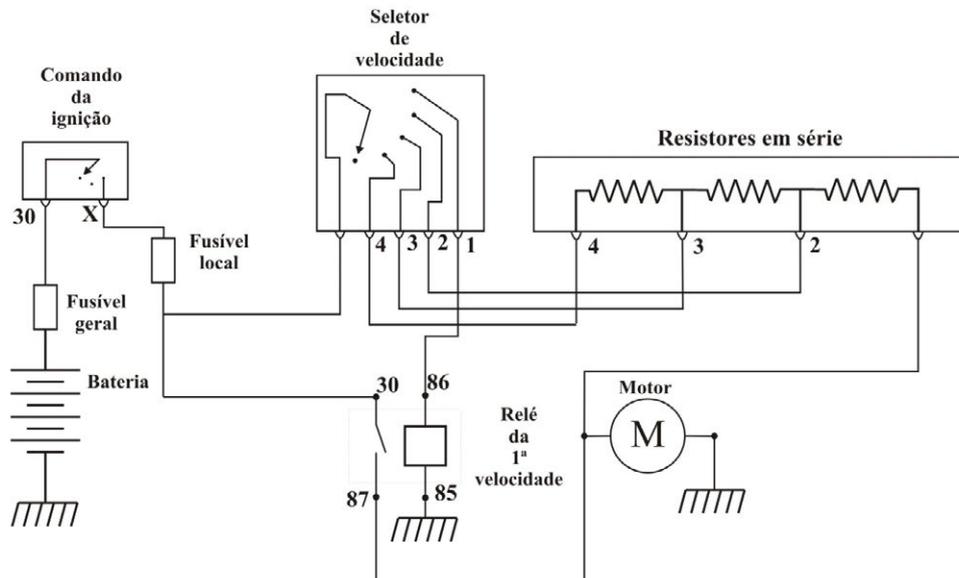


Figura 11.6 – Sistema de iluminação do farol alto e iluminação do painel



Na Figura 11.7, abaixo, é mostrado o sistema de acionamento da ventilação interna do veículo. Observe que o seletor de velocidade possui 4 posições. A posição 1 corresponde ao acionamento sem limitação de corrente (sem resistores), por isto a presença de um relé eletromecânico. As posições 2, 3 e 4 correspondem à inserção de 1, 2 e 3 resistores. Quanto mais resistores, mais limitação de corrente, conseqüentemente menor a velocidade de motor do ventilador. É um caso típico de resistências em série, ou divisor de tensão, assunto estudado no Capítulo 5.

Figura 11.7 – Sistema de acionamento da ventilação interna

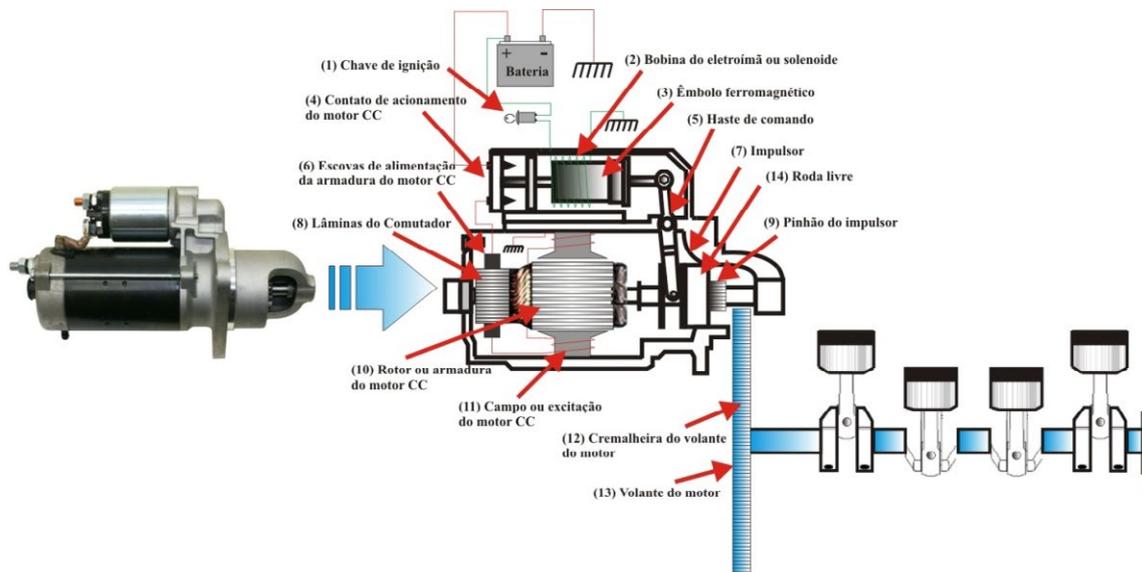


11.1.2 Sistema de partida do veículo

O procedimento de partida do motor a combustão é um dos exemplos mais importantes da integração das ciências da eletricidade, magnetismo e mecânica. Na Figura 11.8 vemos a planta simplificada do sistema de partida do motor a combustão dos veículos automotores. O elemento principal desse sistema é o motor de partida – um motor de corrente contínua excitado em série. Este componente provê o movimento inicial para o motor a combustão.

Tudo começa na mão do condutor, na chave de ignição (1). A chave de ignição liga o relé (não mostrado na figura) que, por sua vez, liga a bobina solenoide (2). A bobina solenoide atrai o êmbolo (3), como um eletroímã. O êmbolo fecha o contato de acionamento do motor CC (4), além de mover a haste de comando (5). A haste de comando empurra o impulsor (7), para engatar o pinhão do impulsor (9) na cremalheira do volante do motor (12). A esta altura, tanto a armadura do motor elétrico quanto o campo de excitação estão ligados, e o motor gira, girando, conseqüentemente, o volante do motor. O processo de ignição nos cilindros se efetua, e o volante do motor passa a girar pela ação do motor a combustão. Entra em cena a roda livre (14). Roda livre é um dispositivo atrelado ao impulsor que permite o engate do pinhão na cremalheira, mas somente se houver conjugado mecânico neste engate. Quando o motor a combustão partir, haverá um instante em que o pinhão e a cremalheira estarão na mesma velocidade, sem conjugado. Neste instante, o pinhão é puxado de volta à posição inicial. Se a roda livre não atuasse, o motor elétrico seria uma carga para o motor mecânico, podendo vir a danificar o motor de partida. Tudo isso acontece em pouco mais de um segundo, num simples virar de chave.

Figura 11.8 – Planta simplificada do sistema de partida dos veículos automotores



11.1.3 Sistema de controle da injeção e ignição

Os sistemas de controle da ignição são os que operam de forma integrada, logo o estudo dos dois sistemas pode ser efetuado ao mesmo tempo. Na Figura 11.9, vê-se a planta simplificada do sistema de injeção bem como de um cilindro onde acontece a explosão que transforma a energia química do combustível em energia mecânica para movimentação do veículo. Para haver explosão, é necessário pulverizar o combustível e misturá-lo ao oxigênio que vem do ar que é admitido. Essa mistura entre combustível e ar é fundamental para uma boa combustão e, conseqüentemente, para a eficiência do veículo. Essa mistura se faz pelo controle a partir de dois atuadores: o bico de injeção eletrônico, cujo funcionamento já foi mostrado no capítulo relativo a magnetismo, e da borboleta de admissão do ar. O instante certo e o tempo de atuação desses dois atuadores são definidos pela ECU (*Engine Control Unit*) baseado num programa (software) pré-estabelecido. Vários sensores prestam informações à ECU para controle dos atuadores. Alguns deles, vistos na Figura 11.9, são:

- Sensor de temperatura do cilindro;
- Sensor de fase (posicionamento dos pistões nos cilindros);
- Sensor de massa de ar (*Mass Air Flow*) – MAF: Este sensor mede a massa do ar, que pode variar dependendo da temperatura e pressão ambiente. Para se ter uma mistura eficiente, é necessária informação sobre a massa do ar;
- Sensor de temperatura do ar (*Intake Air Temperature*) – IAT: Normalmente integrado ao corpo do MAF;
- Sensor de posição da borboleta;
- Sensor de oxigênio proveniente da queima (sonda lambda).

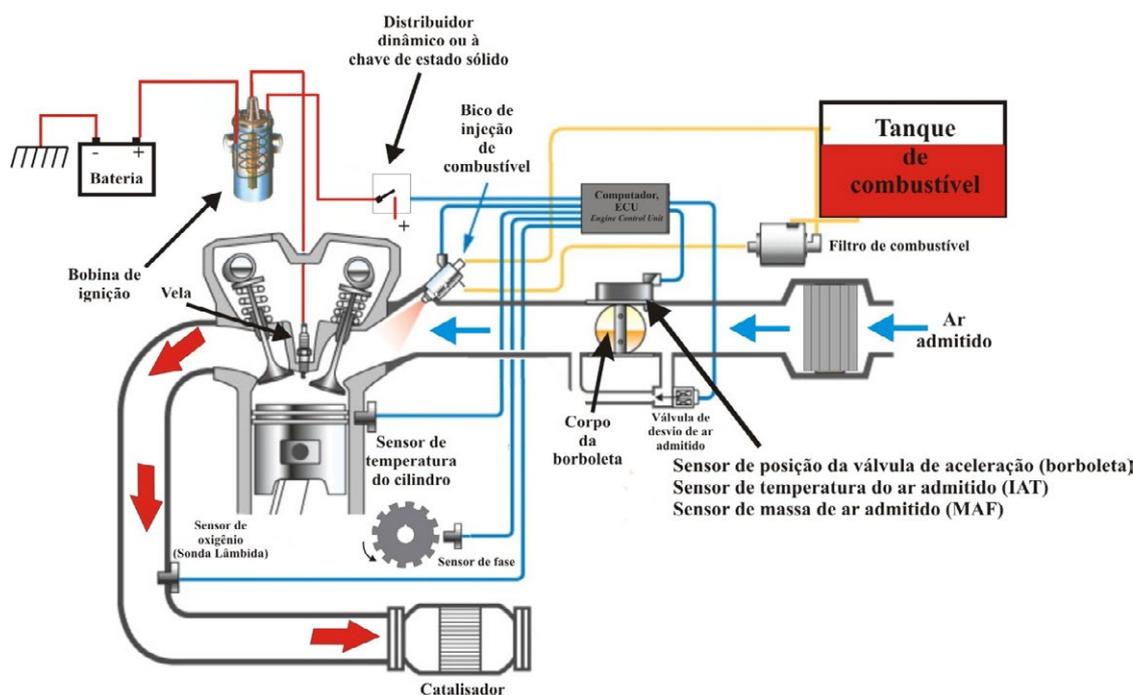
Como já foi abordado, todos os sensores se comunicam com a ECU, a partir de tensão elétrica. Os atuadores contidos no sistema de injeção, que são controlados a partir de tensão elétrica, são os seguintes:

- Borboleta de admissão de ar;
- Bico de injeção;
- Bomba de combustível;
- Válvula (*Exhaust Gas Recirculation*) – EGR: Reaproveita parte dos gases provenientes da queima, numa nova explosão, com o objetivo de minimizar emissões de óxido de nitrogênio e, ao mesmo tempo, suavizar as variações súbitas de temperatura dos cilindros.

Várias são as perturbações para o sistema de injeção eletrônica, por exemplo, temperatura e pressão ambiente. Uma das perturbações mais importantes para o controle da injeção é, no entanto, a composição do combustível. Nos veículos Flex, o percentual da mistura de gasolina e etanol faz com que a ECU reconfigure o controle, alterando a mistura e quantidade total de combustível e ar. Dessa forma, o sistema apresenta uma característica adaptativa às variações de combustível, temperatura e outras perturbações que podem ocorrer no sistema de injeção.

O catalisador, a título de informação, é um filtro que reduz as emissões de gases venenosos originados na combustão, como, por exemplo, CO (Monóxido de carbono), NOx (Óxido de nitrogênio) e CyHx (Hidrocarbonetos não queimados). A ação catalítica é basicamente uma sequência de redução e oxidação, quando esses gases passam pela colmeia do filtro, formada de Platina, Paládio e Ródio. O resultado da ação é liberação de N₂, O₂, CO₂ (Dióxido de carbono) e H₂O (vapor de água) – elementos que não são de categoria venenosa. O catalisador contribui para melhoria da qualidade do ar, principalmente nas grandes cidades.

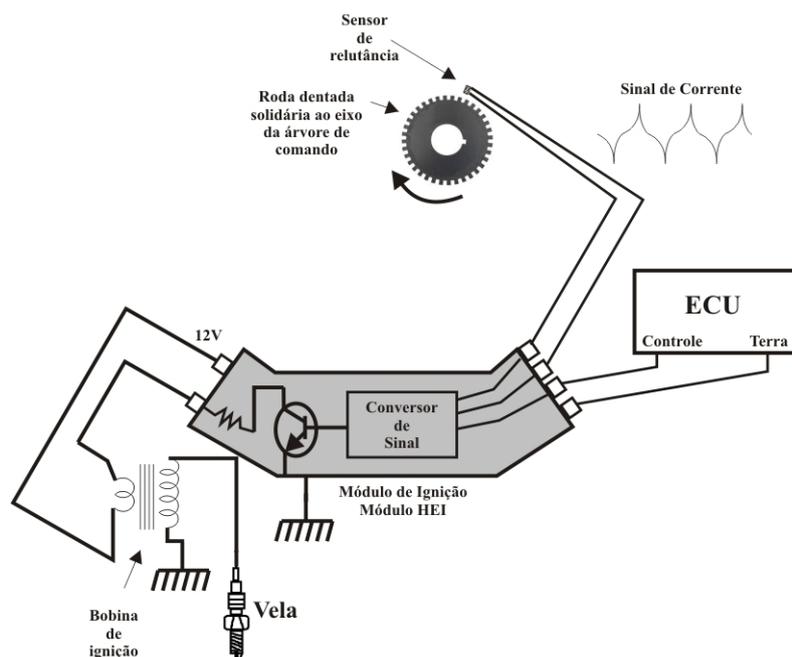
Figura 11.9 – Circuito de injeção e ignição de um automóvel com injeção eletrônica



O instante da explosão dentro dos cilindros é um fator importante para o desempenho do motor. É a centelha gerada na vela que oferece a ignição à mistura de combustível e oxigênio. Desta forma, a função do sistema de ignição dos veículos é gerar a centelha responsável pela explosão dentro dos cilindros no momento certo. O grande responsável pelo gerenciamento da ignição é a ECU, e o responsável pela execução é o módulo de ignição ou módulo HEI (*High Energy Ignition*), visto simplificado na Figura 11.10. O módulo possui a função de produzir o centelhamento na vela. O transistor funciona como uma chave comandada pela corrente proveniente do conversor de sinal. Se a chave fecha ou abre, cria uma variação de tensão no enrolamento do transformador. Essa variação súbita é amplificada pela relação de espiras do transformador e aplicada na vela. Picos de tensões na ordem de 45000 volts são gerados nos terminais da vela, quebrando a rigidez dielétrica e criando a centelha.

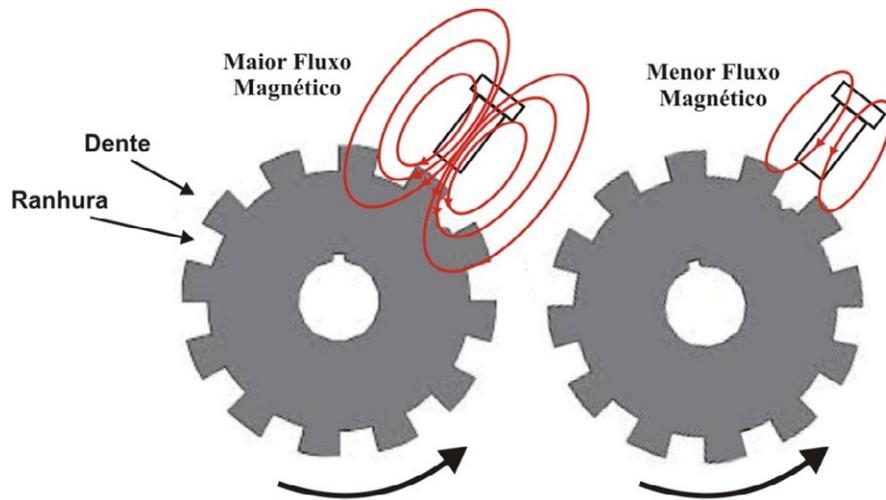
Um avanço importante nos sistemas de ignição é a substituição do distribuidor mecânico pelo sensor indutivo ou sensor de relutância. É esse sensor que provê o gatilho da ignição. Um disco metálico provido de dentes metálicos, posicionado no eixo do comando de válvulas, gira muito próximo ao ímã permanente do sensor. Esse sensor é formado basicamente por uma bobina que possui um ímã permanente prolongado no seu interior. Quando o dente está alinhado com o ímã permanente, as linhas do campo magnético circulam com menor impedimento, ao passo que, quando o ímã está alinhado com a ranhura (entre um dente e outro), há uma relutância maior à circulação das linhas, como mostrado na Figura 11.11. Este sistema é na realidade um sensor de relutância entre dente e ranhura. As variações de fluxo criam tensões induzidas na bobina. Esses pulsos de tensões são tratados pelo conversor de sinal do módulo de ignição para gatilhar o transistor. Os veículos antigos possuíam um distribuidor que possuía contato físico. O distribuidor com sensor de relutância não possui contato físico. A roda dentada gira livre do sensor de relutância. O sinal é gerado pela variação da indutância sem contato físico. Neste caso o custo da manutenção é bem menor que o do distribuidor antigo.

Figura 11.10 – Vista simplificada do sistema de ignição



A ECU provê o módulo de ignição ainda de referência terra e controle de gatilhamento. O módulo de ignição possui a função muito importante de separar o circuito de ignição, que possui manipulação de alta corrente e tensão, do circuito de controle baixa tensão e corrente (sensores e ECU).

Figura 11.11 – Sensor indutivo de relutância em operação



A vela transporta o pulso de eletricidade do cabo de elétrico ao cilindro do motor, onde, neste último, será realizada a explosão. É no espaço entre o eletrodo de terra e o eletrodo proveniente da bobina de ignição que acontece a formação da centelha. Esta centelha é uma quebra de rigidez dielétrica entre os dois eletrodos. Pulsos de 40 kV passam pela vela até os eletrodos. A isolação entre o condutor interno e o bloco de motor deve ser alta e com rigidez dielétrica alta. Além do mais, a vela está em contato com o interior do cilindro, sendo este, por sua vez, submetido a temperaturas muito altas. Desta forma, além da isolação elétrica e rigidez dielétrica altas, a vela é composta de materiais que suportam altas temperaturas.

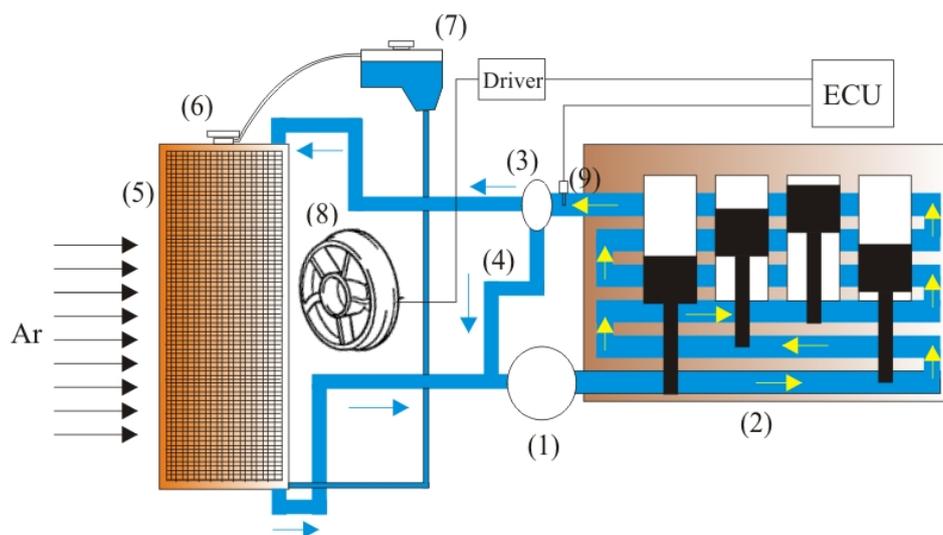


11.1.4 Sistema de arrefecimento do motor

Nos motores dos veículos acontecem centenas de explosões, por minuto, em cada cilindro. Essas explosões geram energia, em parte transformada em energia mecânica para movimentação do veículo. A maior parcela da energia gerada pelas explosões é, no entanto, transformada em calor, que aquece o motor. O rendimento dos motores de combustão veicular estão por volta de 35%, em outras palavras, quase 70% da energia proveniente da combustão do líquido combustível é perdida na forma de calor. Em uma comparação rápida com motores elétricos, na mesma faixa de potência, que possuem rendimento por volta de 90%, percebe-se, por parte dos motores a combustão, um rendimento muito menor que os motores elétricos.

Sendo gerado de forma muito intensa, como dissipar tal calor evitando que o bloco do motor alcance temperaturas danosas? Isto é conseguido pelo sistema de arrefecimento do veículo. É mostrada, na Figura 11.12, a planta simplificada do sistema de arrefecimento do motor dos veículos atuais. Estes veículos utilizam resfriamento baseado em líquido refrigerante, o qual é composto de polímeros e de uma série de aditivos, como estabilizantes, antiespumantes, anticorrosivos e outros. Veículos antigos utilizavam refrigeração do motor a ar.

Figura 11.12 – Planta simplificada do sistema de arrefecimento dos veículos com motores a combustão



A bomba de água (1) é responsável por impulsionar o líquido por todo o sistema de mangueiras e dutos. Essa bomba é atrelada por uma correia ao virabrequim, isto é, atrelada ao eixo rotativo do motor mecânico. Isso é feito de tal forma que, ao aumentar o número de rotações por minuto (RPM) do motor, conseqüentemente aumentando o número de explosões nos cilindros, haverá um aumento do fluxo do líquido pelo sistema. O bloco do motor (2) é o local onde estão os cilindros para ignição do combustível, e por sua vez, onde está sendo gerado o calor. O líquido passa pelo bloco por uma rede de capilares (pequenos dutos), no intuito de tirar, do bloco, o calor em excesso.

Depois de passar pelo bloco do motor, o líquido chega à válvula termostática (3). O termostato (3) é um componente que age por pressão do líquido. Quando o motor está frio, assim como o líquido, o termostato se fecha para o caminho do radiador e abre-se para um atalho, o *bypass* (4). Desta forma, o caminho do líquido impulsionado pela bomba se

restringe ao bloco do motor. O objetivo do termostato é aumentar a temperatura do bloco do motor o mais rápido possível. O motor opera numa temperatura ótima de 90 °C a 100 °C.

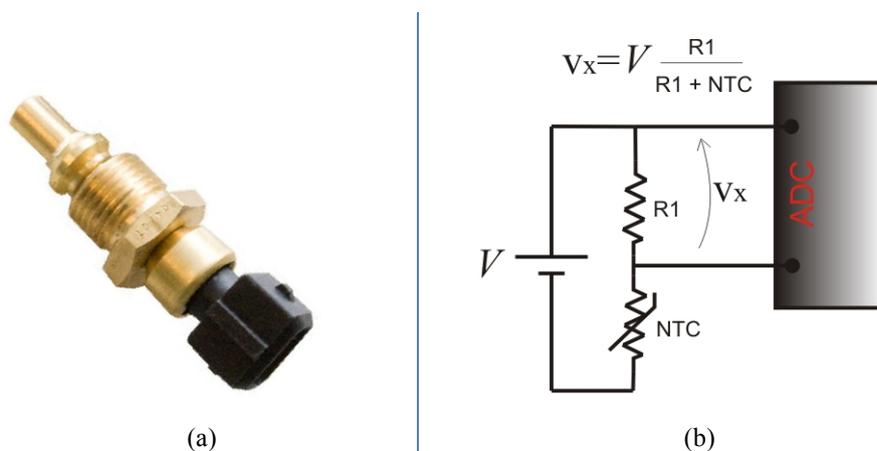
Quando o líquido atinge a temperatura de operação do motor, o termostato abre o caminho para o radiador e fecha para o atalho. O radiador (5) é composto de dutos em forma de serpentina que tem como objetivo aumentar a área de contato do líquido com a superfície do componente, que, por sua vez, é refrigerado pelo ar, quando o veículo se movimenta. O líquido resfriado volta para a bomba de água que é impulsionada para o bloco, fechando o sistema.

Se a pressão do líquido aumentar além dos valores de operação, uma válvula contida na tampa do radiador (6) joga o excesso no vaso expansor (7). Se a velocidade do veículo não é suficiente para baixar a temperatura do bloco do motor, entra em cena o circuito elétrico de apoio. O ventilador (8) é ligado, no intuito de aumentar o fluxo de ar. Um sensor de temperatura (9) lê a temperatura do líquido e manda o sinal de tensão para a placa de comando ou ECU; se a temperatura está no limite da temperatura ótima, a central aciona o ventilador do radiador, para um resfriamento forçado.

O ventilador pode ter várias velocidades para permitir um controle mais eficiente. Quando a temperatura do líquido atinge o valor mínimo da temperatura ótima de operação do veículo, o ventilador é desligado, criando um controle da temperatura do líquido do tipo liga-desliga, e, conseqüentemente, controle da temperatura do bloco do motor.

A leitura da temperatura do líquido é realizada por um sensor NTC (*Negative Temperature Coeficient*), já descrito no Capítulo 2, visto na Figura 11.13 (a). Trata-se de um resistor cuja resistência varia com a temperatura. O NTC em série com um resistor fixo, mostrado na Figura 11.13 (b), é a configuração básica utilizada para leitura de temperatura. Essa configuração é um divisor de tensão, já estudado no capítulo relativo à corrente contínua. Se a temperatura aumenta, a resistência do NTC diminui, aumentando a tensão em cima do resistor fixo. Caso a temperatura diminua, a resistência do NTC aumenta, diminuindo a tensão no resistor. Este sinal de tensão do resistor fixo é mandado para a ECU que, por sua vez, determina a temperatura e decide se liga ou não o ventilador.

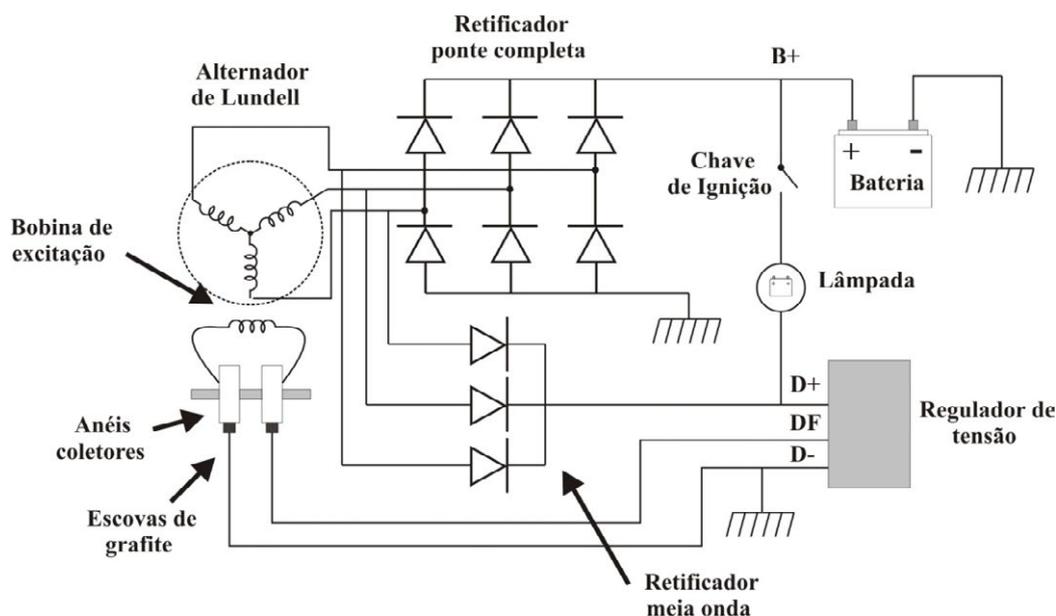
Figura 11.13 – (a) NTC para leitura da temperatura do líquido refrigerante;
(b) Configuração básica de utilização do NTC – Divisor de tensão



11.1.5 Sistema de carregamento de bateria

As baterias dos veículos automotores, ou bateria de chumbo-ácido, são muito exigidas na partida do motor. Correntes por volta de 80 A são necessárias para a partida do motor a combustão. O sistema de carregamento da bateria provê tais baterias de cargas elétricas enquanto o veículo estiver funcionando.

Figura 11.14 – Visão simplificada do sistema de carregamento de bateria dos veículos automotores



Na Figura 11.14 apresentamos a planta simplificada do sistema de carregamento de bateria dos veículos automotores. O processo começa no momento em que a chave liga o veículo e a lâmpada da bateria liga no painel do carro, conforme visto na Figura 11.14. Quando há a ignição do motor a combustão, entra em funcionamento o alternador, que irá girar por volta de 900 RPM, sem aceleração. O alternador é uma máquina síncrona que gera uma tensão alternada, função da corrente contínua da bobina de excitação. Quanto maior a corrente de excitação, maior a amplitude da tensão gerada. A corrente de excitação é fornecida aos anéis coletores. Esses anéis coletores, por sua vez, estão ligados às bobinas de excitação da máquina, como visto na Figura 11.14. Essa bobina se encontra no rotor. A tensão gerada na bobina do estator é retificada por um retificador a diodos e aplicada na bateria, como mostrado na Figura 11.14. A amplitude da tensão é, no entanto, função também da velocidade do rotor do alternador. Se o motorista acelera, o alternador irá gerar uma tensão maior. Entra em cena o regulador de tensão. O regulador aumenta ou diminui a corrente nos anéis coletores, com a finalidade de a tensão na bateria permanecer constante – aproximadamente 14 V. Em outros termos, quando a velocidade do rotor aumenta, o regulador diminui a corrente de excitação, ao passo que, quando a velocidade do alternador diminui, o regulador aumenta a corrente de excitação.

Se o sistema de carregamento estiver funcionando corretamente, enquanto o motor a combustão estiver operando, a bateria está sendo carregada e todo o sistema elétrico do veículo está sendo alimentado pelo gerador.

11.2 Introdução a sistemas elétricos de corrente contínua para segurança patrimonial

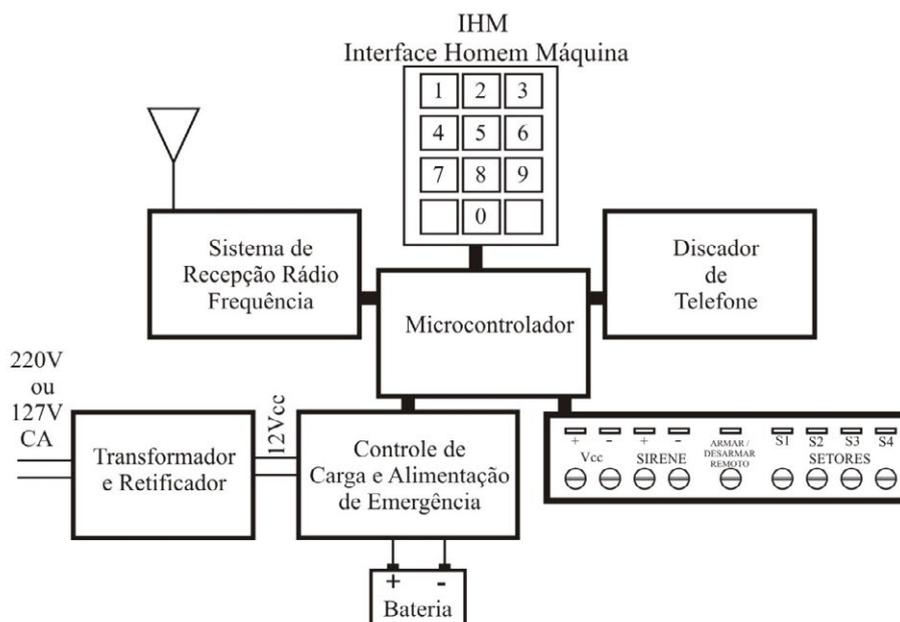
Sistemas elétricos de segurança patrimonial são aqueles destinados à proteção de residências, comércios e indústrias, contra furtos e invasões com intuito de lesar tanto o patrimônio quanto a integridade física de proprietários, moradores, funcionários, clientes, etc. Tais sistemas utilizam sensores de presença, de barreira e uma central que gerencia o processo de segurança. Este livro se detém em abordar de forma introdutória e definir alguns conceitos utilizados nesses sistemas. Com a definição desses conceitos, a leitura e compreensão dos manuais de instalação tornam-se mais fáceis ao técnico.

Definições preliminares

Central de alarme

Central de alarme é um módulo em que se encontram incorporados um microcontrolador, uma fonte de alimentação, um receptor de rádio frequência de sensores a rádio (sem fio), um receptor do controle remoto e um controlador de carga de bateria. Microcontrolador é um computador dedicado a uma determinada tarefa, no caso, gerenciamento de um sistema de segurança. É a central que decide se um evento é uma violação ou não. Em caso de violação, uma sirene é acionada, ou uma ligação é efetuada para um telefone registrado. Um esquema simplificado de uma central, com quatro setores, para sensores com e sem fios, com discagem para telefone em caso de violação, é representado na Figura 11.15.

Figura 11.15 – Esquema de uma central de alarme tradicional com quatro sensores



Sensores

São componentes que detectam violações e mandam sinais de controle para a central de alarme. Esses sinais são interpretados pelas centrais, para definirem se há ou não violação e, conseqüentemente, se há necessidade ou não de se acionar o sistema de alarme. São vários os tipos de sensores que diferem pelo tipo de detecção. Os mais comuns em sistemas comerciais são descritos a seguir.

Sensores de detecção de movimento via ultrassom ou micro-onda

Esses dois sensores utilizam tecnologia, a princípio, semelhantes: emissão de ultrassom ou micro-ondas numa determinada área e recepção de reflexo. Com base na recepção, o sensor analisa se houve mudança de padrão ou corpos se movimentando dentro da área. Com base nesta análise, há decisão se houve violação da área. O princípio se assemelha aos radares de detecção de aeronaves.

Sensor passivo de detecção por calor

Os corpos dos seres vivos irradiam naturalmente calor na forma de infravermelho. Os sensores detectam mudanças no padrão de infravermelho de uma área. Neste tipo de sensor não há emissão, mas só recepção de infravermelho. A detecção de padrão de calor é analisada e, a partir dessa informação, define-se se houve ou não violação da área por parte de um corpo em movimento. Há ainda a possibilidade de se regular a sensibilidade para o tamanho do corpo, pois, às vezes, é interessante que o sensor não encare como uma violação a presença de pequenos corpos na área, como, por exemplo, um cão ou gato. Este tipo de sensor é o mais comum para acionamento de lâmpadas em ambientes com pouco trânsito de pessoas. Sua imagem pode ser vista na Figura 11.16.

Figura 11.16 – Sensor passivo de detecção de calor



Sensor ativo de cruzamento de feixes de raio infravermelho

Este tipo de sensor visa não a sensoriamento direto de uma área, e sim de cruzamento por uma linha. A violação se dá pelo cruzamento da linha. É formado por dois módulos, um transmissor de infravermelho e um receptor. Esses dois módulos são alinhados no local que se quer proteger, por exemplo, um muro, uma passagem de um corredor. No módulo do receptor, encontram-se as chaves (normalmente aberta e normalmente fechada) que mudam de estado, caso haja violação. Este tipo de sensor pode ser de um só feixe ou de feixe duplo, como visto na Figura 11.17. Com feixe duplo, há menos probabilidade de disparo errado, ou seja, sem violação.

Figura 11.17 – Sensor de barreira com feixe duplo de infravermelho

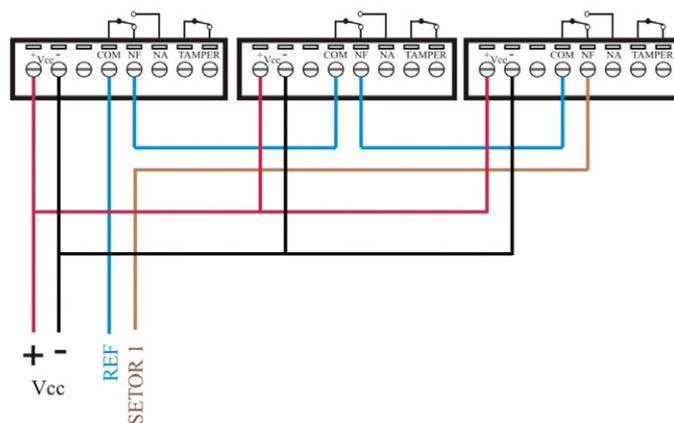


Classificação dos sensores quanto à comunicação com a central

Com Fio

Trata-se de uma denominação genérica para aqueles que contêm chaves normalmente aberta e normalmente fechada. Essas chaves mudam de estado, em caso de violação. Tal mudança é detectada pela central que atua, alarmando. Geralmente essas chaves estão ligadas em série num setor de proteção. Um exemplo de esquema de ligação de um setor com três sensores de barreira (receptores) é mostrado na Figura 11.18. Quando não há violação, o nível do sinal do condutor Setor 1 é o mesmo daquele da referência. Se algum sensor detectar uma violação, o condutor do Setor 1 não terá o mesmo nível de tensão do condutor de referência. Essa mudança implica que o Setor 1 foi violado, e a central decidirá alarmar ou telefonar para algum número a fim de que providências adequadas sejam tomadas. Observe que todos os sensores estão ligados em série. Se houver a tentativa de cortar um desses condutores, haverá a mudança de estado, o que será entendido também como violação do setor. Geralmente a referência é ligada no negativo da alimentação.

Figura 11.18 – Esquema de ligação de três sensores de barreira (receptores) ligados no Setor 1



Sem Fio (por rádio frequência)

Os sensores do tipo sem fio utilizam rádiofrequência para se comunicar com a central. São utilizados nos casos em que não há possibilidade de fiação da central até o sensor. O grande inconveniente deste tipo de sensor é sua alimentação, que deve ser com pilhas ou baterias no próprio sensor. O carregamento ou troca dessas baterias torna-se uma atividade a mais que deve ser efetuada corriqueiramente. A tecnologia desses sensores, no entanto, vem, cada vez mais, utilizando técnicas que aumentam a autonomia das baterias. Caso haja a utilização deste tipo de sensor, deve-se, a princípio, cadastrar sua frequência na central. Observação importante: nem toda central permite utilização de sensores sem fios. Mesmo que a central permita a utilização desses sensores, deve-se atentar para a quantidade máxima por setor.

Setores de segurança

Setor de segurança é uma área física, com uma determinada característica, coberta por um conjunto de sensores. A partição dos setores permite, por sua vez, a partição do comando, isto é, que este seja armado ou desarmado por controles remotos individuais. Vejamos alguns exemplos de utilização dos setores particionados:

I - Numa residência cada lado pode ser particionado por setores diferentes, sendo comandados pelo mesmo controle remoto. Este tipo de distribuição dos setores numa área física é útil, pois, em caso de violação de um dos lados, a central indicará qual lado da residência foi atingido.

II - Outro exemplo é o de um conjunto de pequenas lojas fisicamente próximas que compartilham a mesma central. Cada loja pode ser protegida por um setor de segurança diferente, particionando também os controles remotos. Desta forma, cada loja terá seu conjunto de sensores bem como seu próprio controle remoto para armar e desarmar.

Contato TAMPER

A violação de um sensor a fio não é tão difícil de acontecer. Pode-se remover a tampa do sensor, por exemplo, tendo acesso aos terminais (COM e NF). Ligando um condutor a esses dois terminais, o sensor será desabilitado. O contato TAMPER oferece uma segurança a mais contra violações. O contato TAMPER é fechado quando o sensor está com a tampa, e aberto quando essa tampa é removida. Perceba que esse contato é ligado em série com (COM e NF). Caso haja remoção da tampa da caixa do sensor, a central detectará a violação energizando a sirene.

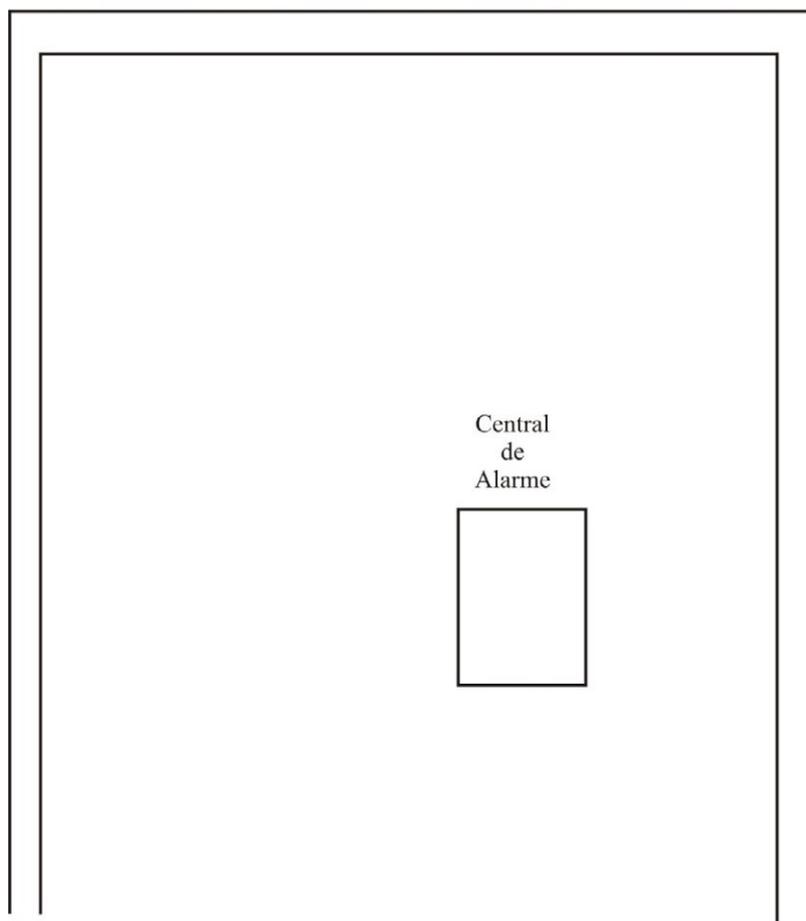
PRÁTICAS NA SALA DE AULA

Projeto de um sistema simples para segurança residencial

- A Figura 11.19 representa os limites dos muros de uma residência. Projete um sistema com três conjuntos de sensores de barreira em cima dos muros, todos ligados a um mesmo setor. Elabore também o esboço da fiação desde a central até os sensores, utilizando quatro cores diferentes para alimentação, Positivo da alimentação (vermelho), Negativo da alimentação (preto), Referência (azul) e Setor (marrom). Identifique no projeto a posição dos transmissores e receptores para que se utilizem menos condutores possíveis.

Figura 11.19 – Residência e seus limites de muros

Muros Limites da Residência



REFERÊNCIAS

AUTOMOTIVE Reference Manual & Illustrated Automotive Dictionary. Newbury Park, CA: Haynes Techbook, 2016.

DENTON, Tom. **Automobile Electrical and Electronic Systems**. 3rd. ed. London: Elsevier, 2004.

ECP. **Centrais de alarmes**. Disponível em: <<http://www.ecp.com.br/>>. Acesso em: mar. 2018.

HEYWOOD, John B. **Internal combustion engine fundamentals**. 2nd. ed. New York: McGraw-Hill, 2018.

INTELBRAS. **Central de alarme**. Disponível em: <<http://www.intelbras.com.br/empresarial/alarmes/central-de-alarme>>. Acesso em: jan. 2018.

JFL ALARMES. Disponível em: <<http://www.jfl.com.br/>>. Acesso em: abr. 2018.

LAI, Denise; NG, Philip. Voltage of automobile spark plugs. In: ELERT, Glenn (Ed.). **The Physics Factbook: An encyclopedia of scientific essays**. 1999. Disponível em: <<http://hypertextbook.com/facts/1999/DeniseLai.shtml>>. Acesso em: ago. 2017.

OBD-II and Electronic Engine Management Systems. Newbury Park, CA: Haynes Techbook, 2016.

12 Fontes primárias de geração de energia elétrica e sustentabilidade

Ao observar os animais, percebe-se que a obtenção de energia é fundamental para a perpetuação da espécie. Obtenção de energia e reprodução são as duas grandes dimensões da evolução das espécies. Além da energia para a sobrevivência, o ser humano precisa, no entanto, de energia para várias outras funções. Funções ligadas à produção e utilização de bens e serviços necessitam de muitos recursos, dentre eles a energia. A produção de bens e serviços gera riquezas que podem ser compartilhadas pelos integrantes de uma região. Quando estiver utilizando um veículo, um condicionador de ar, uma geladeira, lembre-se de que foi necessário fornecer energia para se produzir aqueles bens.

O ser humano difere dos outros animais por necessitar de muito mais energia para viver. Quanto mais rica uma pessoa, quanto mais rica uma cidade, quanto mais rico um país, mais energia se consome. O consumo de energia por pessoa nos países industrializados, por exemplo, chega a ser de 3 a 4 vezes maior que nos países em desenvolvimento. O consumo de energia é uma referência para produção de riquezas de uma região. Quando a economia está bem, o consumo de energia aumenta; quando vai mal, o consumo às vezes diminui. A necessidade de mais energia está relacionada com o aumento de riqueza e do conforto nas nossas vidas. Cada vez mais, no entanto, se avaliam as fontes de energia bem como sua utilização pelos consumidores finais, principalmente quanto ao impacto dessas fontes de energia no planeta e seus efeitos para esta e para as futuras gerações. Neste capítulo, são abordadas as principais fontes primárias de geração de energia elétrica, suas vantagens e desvantagens.

Um sistema que produz algum bem e serviço de forma sustentável é aquele que produz com eficiência, sem comprometer os recursos e a qualidade de vida desta e das futuras gerações. Essa é a definição geralmente aceita de sustentabilidade. Vários conceitos estão contidos nesta definição.

- **Sistema** de produção de bens e serviços é uma reunião de elementos com ação coordenada, com entradas(recursos) e saídas(produtos). O sistema consome recursos para produzir produtos ou serviços.
- **Bens e serviço** são os produtos de uma sociedade. Exemplos de bens e serviços são: energia elétrica, produtos alimentícios, produtos de limpeza, serviços bancários, serviços de abastecimento de água, serviço de distribuição de energia elétrica e outros.
- **Recursos desta e das futuras gerações** não devem ser comprometidos. Os mananciais, jazidas e florestas pertencem também às futuras gerações, e o direito delas deve ser assegurado.
- Produzir com **eficiência** é produzir com o mínimo de recurso (energia elétrica e água, por exemplo), com o mínimo de impacto ao meio ambiente.
- **Qualidade de vida das futuras gerações** inclui ausência de poluições (lixos, resíduos, poluição visual e sonora), ausência de mudanças na temperatura global e seus efeitos.

Nisto consiste a sustentabilidade, produzir e consumir pensando nesta e nas futuras gerações, nos nossos filhos e netos.

Há inúmeras fontes de energia primária que podem ser exploradas para geração de energia. A principal classificação dessas fontes de energia é quanto à possibilidade de seu esgotamento. Quanto a esta classificação, essas fontes se dividem em renováveis e não renováveis.

12.1 Fontes não renováveis

Fontes não renováveis são aquelas que possuem a possibilidade de se esgotar a médio ou a longo prazo – por exemplo, derivados de petróleo e carvão mineral. As fontes não renováveis levaram muito tempo para sua composição. Alguns milhões de anos são necessários para transformar material orgânico em petróleo ou em carvão mineral. Dessa forma seria necessário também muito tempo para repor o que é explorado pelas fontes atuais, o que coloca essas fontes na categoria de exauríveis ou esgotáveis ou que não se renovam.

12.1.1 Petróleo e seus derivados

O petróleo é a fonte de energia mais explorada atualmente. Estima-se que os derivados de petróleo correspondiam a 55,7% de todo o consumo final de energia no mundo em 2012. Em termos de mobilidade de veículos de pequeno a grande porte, os derivados de petróleo dominam, atualmente. Os principais derivados de petróleo são a gasolina, o diesel e o gás natural. Tais derivados são utilizados em motores a combustão. O movimento dos motores a combustão é aproveitado para tração mecânica dos veículos ou são aproveitados para movimentação de geradores elétricos, com a finalidade de gerar energia elétrica.

Um motor a combustão de 4 tempos, muito utilizado em veículos, é mostrado na Figura 12.1. A mistura de combustível e ar é queimada dentro da câmara de combustão com ajuda de uma descarga produzida pela vela. A vela produz a descarga, a partir de um princípio já estudado nos capítulos anteriores. “A tensão induzida numa bobina é proporcional à variação de corrente no tempo”.

Se desligarmos um circuito com uma bobina, fazendo com que a corrente se anule num período de tempo muito curto, haverá a formação de uma centelha nos terminais de abertura (ver Figura 12.2). Esta centelha se forma devido à formação do arco, resultante da quebra da rigidez dielétrica do ar. Para produzir um movimento contínuo, a centelha deve ser criada no momento certo, é o chamado “tempo do veículo”. Essa centelha na vela é produzida nos veículos atuais com ajuda de um computador. A explosão é fundamental para transformação da energia do combustível em energia mecânica (energia para movimentação do veículo).

Figura 12.1 – Motor a combustão de 4 tempos

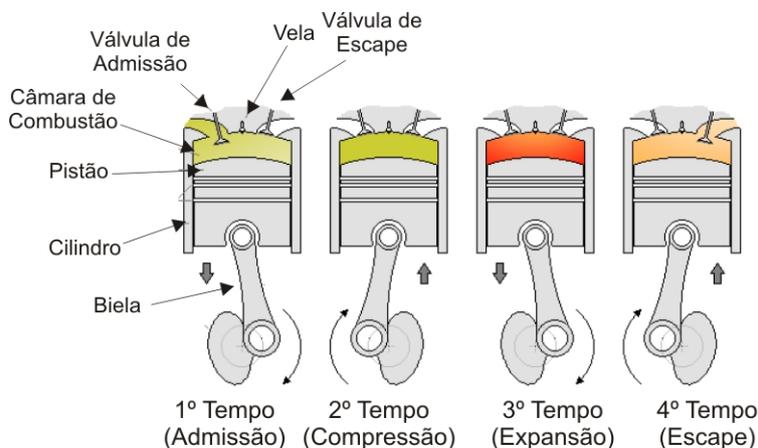
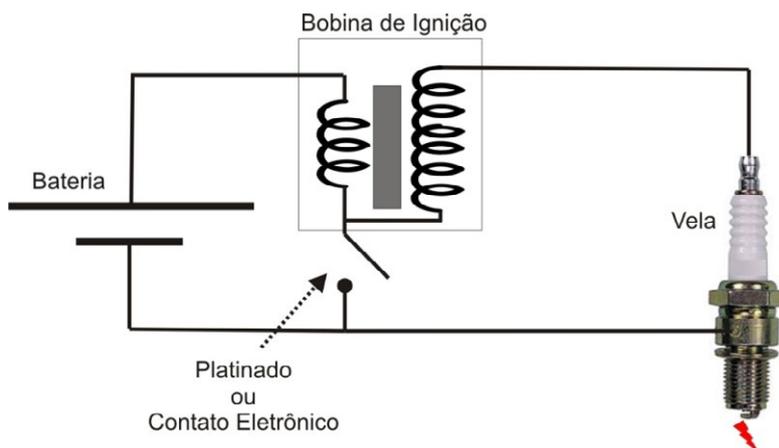


Figura 12.2 – Formação da centelha na vela

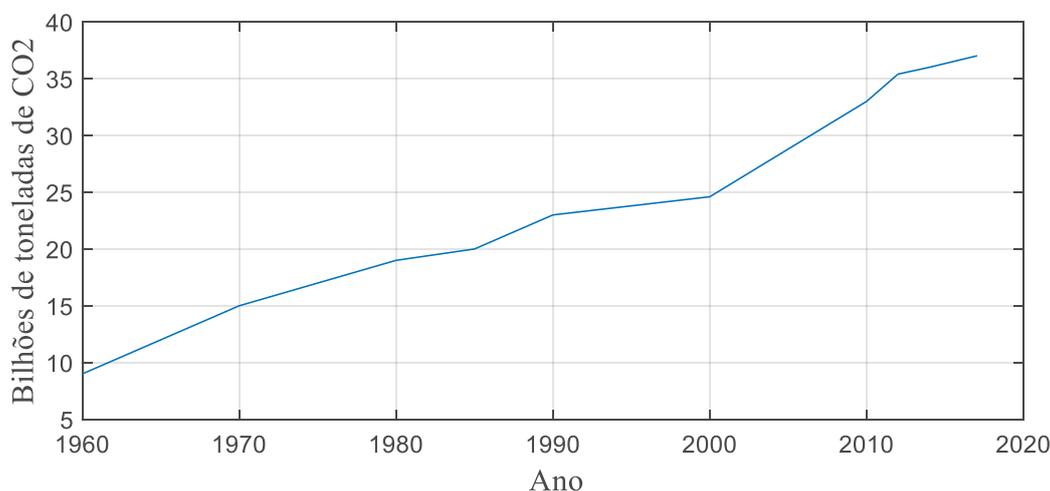


Os combustíveis derivados de petróleo, além de serem um recurso não renovável, com o qual não se pode contar a longo prazo, possuem um inconveniente enorme: a emissão de gases. Do processo de queima da mistura de combustível e ar resultam vários gases, como o CO_2 (dióxido de carbono), CO (monóxido de carbono), NO_2 (óxidos de nitrogênios), SO_2 (Dióxido de enxofre) e materiais particulados (partículas que permanecem na atmosfera, como poeira, fumaça e outras). Todos esses agentes são poluidores para as grandes cidades, tendo impacto sobre a qualidade de vida das pessoas que nelas habitam. O óxido de nitrogênio, por exemplo, na presença dos raios ultravioleta da luz solar, produz uma série de poluentes secundários, entre eles o ozônio. Trata-se de um gás primário que gera uma série de gases poluentes secundários. Esses gases, que estão cada vez mais presentes nas grandes cidades, inclusive o ozônio, são associados a uma série de doenças em moradores desses grandes centros urbanos.

CO₂ – Dióxido de Carbono

O CO₂ é produzido na queima de combustíveis orgânicos como derivados de petróleo, madeira e seus derivados. Nosso processo de obtenção de energia intracelular também libera CO₂. O ser humano libera CO₂, naturalmente, na respiração. Na realidade, o CO₂ não é vilão, já que o processo de obtenção de energia dos vegetais, a fotossíntese, necessita de CO₂ para sua operação. O problema é a concentração de CO₂ na atmosfera, que atingiu nível muito alto e continua subindo. Na Figura 12.3, é mostrada a evolução das emissões globais de CO₂ nos últimos 57 anos. Vemos que as emissões aumentaram muito nos últimos 30 anos. Na liderança dessas emissões, estão os países muito industrializados, como Estados Unidos e China.

Figura 12.3 – Evolução das emissões globais de CO₂ provenientes de combustão de combustíveis fósseis e produção de cimento



Fonte: Carbon Brief – Clear on climate 2017.

O dióxido de carbono é um dos principais gases de efeito estufa. São gerados em média 10,15 g na queima de 1 galão de diesel e 8,887 g na queima de 1 galão de gasolina. Os gases de efeito estufa absorvem a radiação infravermelha refletida pela Terra. Esse calor, que era para ser liberado para o universo, volta para a Terra e aumenta a temperatura global. O efeito estufa é vilão? Não! O efeito estufa sempre existiu e é um efeito importante para estabilização da temperatura do planeta e, por sua vez, importante para a evolução dos seres vivos. O problema é o aumento do efeito estufa que causa aumento da temperatura global. Vários estudos apontam para a evolução da temperatura média global. A tendência das temperaturas globais, a partir de 1980, é de uma taxa sempre positiva. Existe uma correlação entre o aumento da emissão de gases de efeito estufa e o aumento da temperatura global. Muito provavelmente esse aumento de temperatura global é causado pelo efeito estufa acarretado por esses gases. O fato é que o aumento da temperatura global trará efeitos muito complexos de se estimar. Variações muito pequenas na temperatura global já são suficientes para trazer consequências climáticas muito grandes. Efeitos como falta de chuva em algumas regiões, aumento de chuvas noutras, aumento de furacões, degelo das calotas polares são alguns exemplos que podem ocorrer. Esses efeitos poderão trazer consequências muito graves para as pessoas e para a economia mundial. Nenhuma região estará livre desses efeitos. Países

subdesenvolvidos e em desenvolvimento, no entanto, são os mais vulneráveis, pois possuem economia mais frágil, além de baixa organização política e social.

Os principais produtores de petróleo em 2017 são mostrados na Tabela 12.1. Nos últimos anos, os três maiores produtores se revezam nas primeiras posições. Outro destaque importante é o Brasil, que se consolida entre os dez maiores produtores do mundo.

Tabela 12.1 – Principais países produtores de petróleo em 2017.

Produtor	Produção anual média (milhões de barris por dia)
Estados Unidos	15,564
Arábia Saudita	12,088
Rússia	11,199
Canadá	4,943
China	4,784
Irã	4,669
Iraque	4,462
Emirados Árabes	3,721
Brasil	3,363
Kuwait	2,928

Outro problema histórico em relação ao petróleo é quanto às áreas onde se encontra a maioria da produção. Um grande percentual das fontes de petróleo em terra é localizado no Oriente Médio, em zonas politicamente instáveis. Cinco entre os dez maiores produtores de petróleo, em 2017, mostrados na Tabela 12.1, estão nestas áreas. Observe a grande hegemonia dos países do Oriente Médio. A Organização dos Países Exportadores de Petróleo – OPEP – reúne seus principais produtores. Essa organização nasceu em 1960, com o objetivo de coordenar as políticas do setor. Embora exista uma hegemonia dos países do Oriente Médio na produção de petróleo atualmente, no passado, 20 ou 30 anos atrás, esta hegemonia era muito maior. Ao longo dos anos, houve várias crises, seja de caráter especulativo ou devido a guerras nessa região. Destaca-se a crise de 1973, quando houve um aumento no preço do barril de petróleo de 400% em 5 meses, acarretada pela Guerra do Yon Kipur e por fatores especulativos.

Na Tabela 12.2, apresenta-se o poder calorífero gerado pela combustão dos principais derivados de petróleo. Os sistemas de geração de energia elétrica comerciais extraem menos energia que os valores expressos na Tabela 12.2, devido ao rendimento do motor a combustão e do gerador elétrico. Na prática, o rendimento dos geradores elétricos, operando na carga nominal, está na faixa de 70% a 85%, dependendo de sua potência. Além do mais, os motores a combustão apresentam rendimentos muito baixos – por volta de 35%. Na prática, trabalha-se com, no máximo, 3 kWh/L de diesel, nos geradores atuais.

Tabela 12.2 – Poder calorífero gerado pela combustão dos principais derivados de petróleo.

Combustível	Energia (kWh)
1 m ³ de gás natural	10,2 8
1 litro de gasolina	9,4
1 litro de diesel	11,1

PRÁTICAS NA SALA DE AULA

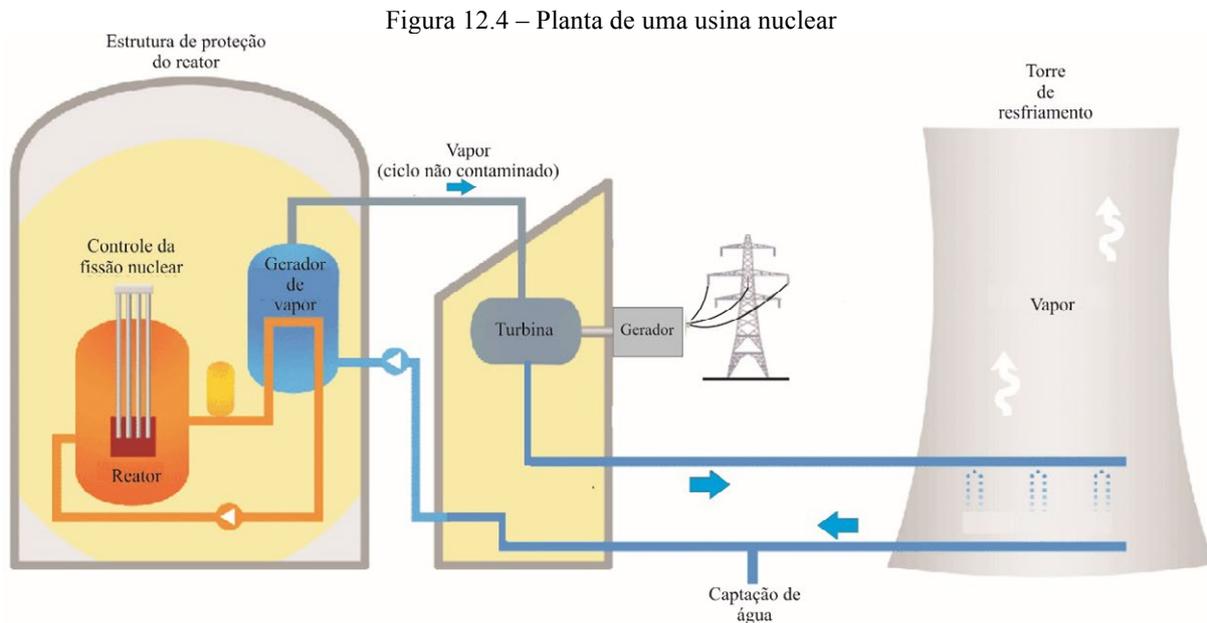
- Baseado na fatura de energia elétrica da sua residência, determine a quantidade de diesel necessária, em litros, para um grupo gerador prover a energia consumida mensalmente pela sua família.
- Determine no item anterior o custo do diesel e compare com sua fatura. O custo é maior ou menor?
- Determine também a quantidade de dióxido de carbono liberado pela queima do diesel.

12.1.2 Energia nuclear

Na metade do século passado, a energia atômica começa ser utilizada para produzir energia. Atualmente, cerca de 15% de toda energia elétrica gerada no mundo vem de usinas nucleares. A palavra nuclear é uma alusão ao núcleo do átomo. Foi mostrado no capítulo dedicado à eletrostática que cargas elétricas iguais se repelem. Por que as cargas positivas dos prótons do núcleo atômico não se repelem? Que força os mantém unidos contrapondo-se à força eletrostática? Durante a Segunda Guerra Mundial, por volta de 1939, foi descoberto um modo de aproveitar esta energia potencial do núcleo dos átomos para exploração de energia. O processo de fissão nuclear é baseado no bombardeamento do núcleo por nêutrons, com a finalidade de quebrar o núcleo atômico. Quando os núcleos são quebrados em núcleos menores, há liberação de energia, em forma de calor, mas também há liberação de outras partículas de nêutrons que, por sua vez, bombardeiam outros núcleos, criando, assim, uma reação em cadeia. O fenômeno da reação em cadeia é o grande responsável por essa fonte de energia.

A quantidade de energia no núcleo dos átomos é muito grande. A partir de pequenas quantidades de matéria, é possível extrair muita energia. A reação em cadeia abriu a possibilidade de construção de uma bomba com um poder jamais visto na história da humanidade. Nas usinas nucleares, essa energia é utilizada para aquecer a água até o nível de vapor. Tal vapor é utilizado para movimentar as turbinas, as quais movimentam os geradores elétricos. Uma planta simplificada de uma usina nuclear é mostrada na Figura 12.4. O leitor pode observar que a planta possui dois sistemas hidráulicos independentes: o que passa pelo

reator e o sistema que circula pela turbina. Entre os dois, só há troca de calor. A geração de calor é controlada pelo controle da fissão nuclear. Parte deste calor é transformada em energia pela turbina que, por sua vez, movimenta o gerador elétrico. O calor remanescente é liberado pela torre de resfriamento.



Um dos grandes problemas com a geração nuclear de energia é a segurança do próprio processo, pois existe uma reação em cadeia que deve ser controlada. A perda de controle da reação em cadeia acarreta uma liberação muito grande de energia, chegando a fundir algumas partes do reator nuclear. No reator nuclear está localizado o material que está sendo alvo da fissão nuclear. Alguns desastres históricos mostraram que a perda de controle da reação acarreta prejuízos enormes e danos à saúde de moradores da região, problemas que podem durar anos. O desastre mais célebre é o da cidade de Chernobil.

Em 1986, um reator da usina nuclear dessa cidade do norte da Ucrânia explodiu e liberou uma nuvem radioativa que contaminou uma vasta área geográfica, atingindo pessoas e animais. Várias medidas de descontaminação foram realizadas, entre elas a construção de um caixão de concreto, aço e chumbo para acondicionar o reator. A cidade teve uma vasta área inutilizada, com índices de radioatividade muito acima do aceitável até hoje. As usinas atuais, no entanto, possuem uma confiabilidade muito alta, logo a probabilidade de sair de controle é muito baixa. Ainda assim, a história mostra que desastres naturais podem contribuir para a saída de controle do reator ou vazamento de material radioativo, como foi o caso das usinas da cidade de Fukushima, no Japão, com o advento dos tsunamis que atingiram o país em 2011.

Outro grande problema das usinas nucleares é o lixo atômico, rejeito de materiais utilizados na fissão e a água de resfriamento dos reatores. Este é um problema que ainda não está solucionado. Ainda não temos tecnologia para tratamento do lixo atômico. Tais lixos estão sendo estocados em estruturas à prova de radiação, aguardando que, no futuro próximo, este problema seja solucionado.

Uma grande vantagem da energia nuclear é a necessidade de pequenas quantidades de urânio. Com um grama de urânio enriquecido, por exemplo, é possível gerar por volta de

140 kWh de energia elétrica, numa usina nuclear típica. Numa termelétrica, utilizando-se carvão, a quantidade de energia elétrica gerada estará por volta de 0,00246 kWh por grama de carvão. Com apenas um grama de urânio, é possível abastecer uma residência de classe média brasileira, durante um mês.

Hoje temos muitas usinas nucleares em funcionamento no mundo. Na Tabela 12.3, são mostrados os 10 maiores países geradores de energia nuclear. O Brasil possui duas usinas em atividade, o que mostra que a energia nuclear não possui muito peso na capacidade instalada do sistema elétrico brasileiro.

Tabela 12.3 – Principais usuários da energia nuclear no mundo em 2016.

País	Quantidade de usinas	Energia (GWh)
Estados Unidos	100	805.000
França	58	384.000
China	36	198.000
Rússia	36	184.000
Coreia do Sul	25	154.000
Canadá	19	96.000
Alemanha	8	80.000
Ucrânia	15	76.000
Reino Unido	15	65.000
Suécia	10	61.000
Brasil	2	15.000

Se a confiabilidade da usina termonuclear for aumentada, reduzindo-se o risco de acidentes e resolvendo-se o problema do lixo nuclear, ela pode se tornar uma opção extremamente atrativa para produção de energia em larga escala.

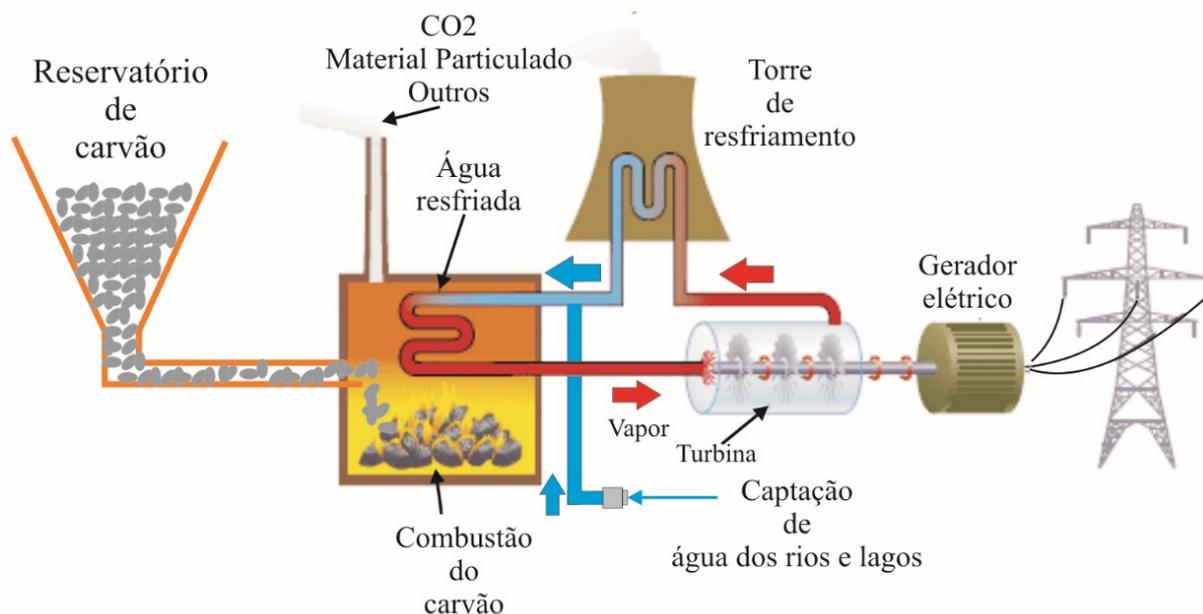
12.1.3 Carvão mineral

O carvão mineral é uma rocha que tem, na sua formação, o carbono. Tal minério é muito utilizado como combustível. É formado por restos orgânicos fossilizados de vegetais. Entre os vários tipos de carvão, destaca-se o Sub-Betuminoso, que é utilizado para geração de energia elétrica. Estima-se que 40% de toda energia elétrica no mundo é gerada a partir da queima de carvão mineral.

As reservas comprovadas de carvão em 2014 são de 892 bilhões de toneladas. Isto é carvão suficiente para abastecer a demanda atual por mais de 110 anos, e é quase duas vezes o que as reservas provadas de petróleo podem abastecer. As maiores reservas provadas estão na América do Norte e do Sul, China e Europa. Uma grande vantagem do carvão em relação ao petróleo é sua distribuição quase equânime em todas as regiões, ou seja, não existe uma região hegemônica na produção potencial de carvão.

A utilização do carvão é, em suma, uma combustão. A combustão aquece a água até o nível de vapor, que movimentam turbinas que, por sua vez, movimentam os geradores elétricos, como é mostrado na planta simplificada da Figura 12.5. Do mesmo modo como ocorre na combustão dos derivados de petróleo, na combustão do carvão também há presença de vários gases, inclusive o CO_2 .

Figura 12.5 – Planta de uma usina geradora a carvão



12.2 Fontes renováveis

Fontes renováveis são aquelas que não possuem a possibilidade de se esgotar, como, por exemplo, os raios solares, as marés, a biomassa como a madeira, álcool, metano. Ao contrário das fontes não renováveis, cujas reservas necessitam de um tempo muito grande para recuperação, as fontes renováveis possuem tempo de recuperação das reservas mais rápido, o que as torna quase inesgotáveis. As principais fontes renováveis são a energia potencial da água (hidroeletricidade), a energia cinética dos ventos (energia eólica), a energia dos raios solares (energia fotovoltaica) e a energia cinética da água dos mares (maremotriz). O sol é o elemento central em todas essas fontes. Na hidroeletricidade, é necessária evaporação e chuva para encher os reservatórios; os ventos acontecem devido ao aquecimento de camadas de ar; as marés dependem dos ventos e da força gravitacional da lua e do sol. Desta forma, todas as fontes renováveis, em última análise, dependem do sol.

12.2.1 Hidroeletricidade

A hidroeletricidade aproveita a energia potencial dos reservatórios de água que possuem uma determinada elevação. A queda da água movimentada pelas turbinas responsáveis pela movimentação dos geradores de eletricidade. Tais reservatórios de água são, na realidade, reservatórios de energia, em outras palavras, os componentes água e altura compõem a energia disponível. Os reservatórios podem ser artificiais ou pode-se utilizar o próprio leito do rio – à montante em relação à usina, caso da usina hidrelétrica de Xingó, no rio São Francisco. Existem usinas de pequenos reservatórios, as chamadas usinas a fio de água. Essas usinas aproveitam mais a energia cinética na movimentação das águas dos rios do que propriamente sua energia potencial mecânica. Esta abordagem é indicada para rios que não possuem desnível acentuado. As usinas Santo Antônio e Girau, no Rio Madeira, são exemplos de usinas a fio de água, com reduzido tamanho de reservatório. Essa abordagem construtiva acarreta reduzido impacto ao meio ambiente.

A construção dos reservatórios artificiais geralmente acarreta impacto ao meio ambiente, transferência de moradores, de animais e até de cidades. O caso mais conhecido no Brasil é a formação do reservatório de Sobradinho, no rio São Francisco, no estado da Bahia. Intitulado na época como maior reservatório artificial do mundo em espelho de água, várias cidades foram inundadas na formação do lago em 1974: Remanso, Casa Nova, Santo Sé, Pilão Marcado e Sobradinho. Assim, apesar de o recurso ser renovável, as usinas hidrelétricas são muito contestadas por grupos de ambientalistas, por interferirem nos rios e, conseqüentemente, na vida dos seres que deles dependem.

A capacidade instalada das principais fontes do sistema elétrico integrado nacional em janeiro de 2018 é exposta na Tabela 12.4. Observa-se a grande predominância da geração hidrelétrica e das fontes renováveis, de uma forma geral, no Brasil.

Tabela 12.4 – Capacidade instalada do sistema elétrico brasileiro (principais fontes).

Fonte	MW	Percentual (%)
Usinas Hidrelétricas	101.130	63,11
Usinas Térmicas		
Gás natural	13.012	8,20
Biomassa	14.580	9,20
Petróleo	10.304	6,50
Carvão	3.727	2,40
Nuclear	1.990	1,30
Eólica	12.456	7,86
Solar	1.148	0,72

Fonte: ANEEL.

Vantagens da Energia Hidrelétrica

- A energia hidrelétrica é uma fonte renovável, pois está associada aos ciclos de chuvas que alimentam os rios.
- Os custos, tanto operacionais quanto de depreciação, são menores do que os dos derivados de petróleo e carvão. Além disto, o elemento básico da geração é a água dos rios, que não está diretamente sujeita a flutuações do mercado.
- A tecnologia de geração de energia é extremamente segura. Não há possibilidade de acidentes de grandes proporções.
- O reservatório, apesar dos vários impactos ao meio ambiente e a comunidades ribeirinhas, proporciona uma reserva limpa de energia, que é utilizada para períodos de baixo nível dos rios, além de poder ser utilizado para cultivo de peixes e até empreendimentos turísticos.
- A quantidade de gases de efeito estufa liberada pelas usinas, principalmente as de fio de água, é muito menor que aquela liberada pelas usinas que trabalham com queima de combustível.

Desvantagens da Energia Hidrelétrica

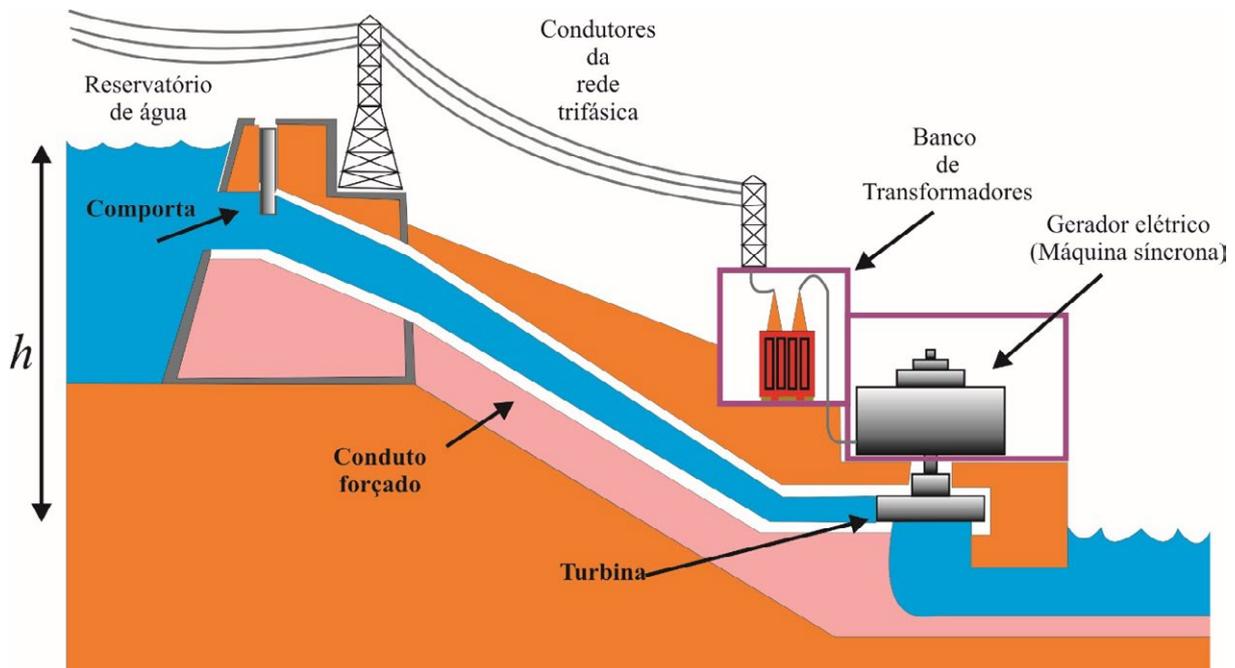
- Sempre há impacto aos rios, em menor ou maior escala, como assoreamento das margens, redução do fluxo dos rios a jusante, causando alargamento do leito primário bem como impacto em algumas espécies de peixes.
- Impacto a comunidades, que às vezes precisam ser removidas para construção de lagos.
- Dependência dos regimes de chuvas nas nascentes dos rios. Em algumas épocas do ano, os rios estão mais secos e, em outras, cheios. Além do mais, há períodos de longa estiagem, acarretados por fenômenos meteorológicos globais como *El Niño*. Nesses períodos, os rios alcançam níveis muito baixos. Nesses casos, a geração é diminuída a níveis muito abaixo da potência instalada na usina.
- Nos reservatórios, há emissões de vários gases, inclusive o CO₂, devido à decomposição de matérias orgânicas na água.

Expomos, na Figura 12.6, uma planta simplificada de uma usina hidrelétrica. O gerador é uma máquina síncrona trifásica que gira numa velocidade de cerca de 100 RPM. Em grandes usinas hidrelétricas, o rotor possui algumas dezenas de toneladas e é sustentado por um mancal com fluido comprimido. A água chega à turbina pelo conduto forçado. A turbina está atrelada ao rotor do gerador síncrono. As comportas controlam a vazão de água na turbina, que, por sua vez, sofre alteração de velocidade. A partir da velocidade da turbina, é controlada a frequência da tensão gerada. Lembre-se de que a frequência do nosso sistema elétrico é de 60 Hz. Já o nível de tensão é controlado pela corrente do enrolamento de excitação, ou enrolamento de campo da máquina síncrona. Lembre-se também de que o nível da tensão nas tomadas das nossas residências é de 220 V ou 110 V (eficaz).

Desta forma, temos o controle das duas dimensões do sistema elétrico de corrente alternada: a frequência e o nível de tensão. Manter a frequência e o nível de tensão do sistema controlados é o principal desafio da geração, pois as cargas estão sempre variando. A tensão do gerador elétrico está na faixa de 5 kV a 20 kV, dependendo do tipo de gerador.

Observando a expressão (12.1), percebe-se que a potência máxima extraída pela turbina é proporcional à vazão da água do conduto forçado. Assim, controlando-se a vazão a partir das comportas, controla-se a potência gerada. O rendimento das turbinas de grande porte está na faixa de 80% a 90% e o das de médio porte (abaixo de 100 kW), na faixa de 60% a 80%.

Figura 12.6 – Planta simplificada de uma usina hidrelétrica



$$Potencia_{max} = \eta Q \rho h g \quad (12.1)$$

Onde:

η – Rendimento da turbina.

Q – Vazão de água no conduto forçado.

ρ – Densidade da água.

h – Altura da queda de água.

g – Constante de aceleração da gravidade

12.2.2 Energia eólica

A energia eólica transforma a energia cinética dos ventos em energia elétrica. O aproveitamento da energia cinética dos ventos não é um procedimento novo. O homem, há muito tempo, já utilizava esta energia para moer grãos e bombear água. No Brasil, durante o mês de janeiro de 2018, a energia eólica correspondeu a quase 10% da capacidade do sistema

elétrico, cerca de 12.456 MW. Em 2005, a capacidade era somente 27,1 MW, daí se nota o grande avanço desse tipo de geração de energia elétrica no país nos últimos anos.

Não há uma definição precisa do potencial eólico brasileiro. O potencial eólico do litoral cearense, determinado pela Secretaria de Infraestrutura do Ceará, em 2001, utilizando softwares de geoprocessamento, a 70 m de altura e utilizando áreas onde a velocidade dos ventos são superiores a 7 m/s, foi estimado em 51.900 MWh/ano. O potencial líquido do mundo é estimado em 53.000.000 MWh/ano. O processo de geração eólica é considerado como renovável, de baixo impacto ambiental e com uma grande vantagem: “a geração se dá 24 horas por dia”.

O gerador eólico possui basicamente uma turbina e um gerador elétrico. São vários tipos de turbina e vários tipos de geradores. Genericamente, as turbinas são classificadas em dois tipos: de eixo horizontal e de eixo vertical, como mostra a Figura 12.7, logo mais adiante.

As turbinas de eixo horizontal

São as mais empregadas comercialmente. Possuem eixo na direção do vento, como mostrado na Figura 12.7 (a).

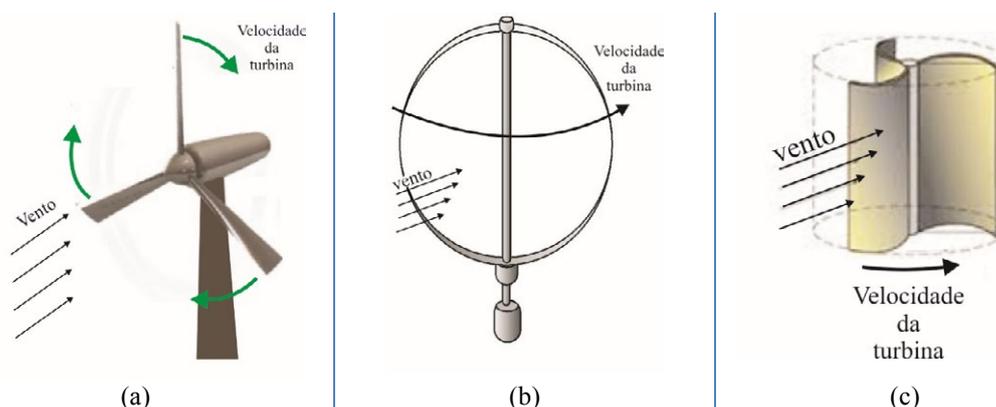
Vantagens das turbinas de eixo horizontal

- Podem ser construídas em torres muito altas, o que permite alcançar alturas onde a velocidade do vento é mais alta.
- Mais eficiente que as de eixo vertical.

Desvantagens das turbinas de eixo horizontal

- Mudança da paisagem, principalmente em parques que possuem dezenas e até centenas de geradores com estruturas muito pesadas.
- Nas variações de velocidade dos ventos, é necessário controle dos ângulos das pás ou controle por *Stall*.
- Necessária a parada em casos de ventos muito fortes.
- Necessário controle de ajuste ao sentido de maior componente da velocidade do vento.

Figura 12.7 – (a) Turbina de eixo horizontal, (b) Eixo vertical Darrieus, (c) Eixo vertical Savonius



As turbinas de eixo vertical

As turbinas de eixo vertical possuem duas variantes principais – as turbinas Darrieus, mostradas na Figura 12.7 (b), e Savonius, mostrada na Figura 12.7 (c).

Principais vantagens

- Não necessitam de controle de ajuste ao sentido de maior componente da velocidade do vento.
- São mais baixas, sendo mais fáceis de manutenção.
- Necessitam de pouca velocidade de vento para começar a operar.

A grande desvantagem é a eficiência mais baixa em relação à de eixo horizontal.

A potência recuperável pela turbina se relaciona com a área circular das pás e com a velocidade do vento, conforme se vê pela expressão (12.2). Percebe-se que a potência recuperável é proporcional à velocidade do vento ao cubo. Esse é o grande limitador da energia eólica, posto que, somente em algumas regiões, com velocidades médias anuais acima de 7 m/s, o investimento vale a pena. Apenas algumas regiões brasileiras possuem potencial eólico para geração em escala comercial. O litoral do Nordeste, especificamente de Pernambuco ao Ceará, possui um potencial muito grande, com uma média de ventos anuais, em alguns lugares, em torno de 9 m/s, a 50 metros de altura. Há inúmeros parques de geração eólica no litoral nordestino. Além de a viabilidade estar ligada ao valor médio da velocidade dos ventos, existe um fator importante a ser levado em consideração: a descontinuidade na velocidade dos ventos durante o ano. Existem épocas do ano em que as velocidades dos ventos são maiores – no Brasil, geralmente nos meses de julho, agosto e setembro.

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3 \quad (12.2)$$

Onde:

P – potência recuperável (watts)

ρ – Densidade do ar (kg/m^3)

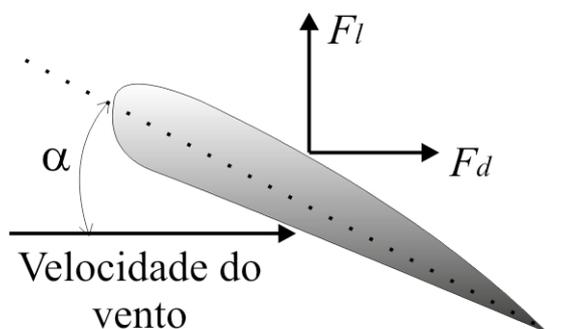
A – Área circular gerada pelo movimento das pás (m^2)

V – Velocidade do vento (m^3)

A transformação da energia cinética nas turbinas se dá pelo aproveitamento da força do vento sobre as pás. O contato do vento nas pás resulta na ação de duas forças: Força de sustentação – F_l e a Força de arrasto – F_d , como mostrado na Figura 12.8. A força F_l é uma resultante que faz girar a pá; e a Força F_d empurra a pá na direção do eixo da turbina. A relação de F_d e F_l depende de vários fatores, como ângulo de ataque – α , largura da pá, velocidade de vento. Grandes turbinas eólicas maximizam F_l e minimizam F_d , alterando o ângulo de ataque. Em pequenas turbinas, é comum ângulo de ataque fixo, ou seja, não há movimentação das pás ao longo do seu eixo. A literatura técnica utiliza $\alpha = 5^\circ$ como valor aceitável em pás fixas. O aumento do ângulo de ataque aumenta o valor de F_l , no entanto, num determinado valor de α , F_l atinge um máximo e começa a diminuir. Nesse caso, diz-se, na literatura técnica, que a turbina entra em *stall*, ou seja, há perda de sustentação. Esta força

de sustentação é também encontrada nas asas dos aviões. Os aviões necessitam de uma determinada velocidade para manter a sustentação. Abaixo dela o avião cai.

Figura 12.8 – Forças atuantes nas pás da turbina



As forças de sustentação tendem a ser maiores nas extremidades das pás (extremidade mais distante do eixo da turbina); conseqüentemente, a velocidade das pás nessas extremidades é também maior.

A velocidade da pá num determinado ponto r é mostrado em (12.3). No projeto das turbinas de eixo horizontal, a largura das pás vai diminuindo em direção à sua extremidade. Isso evita que as extremidades possuam força de sustentação muita alta; em outras palavras, garante uma melhor distribuição das forças de sustentação, melhorando a eficiência da turbina.

$$V_p = w r \quad (12.3)$$

Onde:

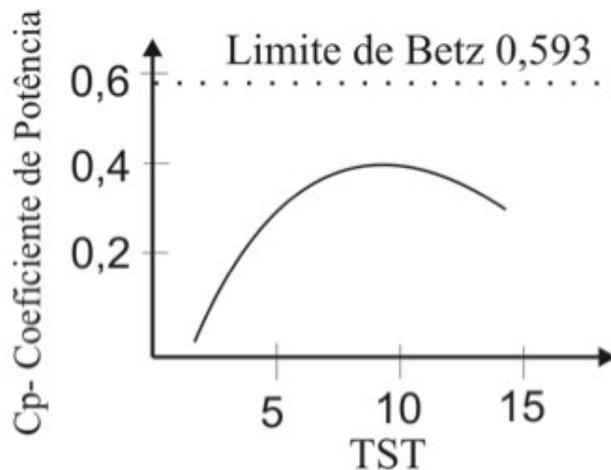
V_p – velocidade linear de giro da pá (m/s)

w – velocidade angular da turbina (rad/s)

r – distância do eixo ao ponto de cálculo de V_p (m)

A relação entre a velocidade da extremidade da pá e a velocidade do vento é conhecida como *Tip Speed Ratio* (TSR) – λ (12.4). O parâmetro *TSR* é uma característica do tipo de turbina. Turbinas mais rápidas possuem *TSR* maiores. Na Figura 12.9, são mostrados os valores de C_p versus *TSR* para turbina de 3 pás fixas. Nem toda energia recuperável é aproveitada pela turbina. O coeficiente de potência C_p é a fração de energia recuperável que pode ser disponível no eixo da turbina. Assim, um $C_p = 0,4$, por exemplo, implica que somente 40% de toda energia contida no vento naquela área da turbina pode ser capturada pela referida turbina. Em outras palavras, para se ter a potência disponível no eixo da turbina, neste caso, multiplica-se a expressão (12.2) por 0,4. O valor limite de 0,593, conhecido por coeficiente de Betz, é um valor teórico máximo que pode ser aproveitado pela turbina. Na prática, os C_p estão muito abaixo deste valor.

$$\lambda = \frac{wR}{V} \quad (12.4)$$

Figura 12.9 – Valores de C_p versus TSR para turbinas de eixo horizontal de 3 pás fixas

PRÁTICAS NA SALA DE AULA

- Qual o tamanho de uma turbina de eixo horizontal de 1kW, para ser utilizada numa região que possui velocidade média de ventos de 4m/s?
Admita $\rho = 1\text{kg/m}^3$, $C_p = 0,4$.
- Elabore uma tabela para essa turbina citada na questão anterior, com a potencia dispon/ivel pela mesma turbina para as seguintes velocidades: 1 m/s, 2 m/s, 3m/s, 4 m/s, 5 m/s, 6 m/s, 7 m/s, 8 m/s, 9 m/s, 10 m/s.

12.2.3 Energia solar

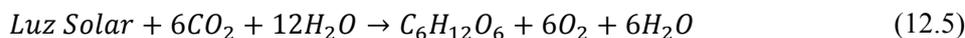
De certa forma, como já foi dito, toda energia provém, direta ou indiretamente, do sol. A energia dos raios solares pode ser aproveitada de diversas formas. Diversas tecnologias visam transformar a energia solar numa energia mais manipulável, caso da eletricidade, que se pode armazenar e utilizar para diversos fins. A seguir, serão descritas essas tecnologias, tendo como foco a energia fotovoltaica a estado sólido, a tecnologia mais popular e que mais avançou nos últimos anos.

Classificações das tecnologias de aproveitamento da energia solar:

Fotossíntese

Fotossíntese é um processo desenvolvido pelos seres clorofilados para obtenção de energia. A fotossíntese como processo químico, visto em (12.5), é extremamente atrativo, pois utiliza água, CO_2 e luz solar; em outras palavras, captura o CO_2 resultante das combustões. O resultado é O_2 e moléculas de carboidrato (energia armazenada). A fotossíntese é importante, pois é complementar à respiração dos seres vivos, mantendo os

níveis de oxigênio na terra. O processo fotossintético foi/é importantíssimo para o processo de evolução dos seres vivos, pois ela é realizada pelos seres da base da cadeia alimentar. Embora a fotossíntese seja um processo simples, não é trivial, já que há presença de diversas enzimas. A fotossíntese artificial é um termo muito genérico. Está associada a qualquer processo que vise capturar a luz solar numa resultante de ligações químicas em compostos combustíveis.



Energia solar para aquecimento de água

A energia solar utilizada diretamente para aquecimento de água é um processo extremamente simples e de baixo custo. Alguns sistemas podem ser construídos com materiais fáceis de conseguir. Dois sistemas se destacam:

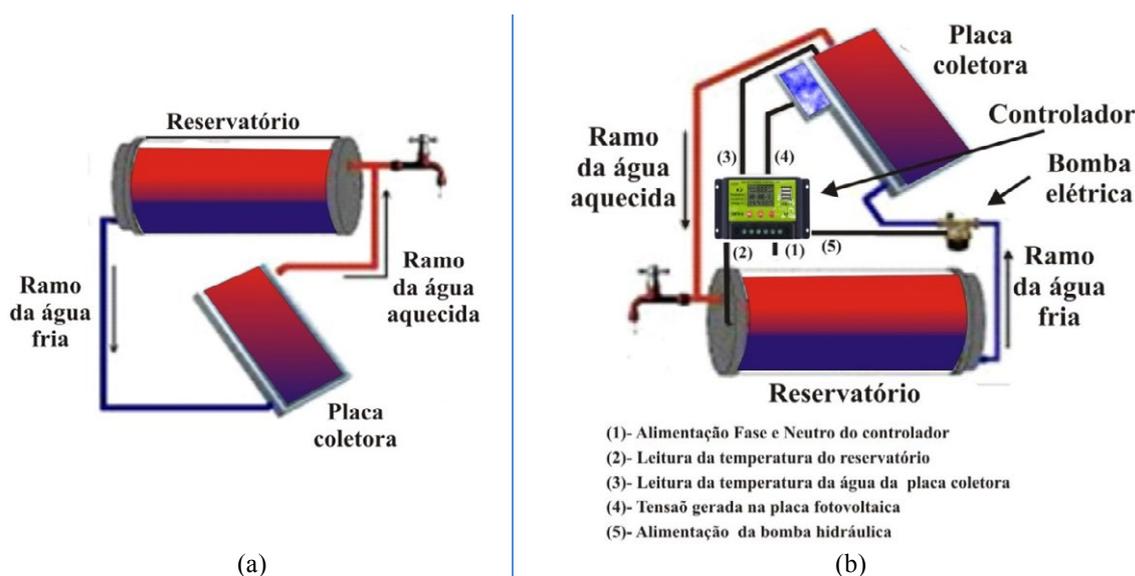
Sistema com reservatório acima do coletor

Utiliza a convecção natural, mostrado na Figura 12.10 (a). Este tipo de sistema pode ser construído a partir de um coletor com base negra – com a finalidade de absorção do calor dos raios solares – sobreposto a uma malha de capilares, com diâmetro o menor possível, por onde a água circula. O objetivo é aumentar ao máximo a área de contato da água com os capilares e, assim, aquecer a água por condução. Aproveita-se, neste caso, a movimentação da água por convecção, ou seja, a água quente, menos densa, sobe; a água fria, mais densa, desce.

Sistema com reservatório abaixo do coletor

Utiliza bomba elétrica para forçar o ciclo da água, mostrado na Figura 12.10 (b). Geralmente as bombas elétricas são alimentadas por fontes de energia solar fotovoltaica. Um controlador controla a bomba, para obtenção da temperatura da água, dentro do reservatório.

Figura 12.10 – (a) Sistema de reservatório acima do coletor; (b) Sistema de reservatório abaixo do coletor



Energia Solar térmica concentrada

Energia térmica concentrada consiste em um sistema que concentra os raios solares num ponto pequeno para aquecer um fluido. Esse fluido circula num circuito fechado e pode ser utilizado para armazenar calor para horas sem sol. O fluido aquece a água, em outro circuito, até o ponto de vapor. Esse vapor movimentava uma turbina que, por sua vez, movimentava o gerador elétrico. Para tal processo, são necessários espelhos refletores, o que exigirá, portanto, áreas de grandes dimensões para sua instalação. Esses espelhos concentram os raios no coletor por onde circula o fluido. O sal fundido pode ser utilizado para armazenagem de calor. Esse sistema pode ser utilizado de forma híbrida com outras fontes combustíveis, principalmente biomassa, já que o processo de aquecimento da água pode ser reconfigurado.

Energia fotovoltaica

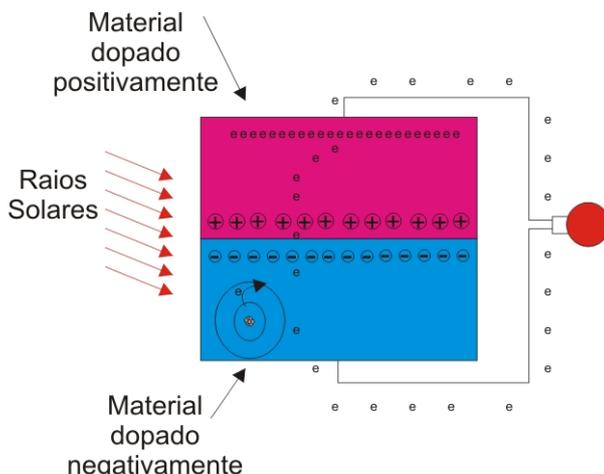
Energia fotovoltaica transforma a luz diretamente em energia elétrica. A base desse processo é o efeito fotoelétrico, estudado por Becquerel, por volta de 1839. A luz é uma onda eletromagnética que possui energia. A luz é composta de *fótons*. Fótons são pacotes de energia que dependem da frequência da onda eletromagnética. A Figura 12.11 mostra, simplificada, o comportamento da célula fotoelétrica. Os raios solares atingem os átomos do material.

O efeito da absorção de energia se dá pela mudança do elétron para uma camada mais externa. Nessas camadas, os elétrons tendem a ficar mais livres. Normalmente esses elétrons voltariam à sua camada de origem, liberando energia na forma de calor, no entanto, a junção de dois materiais dopados de cargas elétricas diferentes cria um campo elétrico que empurra os elétrons para um lado da junção. Lembre-se da força entre cargas elétricas “cargas elétricas iguais se repelem, cargas elétricas diferentes se atraem”.

Assim, de um lado da junção, há excesso de cargas positivas e, no outro lado, excesso de cargas negativas. Quando se liga uma carga externa, uma lâmpada, por exemplo, esses elétrons irão percorrer esta carga externa, realizando trabalho, gerando calor, ligando lâmpadas. Os elétrons voltam a sua condição inicial, seguindo o condutor, quando serão excitados por raios solares novamente, iniciando um novo ciclo. Isto acontece com milhões de elétrons na junção – quanto mais luz, mais elétrons. O que se percebe é que a célula fotovoltaica é uma fonte de corrente, cuja intensidade depende da intensidade da luz. Quanto mais luz, mais elétrons, mais corrente. Um painel fotovoltaico é formado por dezenas de células ligadas em série ou paralelas.

As células fotovoltaicas foram desenvolvidas na década de 1950, pesquisa e trabalho impulsionados pela corrida espacial entre Estados Unidos e a antiga União Soviética. Em 1958, o primeiro satélite artificial alimentado por células fotovoltaicas, *Vanguard I*, foi lançado ao espaço, pelos Estados Unidos. Até hoje o *Vanguard I* ainda permanece em órbita, mas sem funcionamento. Atualmente todos os satélites artificiais são alimentados por painéis fotovoltaicos. A importância das células fotovoltaicas é gigantesca nesse aspecto, pois ninguém imagina o mundo sem os satélites artificiais, sem a comunicação global, que se tornou essencial para nossa vida. Sem as células fotovoltaicas, não existiriam transmissões de TV e telefonia internacionais, GPS, e até a internet seria muito limitada.

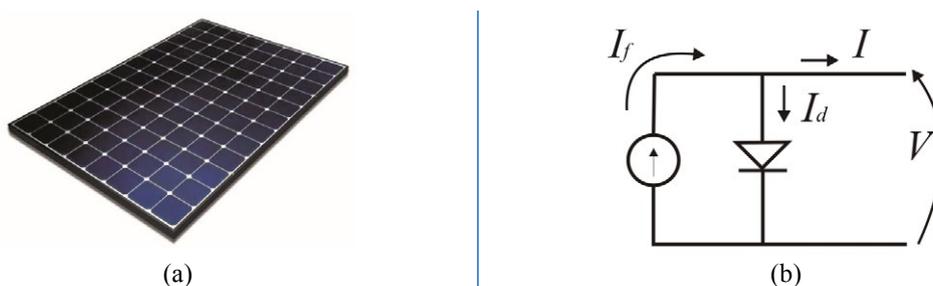
Figura 12.11 – Célula Fotovoltaica



Modelo Ideal do Painel Fotovoltaico

O modelo elétrico do painel ajuda a compreendê-lo e a lidar com ele. Modelo ideal, visto na Figura 12.12 (b), é um modelo simplificado, sem perdas, o que significa que as resistências tanto em série quanto em paralelo são desprezadas. Este modelo é formado por uma fonte de corrente controlada pela intensidade dos raios luminosos mais um diodo em paralelo. A lei de Kirchhoff para as correntes aplicada no nó revela que a corrente do painel, para o valor de intensidade luminosa em que foram feitos os ensaios do fabricante, é a corrente da fonte menos a corrente do diodo, como mostrado em (12.6) e (12.7).

Figura 12.12 – (a) Painel Fotovoltaico comercial monocristalino de 330 watts; (b) Modelo simplificado de um painel fotovoltaico



$$I = I_f - I_d \tag{12.6}$$

$$I = I_{sc} - I_{sc} e^{\frac{V - V_{oc}}{V_t}} \tag{12.7}$$

Onde:

I – Corrente do painel.

I_i – Intensidade luminosa a que está disposto o painel.

I_{sc} – Corrente de circuito fechado, no ensaio realizado com fonte de intensidade luminosa h_j .

V_{oc} – Tensão de circuito aberto, no ensaio realizado com fonte de intensidade luminosa h_j .

h_j – Intensidade do ensaio de laboratório, geralmente 1000 watts/m^2 .

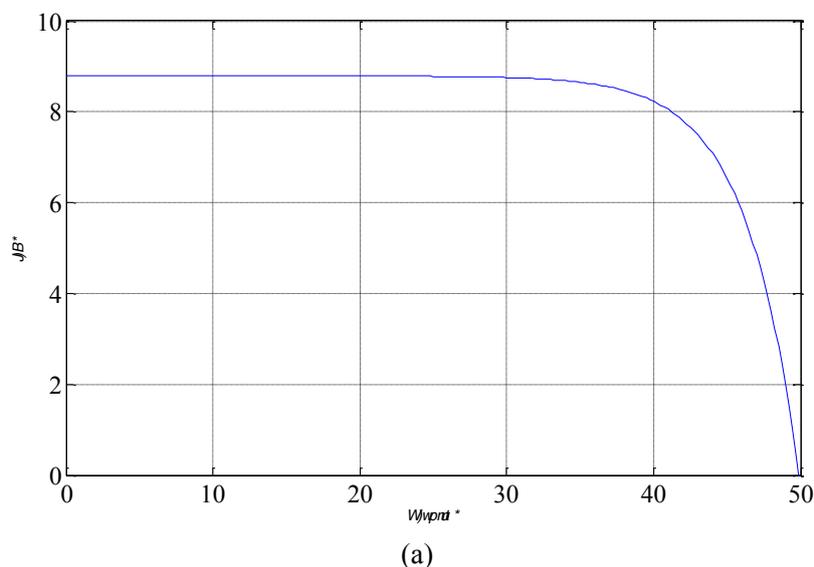
V_t – Potencial térmico – dependente da temperatura do painel.

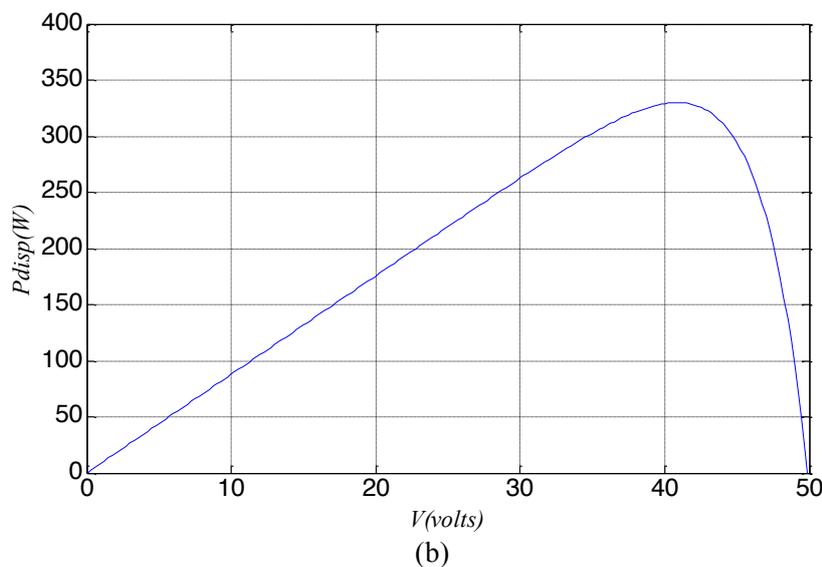
Os fabricantes fornecem os valores dos parâmetros I_{sc} , V_{oc} e h_j . O valor de V_t pode ser determinado por aproximação, pelos dados fornecidos do ensaio pelos fabricantes. A característica de corrente fornecida pelo painel *versus* tensão nos terminais é mostrada na Figura 12.13 (a), para um painel comercial de 330 watts e com parâmetros $I_{sc} = 8,79 A$, $V_{oc} = 49,9 V$ e $h_j = 1000 \text{ watts/m}^2$. A potência disponível pelo painel é $P_{disp} = VI$, ou seja, a cada ponto multiplica-se corrente pela tensão, o que resulta no gráfico da Figura 12.13 (b).

Observa-se que existe um ponto onde o painel opera com o máximo de potência disponível, no caso, com pouco mais de 40 volts. Para cada intensidade luminosa, existe um ponto diferente de máxima transferência de potência. Uma aplicação eficiente de painéis fotovoltaicos procura conduzir o sistema para este ponto em que o painel possui eficiência máxima. Este procedimento é chamado de *Maximum Power Point Traking* – MPPT e foge ao escopo deste livro.

A temperatura de operação do painel influencia muito em seu rendimento; em geral, este último diminui com a temperatura do painel. O ideal é que os painéis operem com incidência solar alta, mas com temperaturas dos painéis fotovoltaicos não tão altas. O coeficiente que mostra esta tendência é descrito pelos fabricantes de painel como variação da potência máxima por aumento de um grau centígrado. Este coeficiente está por volta de $0,5 \frac{\%}{^\circ C}$, implicando que há uma redução de 0,5% da potência máxima do painel para cada aumento de um grau centígrado desse mesmo painel, logo, um painel que opera a uma temperatura de $10^\circ C$ a mais possui, em média, um rendimento de 5% a menos.

Figura 12.13 – (a) Característica corrente *versus* tensão terminal de um painel fotovoltaico comercial de 330 W; (b) Característica potência disponível *versus* tensão terminal do mesmo painel fotovoltaico

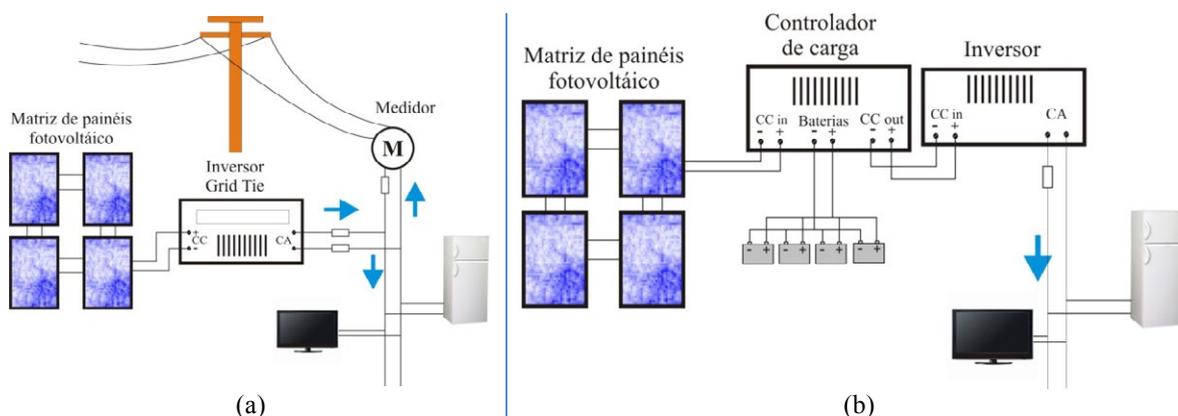




O moderno conceito de fótons foi desenvolvido por Albert Einstein na primeira década do século XX. Fóton é a menor unidade que compõe não só a luz mas toda radiação eletromagnética, como ondas de rádio, as diversas luzes do espectro visível, infravermelho, micro-ondas e outros. Duas características importantes do fóton são: não possuir carga elétrica e nem massa. No vácuo (espaço vazio), os fótons se movem na velocidade da luz, sem nenhuma resistência.

Os dois principais sistemas que utilizam a geração a partir de células fotovoltaicas são sistemas conectados à rede (*on grid tie*) e sistemas isolados (*off grid*). Existe a possibilidade de haver sistemas híbridos, que possuem as duas características, mas neste livro serão enfocados somente os dois sistemas principais. Na Figura 12.14, são mostradas as plantas simplificadas desses dois sistemas.

Figura 12.14 – (a) Sistema *on grid tie*; (b) Sistema *off grid tie*



- **Sistema conectado à rede**

O sistema conectado à rede, mostrado na Figura 12.14 (a), possui um conversor estático ligado entre os painéis fotovoltaicos e a rede da concessionária. Conversores estáticos, já mencionados no capítulo referente a cargas elétricas residenciais, são equipamentos que utilizam chaves eletrônicas para realizar o fluxo de energia entre dois sistemas elétricos – no caso, entre os painéis e a rede da concessionária. Para tornar mais eficiente este fluxo de energia gerada pelos painéis para a rede da concessionária, um bom conversor *grid tie* executa três funções:

- I – Opera os painéis no seu ponto operacional ótimo para aquela intensidade luminosa a que os painéis estão submetidos. Isto é conseguido, como já foi mencionado, a partir do procedimento MPPT, que procura o ponto de máxima eficiência dos painéis.
- II – Injeta potência ativa na rede, sem sujeiras (harmônicos e reativos). O conversor controla a corrente que está enviando para rede de tal forma que ela seja senoidal, ou seja, senoidal com frequência operacional da rede da concessionária. Além do mais, esta corrente deve estar em fase com a tensão da concessionária. O segundo requisito garante que o conversor esteja mandando somente potência ativa para a rede.
- III– Protege contra inversão de ligação, baixa e alta tensão de entrada, curto circuito, sobrecarga e sobreaquecimento das chaves estáticas.

Este sistema *on grid tie* apresenta 3 situações de funcionamento em relação à rede da concessionária:

- I – Quando a potência gerada é igual às cargas elétricas da unidade consumidora: Neste caso, o medidor não irá medir nenhuma energia consumida.
- II – Quando a potência gerada é maior que as cargas elétricas da unidade consumidora: Neste caso, parte da energia que não está sendo consumida será enviada para o sistema elétrico da concessionária. Se o medidor for bidirecional, haverá o registro de crédito para o proprietário.
- III– Potência gerada menor que as cargas elétricas da unidade consumidora: Neste caso, a parte restante da energia destinada a suprir as cargas elétricas será enviada pela concessionária. O medidor da concessionária registrará um consumo menor, o que vai ser traduzido por uma fatura de energia elétrica de menor valor.

- **Sistema isolados**

Os painéis nem sempre estão operando na sua plena carga. Às vezes, uma nuvem que encobre as placas, em dias de chuva, e a própria escuridão da noite são causas que provocam a não geração de plena carga. No sistema isolado, não há a rede da concessionária para suprir energia nessas condições (ver Figura 12.14 (b)). O sistema precisa acumular energia para suprir as cargas nos momentos de baixa geração dos painéis. Para isto, utilizam-se bancos de

baterias, as quais são carregadas nos momentos de maior incidência solar, suprimindo as cargas elétricas quando essa incidência é menor. O componente responsável pela administração do sistema isolado é o controlador de carga. Um bom controlador de carga é responsável pelas seguintes funções:

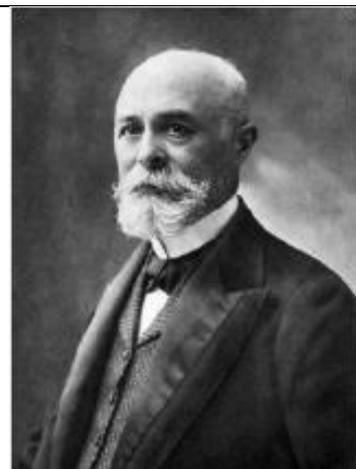
- I** – Assim como o conversor *grid tie*, o controlador de carga opera os painéis no seu ponto operacional ótimo para aquela intensidade luminosa a que os painéis estão submetidos, utilizando para isto o procedimento MPPT.
- II** – Controle, propriamente dito, da carga das baterias. Estas, como já foi dito no Capítulo 3, possuem um nível de carregamento conhecido como estado da carga ou SOC. Para se aumentar a vida útil física da bateria, é necessário não deixar que ela descarregue abaixo de um SOC mínimo, nem carregá-la acima de um SOC máximo. Alguns trabalhos apontam para um SOC mínimo de 20% e um SOC máximo de 95%, outros 10% a 90%. Esses valores dependem de vários fatores, como temperatura, o tipo de carga elétrica alimentada pelo controlador, se é motor, lâmpadas e outros.
- III**– Conduzir o processo de carregamento, que pode ser, ou por controle de corrente, ou por controle de tensão. Em outras palavras, desempenhar a função de regular a tensão e ou regular a corrente para a bateria e para a saída de corrente contínua.
- IV**– Proteger contra inversão de ligação, baixa e alta tensão de entrada, curto circuito e sobrecarga bem como sobreaquecimento das chaves estáticas.

Se as cargas elétricas a serem supridas funcionarem em corrente alternada, haverá necessidade de um inversor, como mostrado na Figura 12.14 (b). Um inversor é um conversor estático que transforma tensão contínua em alternada. Se, no entanto, as cargas elétricas a serem supridas funcionarem em corrente contínua, essas serão alimentadas diretamente pelo controlador de carga, pela saída CC.

As funções descritas no texto para o controlador de carga e para o conversor *grid tie* ditam a qualidade desses equipamentos. Equipamentos de baixo custo talvez não possuam todas essas funções descritas.

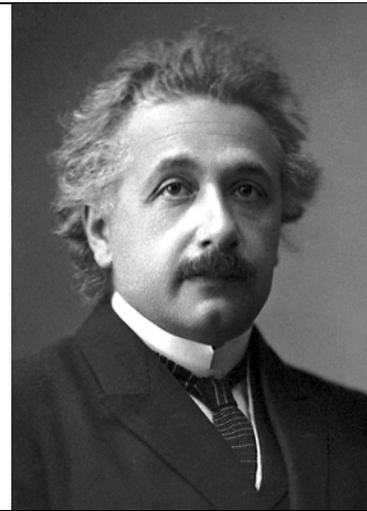
Alexandre Edmond Becquerel (1820-1891)

Físico nascido na França. É conhecido como o primeiro a observar o efeito fotoelétrico em 1839. Esse efeito é a base das células fotovoltaicas atuais. Possui estudos em vários campos da óptica, magnetismo e eletricidade. Possui trabalhos publicados relacionados ao efeito da fosforescência e luminescência. É mais conhecido pelo primeiro experimento relacionado com o efeito fotoelétrico. Aos 19 anos observou que eletrodos de platina mergulhados numa solução ácida, iluminada por luz, principalmente, ultravioleta, era capaz de gerar um certo potencial elétrico.



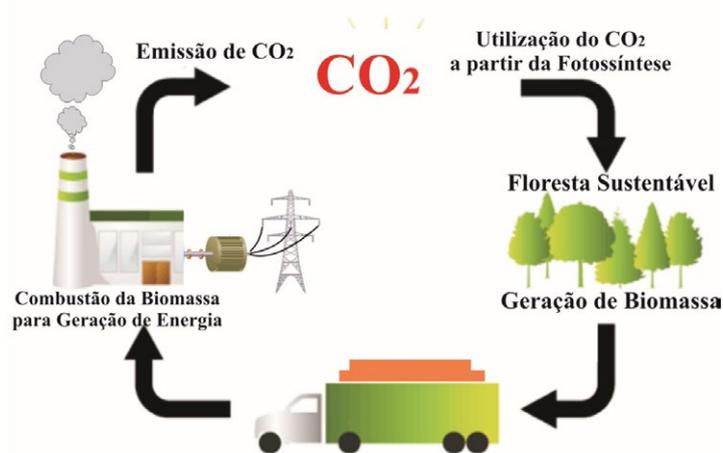
Albert Einstein (1879-1955)

Físico alemão de origem judaica, é responsável por inúmeras contribuições para a física moderna, entre elas teoria da relatividade, equações de campo gravitacional, teoria dos fótons, equivalência massa-energia. Recebeu prêmio Nobel em 1921 pelas contribuições na teoria dos fótons. Com a ascensão de Adolf Hitler na Alemanha, Einstein fixou residência nos Estados Unidos, onde ficou até sua morte. É considerado um dos maiores cientistas do século XX.

**12.2.4 Biomassas**

Biomassa é um termo que se refere a combustíveis provenientes de seres vivos (vegetais e resíduos de animais) e que necessitam de pouco tempo para sua produção. Algumas fontes consideradas biomassas, como a madeira utilizada para combustão, são utilizadas já há milhares de anos pelos nossos ancestrais. É considerada fonte renovável por causa do tempo rápido de produção em comparação ao petróleo, que necessita de milhões de anos para sua produção. Outro fator a favor das biomassas é a captura de CO_2 utilizada pelos vegetais durante sua vida. Este CO_2 pode ser contabilizado da combustão da biomassa, criando reservas de energia, com um viés de consumo desse gás de efeito estufa (ver Figura 12.15). Esse sistema é o oposto do desmatamento, que utiliza vegetais nativos, sem a preocupação do replantio, o que torna um sistema não sustentável. É bom lembrar que as combustões das biomassas assim como a combustão dos derivados de petróleo liberam CO_2 .

Figura 12.15 – Consumo sustentável de biomassa



Principais fontes provenientes de Biomassas

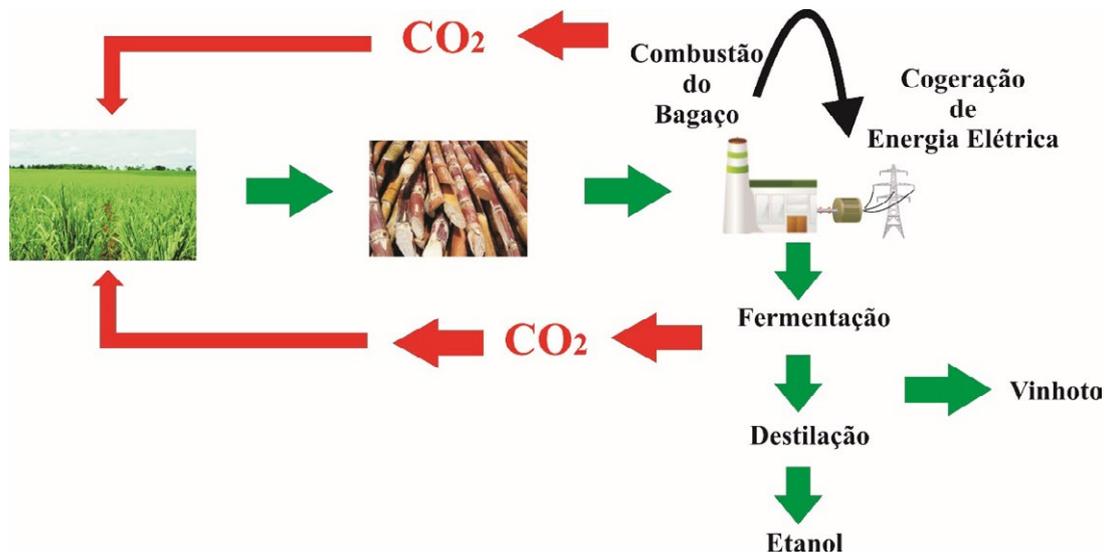
Álcool

Apesar de existirem vários álcoois, voltemos nossa atenção para o etanol que é o mais comum pela possibilidade comercial de utilização em motores a combustão que utilizam gasolina. É produzido a partir da fermentação de açúcares provenientes da cana de açúcar, beterraba e milho. Especificamente no Brasil se utiliza a cana de açúcar, na Europa predomina a beterraba e nos Estados Unidos o milho. Atualmente, os Estados Unidos é o maior produtor de etanol do mundo e o Brasil o segundo. A cana de açúcar é a matéria-prima mais eficiente na produção de etanol. Em termos de balanço de energia, o milho produz 1,3 unidades de energia para cada unidade total de energia utilizada na produção; já a cana de açúcar é extremamente eficiente – produz 8 unidades de energia para cada unidade total utilizada na produção, de acordo com o artigo “Biofuel Compared” (National Geographic). Em comparação com a gasolina, o etanol reduz em até 89% as emissões de CO₂, devido à captura de CO₂ na fotossíntese durante a vida do vegetal. É bom frisar que o processo mais comum de produção do etanol é a partir da fermentação do caldo da cana. Existem processos mais avançados que utilizam a biomassa da cana (bagaço) para produção do etanol.

O Brasil é um dos grandes incentivadores da utilização do etanol devido à eficiente adaptação da cana de açúcar no território brasileiro. Planta originada do sul da Ásia, a cana de açúcar foi introduzida no Brasil no século XVI. Na década de 1970, quando o petróleo passou por crises e seu preço aumentou significativamente, o governo brasileiro lançou o PROALCOOL, um programa de incentivo tanto da indústria produtora de etanol quanto das montadoras de veículos. Grande parte dos aditivos químicos e da tecnologia dos veículos para a utilização do etanol foi desenvolvido no Brasil. Hoje a gasolina vendida no Brasil vem com adição de 25% de etanol, e praticamente todos os veículos automotores nacionais possuem tecnologia bicombustível (*Flex*).

A produção do Etanol no Brasil quase sempre vem acompanhada de cogeração de energia elétrica nas usinas. O bagaço da cana é utilizado como combustível para tornar o processo mais eficiente, como mostra a Figura 12.16. Outro subproduto da produção do etanol é o vinhoto ou vinhaça. Este líquido é composto de uma mistura de várias substâncias orgânicas e inorgânicas em que predomina o potássio. Para cada litro de etanol são produzidos 13 litros de vinhoto. Este subproduto pode ser aproveitado para produzir fertilizantes, ração e para produção de biogás. Por muito tempo, o vinhoto era lançado nos afluentes, sem atenção do Estado brasileiro. Hoje o vinhoto é caracterizado como agente poluidor, devido a sua composição orgânica e sua acidez (PH baixo). A composição orgânica consome o oxigênio dos mananciais, afetando, desde a base da cadeia alimentar, até as pessoas das comunidades ribeirinhas.

Figura 12.16 – Planta simplificada da produção de Etanol



Vantagens da utilização do etanol

- Rápido ciclo de crescimento da planta, de 270 a 360 dias.
- Consumo de CO₂, por fotossíntese, durante o ano de crescimento do vegetal, permitindo abater das emissões posteriores da combustão e do processo de fermentação.
- Processo produtivo do álcool muito eficiente, com utilização de resíduos para cogeração na indústria.

Desvantagens da utilização do Etanol

- Sujeito a flutuações do mercado, devido ao preço do petróleo, do açúcar e de muitos outros produtos cuja matéria-prima é o etanol, por exemplo, perfumes, tintas, solventes e muitos outros.
- Necessidade de grandes extensões de terra.
- Utilização de defensivos e fertilizantes nas lavouras. Tais produtos podem poluir rios e lençóis freáticos.

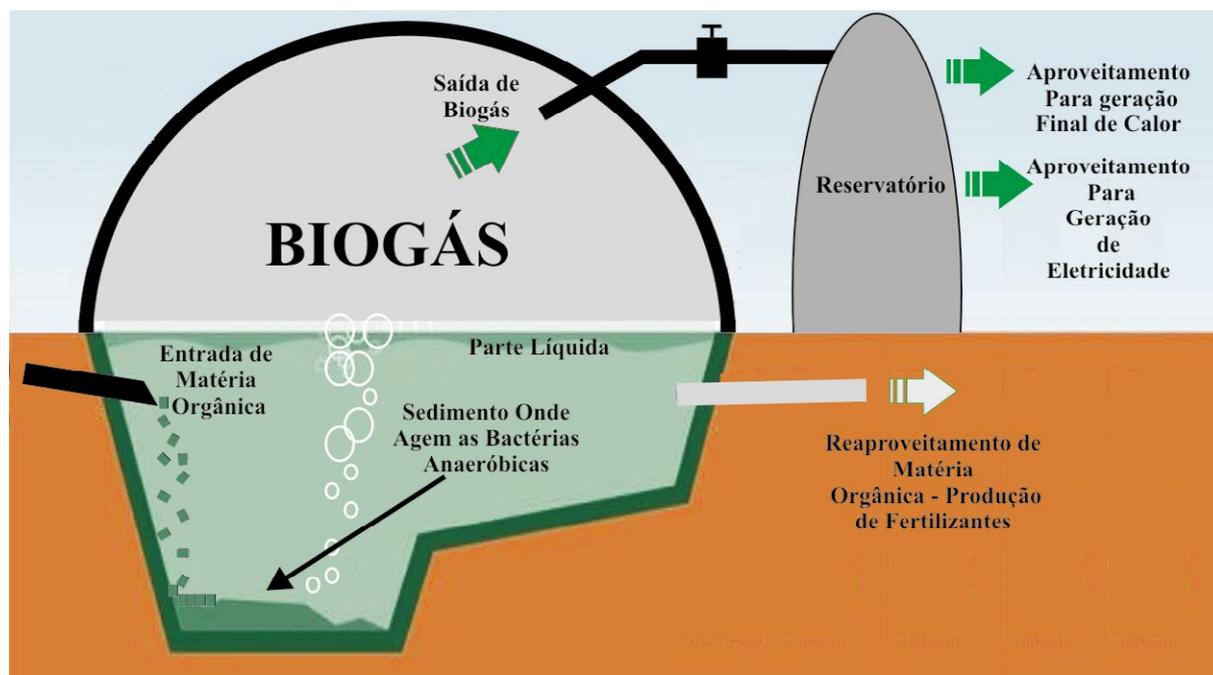
Biogás

O termo Biogás se refere à composição de gases produzidos pela quebra de matéria orgânica na ausência de oxigênio. Entre os gases que compõem esta mistura, estão o CO₂ e, predominantemente, metano (CH₄). O agente principal do processo de produção do biogás são as bactérias anaeróbicas que digerem a matéria orgânica, que pode ser vegetal e dejetos e restos de animais. O Biogás é extremamente inflamável. Sua combustão pode ser utilizada

para diversos propósitos, como geração final de calor, tração mecânica e produção de energia elétrica.

O biogás pode ser encontrado em processos naturais, por exemplo, nos intestinos dos seres vivos, ou pode ser produzido a partir dos biodigestores industriais. É comum ver-se, na literatura técnica, a prática de se associar a produção de esterco diário de um animal bovino a 3 kWh de energia elétrica disponível. Daí se observa o potencial dessa fonte de energia. A grande vantagem não é, entretanto, a produção de energia em si. O metano é um gás de efeito estufa de poder de retenção da radiação muito maior que o CO_2 . A combustão do metano gera CO_2 e água. O dióxido de carbono é um gás estufa muito menos danoso que o metano. Outro fator a considerar é que o armazenamento de dejetos de animais no solo, além de contribuir para a poluição, ocasiona a produção de óxido nitroso (N_2O), que tem efeitos piores que o metano. Assim, a produção de biogás, a partir de biomassa, traz muitas vantagens ao meio ambiente (diminuição de metano e óxido nitroso, por exemplo), além de ser uma fonte renovável de energia. Na Figura 12.17 é mostrada a planta genérica de um biodigestor. Observe que a parte líquida do biodigestor garante a ausência de oxigênio nas camadas mais baixas, onde há ação das bactérias anaeróbicas. A parte orgânica líquida pode ser aproveitada para produção de fertilizantes, como mostra a planta da Figura 12.17.

Figura 12.17 – Planta de um biodigestor



As bactérias, comumente associadas a doenças, são, neste caso, benéficas. Elas aceleram o processo de decomposição da matéria orgânica. Se essa matéria orgânica, não decomposta, fosse lançada nos rios e lagos, seria um desastre, pois haveria o aumento de micro-organismos que consumiriam o oxigênio disperso na água, afetando todo o equilíbrio da fauna e da flora do ecossistema.

Lenha para Combustão

Este combustível é, sem dúvida, a forma de obtenção de energia mais antiga da história. Está relacionado ao domínio do fogo, e era com a lenha e o fogo que nossos ancestrais se aqueciam, cozinhavam e se defendiam de animais. Atualmente, apesar de o ser humano ter dominado várias fontes de energia, relatórios da FAO de 2010 apontam a lenha como a principal fonte de energia utilizada pelas pessoas para se aquecer e cozinhar. Essa estatística é confirmada pela presença maciça da lenha na vida das pessoas, em países pobres e em desenvolvimento. Não é muito claro afirmar, todavia, que essas pessoas sejam responsáveis pelo desmatamento presente nesses países, posto que a utilização da madeira se dá, na maioria das vezes, de material já morto. O agronegócio não sustentável é, sem sombra de dúvidas, o grande responsável pelo desmatamento desenfreado em vários países.

O carvão da madeira é um produto elaborado pela queima da madeira bruta na presença de baixos índices de oxigênio. É composto praticamente de carbono e apresenta uma cor preta e aspecto desidratado. A grande vantagem do carvão de madeira é que ele produz mais calor e energia por Kg que a madeira, sendo mais eficiente sua estocagem.

O sistema de geração a partir da madeira é obtido por sua queima e aproveitamento do calor para aquecer a água que é utilizada em turbinas e geradores.

As florestas sustentáveis são opções interessantes para geração de energia, pois, como já foi frisado, o CO₂ da combustão da madeira é absorvido, em parte, pela floresta. Ainda assim, são necessárias grandes áreas para uma geração sustentável.

12.2.5 Biodiesel

Biodiesel é uma designação genérica de óleos destinados à substituição do diesel derivado de petróleo. É produzido a partir de óleos de alguns vegetais, como soja, semente de girassol, amendoim, mamona, dendê e muitos outros. Também pode ser produzido a partir de óleos reciclados e óleos de origem animal. O processo de produção do biodiesel é, *grosso modo*, uma separação do metil-éster (biodiesel) da glicerina (que pode ser utilizada para produzir sabões), ambos presentes nos óleos vegetais e gordura animal. Grande parte da matéria-prima para produção do biodiesel no Brasil é representada pela soja.

O biodiesel obteve um impulso grande na última década, nos Estados Unidos, sendo produzido em larga escala para a tração veicular. Esse combustível, contudo, pode ser perfeitamente utilizado para geração de energia elétrica. A qualidade do biodiesel chegou a um nível que permite a substituição do diesel, sem conversão dos motores. Essa é uma grande vantagem, principalmente em máquinas antigas, que possuem emissões de gases de efeito estufa maiores que as mais modernas.

A designação universal do biodiesel é BXX em que XX corresponde ao percentual de biodiesel misturado ao diesel derivado de petróleo. Desta forma, B20 possui 20% de biodiesel na mistura e B100 é biodiesel puro.

Vantagens do Biodiesel

- Substituição simples do diesel derivado de petróleo.
- É um recurso renovável.
- Possui taxa de emissões de gases de efeito estufa 55% menor que a do diesel derivado de petróleo.
- Gera emprego nas usinas e no agronegócio. Nos Estados Unidos, estão ativas 200 usinas que geram 62.000 empregos diretos e indiretos.

12.2.6 Energia das Marés – Maré motriz

Maré motriz visa aproveitar a energia cinética e potencial das marés para produção de energia elétrica. Duas formas de aproveitamento desta energia se destacam: aproveitamento das correntezas marítimas (energia cinética) e aproveitamento da energia nos ciclos de maré alta e maré baixa (energia potencial).

Aproveitamento das correntezas marítimas

A água do mar, assim como os ventos, é um fluido que se move. Apesar de a velocidade das correntezas marítimas ser pequena (2 m/s a 4 m/s), se comparada aos ventos, a densidade da água é muito maior que a do ar, e a potência disponível nas pás de uma turbina é proporcional à densidade do fluido, como mostra a expressão (12.2), vista no estudo da energia eólica. A estrutura, que consta de turbina e gerador, é montada embaixo d'água, geralmente em águas não muito profundas, como mostrado na Figura 12.18 (a). A localização e a profundidade são elementos de estudo de viabilidade do sistema de geração. É comum operar com muitas turbinas, formando um parque de geração com dezenas de turbinas interligadas. O primeiro parque gerador deste tipo foi construído na cidade de Strangford Lough, na Irlanda, em 2007. Hoje, é possível encontrar turbinas comerciais de 80 m para aplicação deste tipo.

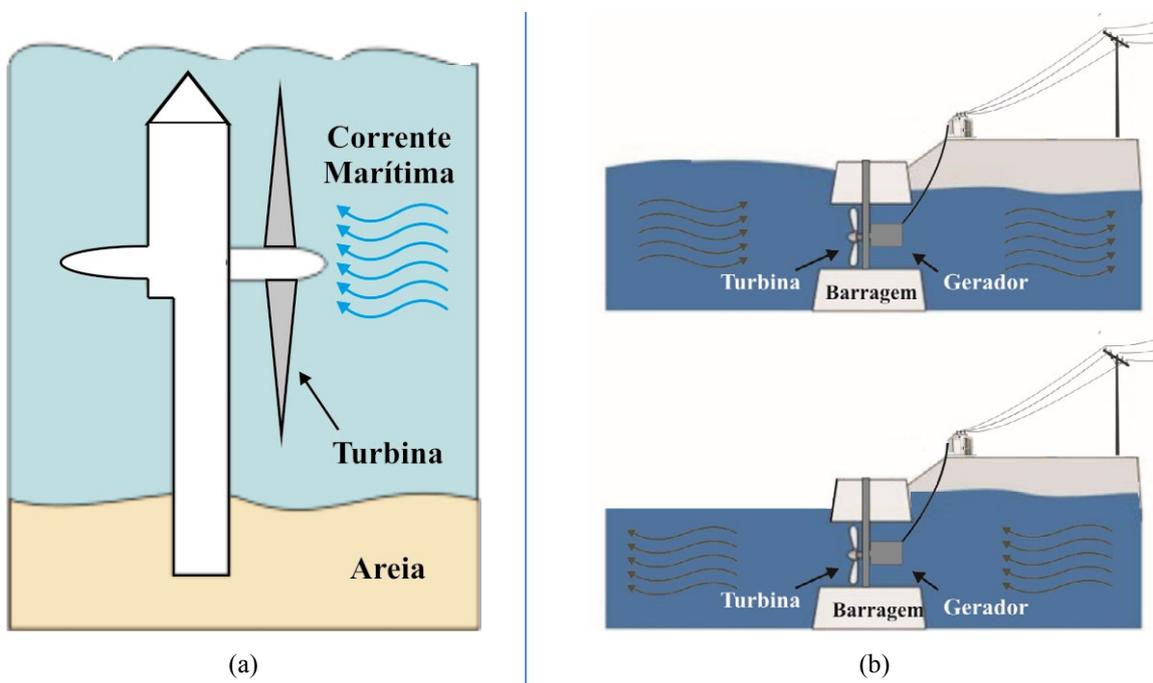
Vantagens

- As correntezas marítimas são mais estáveis e previsíveis, logo, a geração terá um regime permanente mais uniforme, ao contrário do vento, que varia durante alguns minutos, durante o dia e durante as épocas do ano.
- Impacto ambiental pequeno e poluição visual inexistente.

Desvantagens

- Ambiente mais agressivo quanto a desgaste e oxidação, aumentando o custo da manutenção.
- Oscilações nas estruturas, devido a ondas.

Figura 12.18 – Planta simplificada da geração maré motriz: (a) aproveitamento das correntes marítimas; (b) aproveitamento dos ciclos de maré alta e baixa



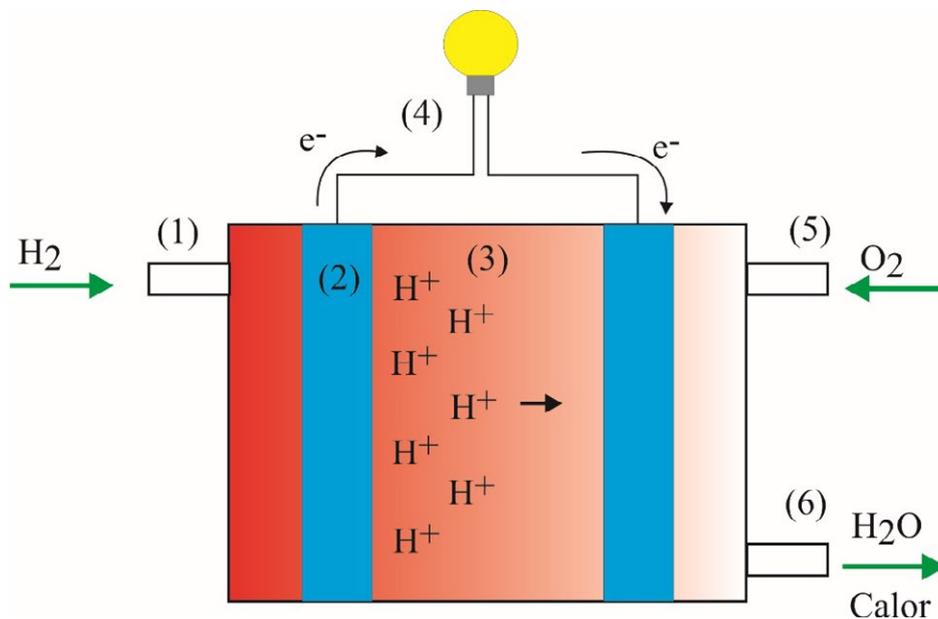
Aproveitamento da energia nos ciclos de maré alta e maré baixa com barragens

Este tipo de abordagem aproveita os ciclos de maré alta e maré baixa que acontecem a cada 6 horas, como mostrado na Figura 12.18 (b). Necessitam de barragens para acumular a água no período de maré alta. Geralmente são construídas aproveitando-se a forma física de rios, baías e estuários. Essas barragens possuem uma série de empecilhos, dos quais o mais sério é o impacto ambiental na vida marinha que habita esses rios, baías e estuários. Esse impacto recai também sobre as pessoas que dependem desses mananciais. Outras desvantagens dessa abordagem são poluição visual, maior custo de implementação e geração com regime não contínuo. Todas essas desvantagens desestimulam, em todo o mundo, investimentos nesse tipo de aproveitamento.

12.3 Célula de combustível de hidrogênio – impacto ambiental zero

A célula de combustível de hidrogênio é um aparato químico que gera energia elétrica a partir do combustível hidrogênio. Como já vimos no Capítulo 2, a bateria elétrica é também um aparato químico. No entanto, a bateria acumula energia a partir de um processo de carregamento, ou seja, os processos de carregamento e utilização da energia, na maioria das vezes, se dão em momentos diferentes. A célula de combustível de hidrogênio precisa de injeção contínua de hidrogênio (combustível) e oxigênio para geração de energia, semelhante a um motor a combustão de um veículo, que precisa de gasolina e oxigênio para gerar energia.

Fig 12.19 – Planta básica de uma célula combustível de hidrogênio



Apesar de haver vários tipos de células de combustíveis, a planta básica é mostrada na Figura 12.19. O hidrogênio é injetado na célula continuamente (1) e entra em contato com um material capilarizado chamado catalizador (2). Nesse ponto há uma oxidação (perda de elétrons), criando íons de hidrogênio que se movimentam no eletrólito (3). Os elétrons perdidos do hidrogênio entram no circuito elétrico (4). O oxigênio é injetado em (5), também continuamente, e, em contato com o catalizador, juntamente com os íons de hidrogênio, promove uma redução (ganho de elétrons), elétrons esses vindos do circuito elétrico. O resultado dessa reação é água e calor (vapor de água) (6), subprodutos sem impacto ao meio ambiente. Observe que o material que promove a ação de oxidação do hidrogênio e a redução do oxigênio é a alma da célula de combustível de hidrogênio. A ação contínua de oxidação e redução promove a corrente elétrica no circuito. Existem vários materiais utilizados para efetivar essa ação contínua; o mais popular é a platina. O custo alto da platina faz com que a comunidade científica se esforce para a aplicação de metais mais baratos e com a mesma eficiência. Outro material importante é o tipo especial de eletrólito que permite a circulação de íons de hidrogênio e barra a circulação de elétrons. Eletrólito é uma categoria de materiais que já foi enfocada no Capítulo 2.

Ao contrário da combustão a partir de combustíveis fósseis, que possui como subprodutos dióxido de carbono e uma série de componentes tóxicos, além de materiais particulados, a célula de combustível a hidrogênio é extremamente atrativa em termos de sustentabilidade ambiental, pois gera dois componentes não agressivos: água e calor.

Um dos maiores empecilhos para as tecnologias de célula de combustível é o armazenamento de hidrogênio, cujo gás é altamente inflamável. Centelhas formadas a partir de eletricidade estática podem acarretar explosões. O caso mais famoso de incêndio envolvendo hidrogênio foi o do dirigível Hindenburg, nos Estados Unidos, em 1937.

O hidrogênio é o elemento químico mais abundante do universo, composto de somente um próton e um elétron. Porém, não existem reservas naturais disponíveis desse elemento. A

produção de hidrogênio é realizada a partir de outros recursos – gás natural e água, por exemplo. A técnica mais utilizada na atualidade é o craqueamento térmico do gás natural. Esse método, por ser o mais barato e com eficiência aceitável, corresponde a mais de 95% da produção mundial na atualidade. O gás natural, como já foi ressaltado, é um combustível fóssil que foi formado ao longo de muito tempo a partir da decomposição de material orgânico – em outras palavras, é um recurso não renovável. Além do mais, as técnicas envolvendo gás natural liberam CO_2 – que, de acordo com grande parte da comunidade científica, é um gás de efeito estufa – e CO (gás tóxico para os seres vivos). Existem dezenas de técnicas de obtenção de hidrogênio de forma industrial e existem dezenas sendo pesquisadas no intuito de baixar o custo, aumentar a eficiência e diminuir a dependência dos combustíveis fósseis.

A eletrólise da água é outro método para obtenção do hidrogênio. Esse método envolve reações eletroquímicas de oxidação e redução. Os terminais de uma fonte de corrente contínua são ligados a dois terminais imersos na água. No terminal negativo, há uma redução (a reação química ganha elétrons). A equação química (12.8) representa a reação descrita. Atente para o hidrogênio como resultante nesse terminal. Já no terminal positivo acontece uma oxidação (a reação química perde elétrons), tendo o oxigênio como resultante nesse terminal, como mostra a equação química (12.9). Assim, bolhas de hidrogênio se desprendem no terminal negativo e bolhas de oxigênio, no terminal positivo.



A célula de combustível de hidrogênio é uma alternativa atrativa para tração elétrica nas grandes cidades, pois contribui para a melhoria da qualidade do ar, o que, por sua vez, agrega valor à qualidade de vida dos moradores dessas cidades. No entanto, ainda há muita pesquisa a ser realizada, no intuito de reduzir a dependência da produção do hidrogênio a partir do gás natural.

12.4 Eficiência energética e conservação de energia

Não é só na produção de energia, ou produção de bens e serviços, que se pode enquadrar a sustentabilidade. Na outra ponta, está o consumo dessa energia e dos bens e serviços, ou seja, estão as pessoas. O simples ato de desligar uma lâmpada quando sua iluminação não é necessária contribui para redução das emissões de gases de efeito estufa ou economia de água. Dessa forma, a sustentabilidade está no nosso dia a dia, no somatório das ações que praticamos durante o dia.

Sustentabilidade não é algo dissociado das nossas vidas. O papel colocado fora da lixeira necessitará de energia para transferi-lo para o local certo. São ações simples que tornam a sociedade mais eficiente e sustentável. Para o bem da sociedade, é preferível o somatório de pequenas ações eficientes que o grande feito de um único herói. Dois grupos de

ações sustentáveis são importantes na utilização da energia elétrica pelos consumidores finais: **ações de eficiência energética e ações de conservação de energia.**

Conservação de energia é suprimir atividades que consomem energia e não adicionam valor. Essas atividades geralmente estão enraizadas nos hábitos das pessoas. Assim, ações de conservação de energia estão ligadas a mudança de hábitos. Uma característica importante da conservação de energia é ser de baixo custo.

Exemplos de ações de Conservação de energia elétrica:

- Desligar lâmpadas de ambientes onde não estão sendo utilizadas.
- Passar o máximo de roupas de uma só vez quando utilizar ferro elétrico.
- Não tomar banho quente demorado.
- Desligar equipamentos *stand by* à noite.
- Reduzir o consumo de água desnecessário.
- Aproveitar ao máximo a luz natural, localizando os birôs dos escritórios próximo às janelas.
- Utilizar a temperatura mínima de 23 °C nos condicionadores de ar.

Eficiência energética tem a ver com ações que visam mudar componentes do sistema para componentes tecnologicamente mais eficientes, sem comprometer as funções do próprio sistema. São ações que estão geralmente ligadas à melhoria tecnológica. Possuem investimento e, frequentemente, são testadas quanto à sua viabilidade econômica, ou retorno desse investimento.

Exemplos de ações de eficiência energética na eletricidade:

- Mudança de motores elétricos de indução antigos para motores de alto rendimento.
- Mudança de lâmpadas a vapor de ignição a baixa frequência para lâmpadas a vapor de ignição a alta frequência.
- Utilização de lâmpadas a LED, sem sacrificar a luminosidade do ambiente.
- Troca de geladeiras antigas por geladeiras mais modernas.
- Mudança da arquitetura do ambiente, para melhor aproveitamento da iluminação natural e ventilação.
- Utilização de fontes de energia de menor impacto ambiental, como fotovoltaica e eólica.
- Substituição de condicionadores de ar analógicos por digitais, com inversores estáticos.

Assim, você deve ter percebido quanto pode contribuir para um mundo mais eficiente e sustentável. Realizando e disseminando ações sustentáveis, nós estaremos participando diretamente dessa construção.

Exercícios propostos

- 12.1** Pesquise quais os gases de efeito estufa e quais os mais danosos.
- 12.2** Quais as consequências de variações dos regimes de chuva nas regiões nordeste, sudeste e sul do Brasil?
- 12.3** Quais os efeitos do degelo das geleiras polares sobre os litorais?
- 12.4** Pesquise sobre a composição do sistema de geração elétrico brasileiro. Com a instabilidade dos regimes chuvosos nas regiões brasileiras, quais as alternativas para geração hidroelétrica em períodos de baixos níveis dos reservatórios?
- 12.5** Trabalho em grupo. Pesquise, projete e construa uma turbina eólica para 500 watts, a partir de canos PVC de esgoto, para uma velocidade de vento de 5 m/s.
- 12.6** Para discussão em grupo.
Preencha a tabela a seguir, com uma nota de 0 e 10 para cada critério correspondente a cada fonte de energia. Ao final, some e elabore sua escala de valor de todas as fontes mostradas na tabela.

Fontes de Energia	Critérios			Soma
	Tempo de duração das jazidas	Impacto Ambiental	Segurança	
Gasolina				
Gás natural				
Carvão mineral				
Nuclear				
Eólica				
Fotovoltaica				
Metano				
Maré motriz				

- 12.7** Pesquise sobre o mapa de distribuição eólica do Brasil e depois responda: Quais as regiões com maior potencial eólico no Brasil? Nessas regiões de maior potencial, quais as máximas velocidades e em quais períodos do ano elas ocorrem?
- 12.8** Onde estão os maiores potenciais fotovoltaicos do Brasil? Compare com o potencial da Europa e dos Estados Unidos.
- 12.9** Elabore um conjunto de ações de conservação de energia que podem ser realizadas na sua residência. Tente implementar em cooperação com seus familiares. Acompanhe o consumo mensal. Apresente, ao final do curso, sua experiência.

12.10 Quanto de dióxido de carbono é emitido por um grupo gerador a diesel, para suprir uma demanda de 500 kW durante 2 horas por dia, em um período de 22 dias por mês? Assuma 0,25 litros/kWh e 10,15 g de CO₂ na queima de 1 galão de diesel. Um galão contém 3,78 litros.

12.11 Pesquise e construa uma célula de combustão a hidrogênio rudimentar a partir da eletrólise da água.

Pesquisa e discussão em grupo

I – Quais as medidas que as pessoas e o governo poderiam tomar para incentivar a geração de baixo impacto ambiental?

II – Atualmente o silício é muito importante para geração fotovoltaica, pois as placas são constituídas desse material. Onde estão suas maiores jazidas no Brasil? Qual o papel do Brasil na produção e processamento do silício?

III– O Brasil é um dos países mais abundantes em silício de alta qualidade, além de possuir um dos maiores potenciais de incidência solar do mundo, principalmente no interior do Nordeste. Por que o Brasil não possui uma política estratégica de incentivo à produção e utilização de painéis fotovoltaico de silício? A produção de energia fotovoltaica no nordeste do Brasil não seria um fator de criação e distribuição de riquezas? Comente sobre isso.

IV– O que é o enriquecimento do urânio? Por que as tecnologias de enriquecimento de urânio são tão controladas pela comunidade internacional?

REFERÊNCIAS

ALVAREZ, Albino R.; MOTA, José Aroudo (Orgs.). **Sustentabilidade Ambiental no Brasil: biodiversidade, economia e bem estar humano**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2010.

CARDOSO, Eliezer de Moura. **Apostila Educativa – Energia Nuclear**. Rio de Janeiro: Comissão Nacional de Energia Nuclear, 2008.

HAUSFATHER, Zeke. Analysis: global CO2 emissions set to rise 2% in 2017 after three-year 'plateau'. **CarbonBrief**, nov. 2017. Disponível em: <<https://www.carbonbrief.org/analysis-global-co2-emissions-set-to-rise-2-percent-in-2017-following-three-year-plateau>>. Acesso em: fev. 2018.

OLIVEIRA, Milton P. **Fundamentos de Energia Eólica**. São Paulo: LTC, 2013.

RIVA, Giovanni et al. **Handbook on renewable energy sources**. Budapeste: South East Europe Programme, 2012.

MIT ELECTRIC VEHICLE TEAM. **A Guide to Understanding Battery Specifications**. 2008.

Disponível em: <http://web.mit.edu/evt/summary_battery_specifications.pdf>. Acesso em: jan. 2018.

OBSERVATÓRIO de energias renováveis para America Latina e o Caribe. Disponível em:

<<http://www.renenergyobservatory.org/br/programa-de-capacitacao.html>>. Acesso em: abr. 2018.

UNITED States Environmental Protection Agency. Disponível em: <<https://www3.epa.gov/>>. Acesso em: jun. 2017.

LAUBE, Philip. Fundamentals: the p-n junctions. In: _____. **Semiconductor Technology from A to Z**. Disponível em: <<https://www.halbleiter.org/en/fundamentals/the-p-n-junction/>>. Acesso em: abr. 2018.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. **Nuclear power in the world today**. Disponível em:

<<http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx>>. Acesso em: fev. 2018.

ANEXO 1 – Símbolos elétricos utilizados no escopo deste livro



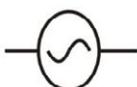
Fonte de tensão
CC (1 Elemento)



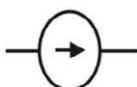
Fonte de tensão
CC (vários elemento)
bateria



Fonte de tensão
CC controlada



Fonte de tensão
CA



Fonte de corrente



Condutor



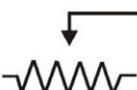
Conexão



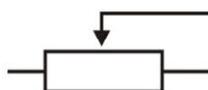
Resistência



Resistência



Potenciômetro
ou reostato



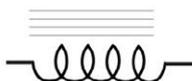
Potenciômetro
ou reostato



Resistência
variável



Indutor



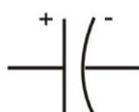
Indutor com
Núcleo Ferro-
Magnético



Capacitor não
Polarizado



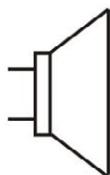
Indutor com
derivações



Capacitor
polarizado
(eletrolítico)



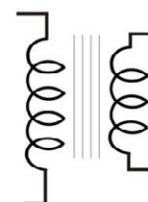
Capacitor
polarizado
(pletrolítico)



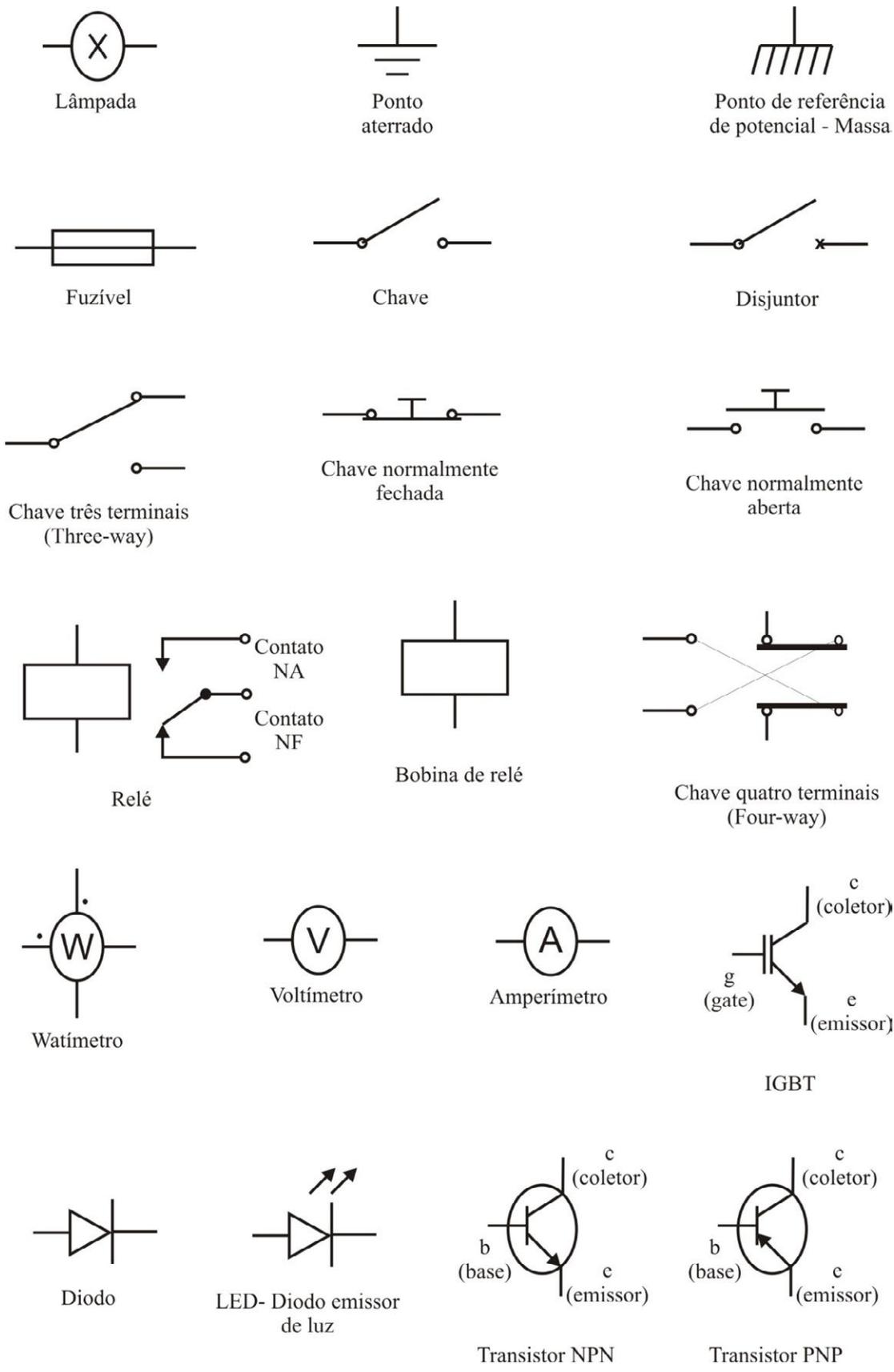
Auto Falante



Buzzer



Transformador



Alguns símbolos da norma NBR 5444 – 1989



Condutor fase dentro de eletroduto



Condutor neutro dentro de eletroduto



Condutor retorno dentro de eletroduto



Condutor terra dentro de eletroduto



Ponto de luz no teto



Ponto de luz na parede



Tomada de luz baixa na parede (0,3 m)



Tomada de luz média alta na parede (1,3 m)



Tomada de luz alta na parede (2,0 m)



Quadro de luz e força embutido



Quadro geral de luz e força embutido



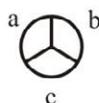
Disjuntor a seco



Interruptor de 1 seção



Interruptor de 2 seção



Interruptor de 3 seção



Interruptor paralelo (Three-way)



Interruptor intermediário (Four-way)

ANEXO 2 – Tabela de fio de cobre esmaltado

Bitola (AWG)	Seção Condutora (mm ²)	Diâmetro Max. (mm)	Área Max. (mm ²)	Peso (Kg/Km)	Resistência Elétrica (ohm/m) 100 °C
35	0,015	0,18	0,025	0,139	1,4422
34	0,020	0,20	0,031	0,183	1,1437
33	0,025	0,22	0,038	0,230	0,9070
32	0,031	0,25	0,049	0,290	0,7192
31	0,039	0,27	0,057	0,368	0,5704
30	0,049	0,30	0,071	0,463	0,4523
29	0,062	0,33	0,085	0,580	0,3587
28	0,078	0,37	0,107	0,731	0,2845
27	0,099	0,41	0,132	0,923	0,2256
26	0,126	0,46	0,166	1,170	0,1789
25	0,159	0,52	0,212	1,470	0,1419
24	0,196	0,57	0,255	1,850	0,1125
23	0,246	0,63	0,312	2,330	0,0892
22	0,312	0,71	0,396	2,930	0,0708
21	0,396	0,79	0,490	3,700	0,0561
20	0,503	0,89	0,622	4,650	0,0445
19	0,636	0,99	0,769	5,870	0,0353
18	0,785	1,09	0,933	7,410	0,0280
17	1,094	1,28	1,286	9,320	0,0222
16	1,368	1,42	1,583	11,80	0,0176
15	1,539	1,51	1,790	14,90	0,0140
14	2,011	1,71	2,295	18,70	0,0111
13	2,545	1,92	2,894	23,60	0,0080
12	3,142	2,12	3,524	29,80	0,0070
11	4,374	2,49	4,867	37,60	0,0055
10	5,350	2,71	5,767	49,75	0,0044
9	6,742	3,03	7,210	62,70	0,0033
8	8,500	3,39	9,025	79,05	0,0026
7	10,751	3,79	11,28	99,98	0,0020

ANEXO 3 – Ferramentas utilizadas em manutenção de sistemas elétricos

As ferramentas são muito importantes para quem realiza manutenção de sistemas elétricos, sejam industriais ou prediais. Além de tornar o trabalho mais eficiente, elas podem proteger o técnico de acidentes envolvendo eletricidade. A seguir, são descritas as principais ferramentas que são imprescindíveis ao técnico.



Alicate Universal

Funções: cortar na diagonal e segurar condutores até 2 mm. Segurar de modo firme vários tipos de superfícies. Se isolado, pode ser utilizado em circuitos eletrificados em baixa tensão.



Alicate de bico redondo

Funções: cortar na diagonal condutores até 2 mm. Segurar de modo firme superfícies dentro de locais onde não seja possível a inserção do alicate universal.



Alicate de bico Curvo

Funções: cortar na diagonal condutores até 2 mm. Segurar de modo firme superfícies dentro de locais onde não seja possível a inserção do alicate universal nem o de bico redondo.



Alicate de corte diagonal

Funções: cortar fios, cabos, arames, desencapar fios.



Alicate desencapador ou desencascador

Funções: desencapar fios.



Chave teste neon

Funções: testar se há tensão em algum ponto, supostamente isolado, em relação à terra.



Chave de fenda

Funções: desparafusar (parafusos de fenda simples).



Chave Hexagonal -Allen

Funções: desparafusar (parafusos de fenda hexagonal).



Chave Philips

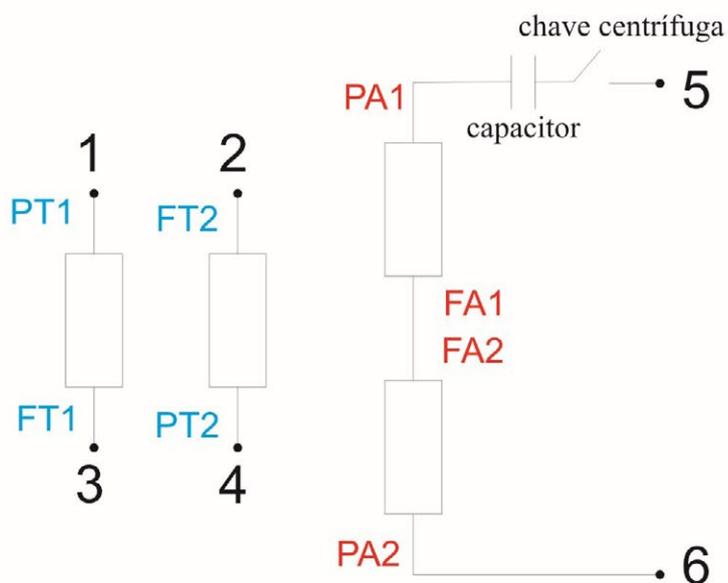
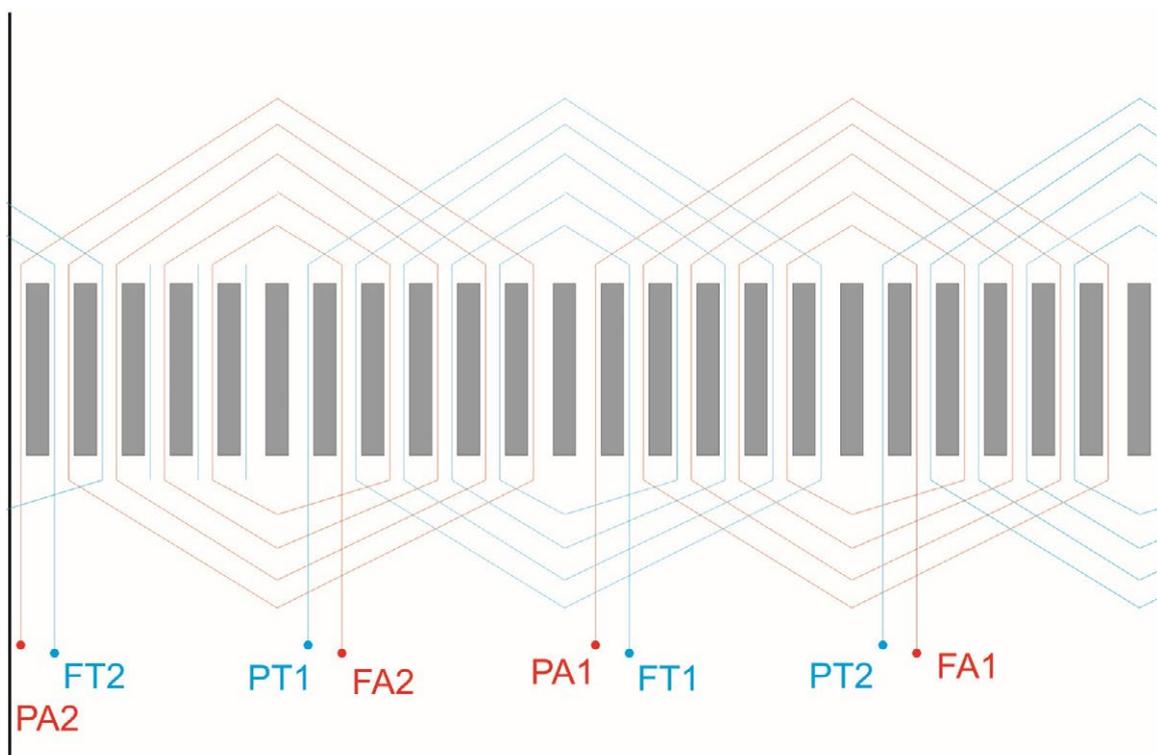
Funções: desparafusar (parafusos de fenda em xis ou em cruz).

ANEXO 4 – Esquema planejado motor monofásico de indução

Estator: 24 ranhuras

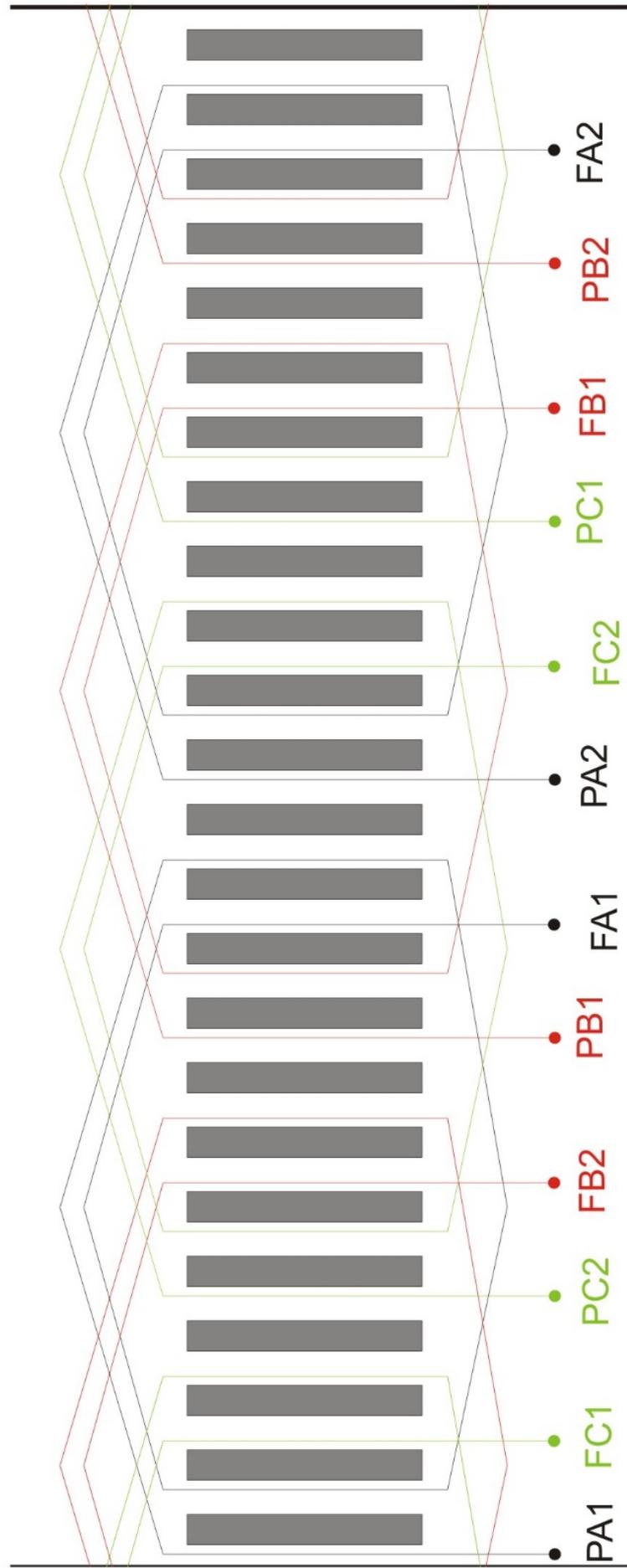
Passo: Concêntrico

2 polos



ANEXO 5 – Esquema planificado motor trifásico de indução – 1

Estator: 24 ranhuras Passo: Concêntrico 2 polos



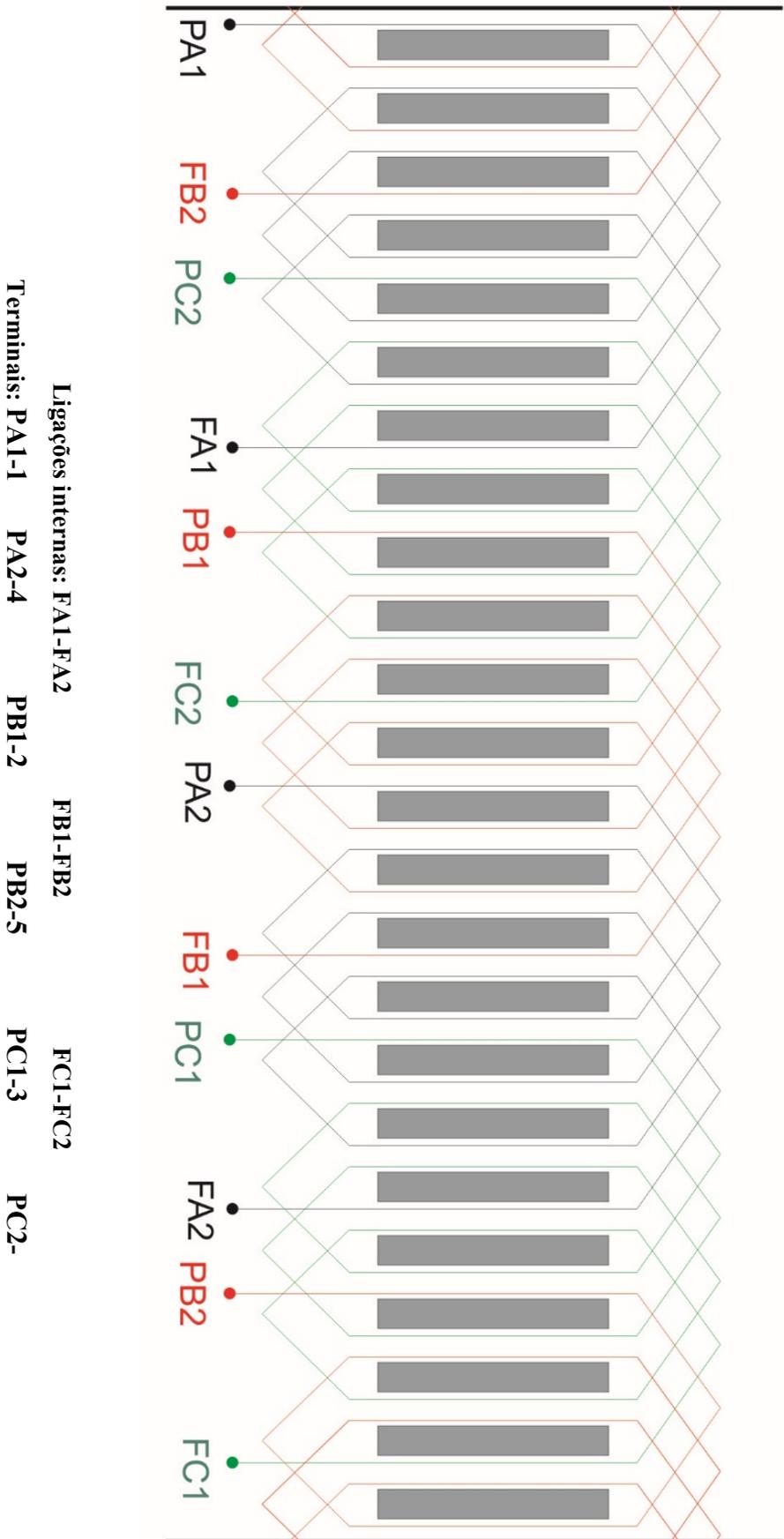
Ligações internas: FA1-FA2 FB1-FB2 FC1-FC2
 Terminais: PA1-1 PA2-4 PB1-2 PB2-5 PC1-3 PC2-6

ANEXO 6 – Esquema planificado motor trifásico de indução – 2

Estator: 24 ranhuras

Passo: Progressivo

2 polos



Sobre os Autores



José Artur Alves Dias *D. Sc.*

Nascido: Fortaleza/CE, 1963.

Graduação: Engenharia Elétrica, 1990

Mestrado: Engenharia de Produção Industrial, 1994.

Doutorado: Engenharia Elétrica, 2010.

Professor do IFPB - Instituto Federal de Educação Tecnológica da Paraíba desde 1993, onde ministra as disciplinas de Máquinas Elétricas e Eletrônica de Potência nos níveis superior e técnico.



Álvaro de Medeiros Maciel *D. Sc.*

Nascido: João Pessoa/PB, 1985.

Graduação: Engenharia Elétrica, 2008

Mestrado: Engenharia Elétrica, 2009.

Doutorado: Engenharia Elétrica, 2015.

Professor do IFPB - Instituto Federal de Educação Tecnológica da Paraíba desde 2011, onde ministra as disciplinas de Máquinas Elétricas e Acionamento de Máquinas Elétricas Rotativas nos níveis superior e técnico.



Este livro traz o estudo da eletricidade e do magnetismo. Seu conteúdo é voltado para disciplinas de eletricidade em cursos de nível técnico. Também pode ser utilizado com o objetivo atualização de conhecimentos ou como leitura complementar em cursos que tangenciam conhecimentos com os temas abordados.