

Habilitação técnica em Mecânica

3



Eletroeletrônica para Mecânica

CENTRO PAULA SOUZA

 GOVERNO DE
SÃO PAULO

CENTRO PAULA SOUZA DO GOVERNO DE SÃO PAULO



CENTRO PAULA SOUZA



Mecânica

Volume 3



Mecânica

Eletroeletrônica para mecânica

Egmar Accetto

Warney Fernando Testa

(autores)

Vera Regina Gomes Ludovice Antunes

(coautora)



Presidência

João Sayad

Vice-presidência

Ronaldo Bianchi, Fernando Vieira de Mello

DIRETORIA DE PROJETOS EDUCACIONAIS

Direção: Fernando José de Almeida

Gerência: Monica Gardelli Franco, Júlio Moreno

Coordenação Técnica: Maria Luiza Guedes

Equipe de autoria Centro Paula Souza

Coordenação geral: Ivone Marchi Lainetti Ramos

Coordenação da série Mecânica: Meire Satiko

Fukusawa Yokota

Autores: Egmar Accetto, Warney Fernando Testa

Coautora: Vera Regina Gomes Ludovice Antunes

Revisão técnica: Marcos Paulo Marin Plez

Equipe de Edição

Coordenação geral: Carlos Tabosa Seabra,
Rogério Eduardo Alves

Coordenação editorial: Luiz Marin

Edição de texto: Miguel Angelo Facchini

Secretário editorial: Antonio Mello

Revisora: Maria Carolina de Araujo

Direção de arte: Bbox Design

Diagramação: LCT Tecnologia

Ilustrações: Luiz Fernando Martini

Pesquisa iconográfica: Completo Iconografia

Capa

Fotografia: Eduardo Pozella, Carlos Piratininga

Tratamento de imagens: Sidnei Testa

Abertura capítulos: © James King-Holmes/Science Photo
Library/SPL DC/Latinstock

O Projeto Manual Técnico Centro Paula Souza – Coleção Técnica Interativa oferece aos alunos da instituição conteúdo relevante à formação técnica, à educação e à cultura nacional, sendo também sua finalidade a preservação e a divulgação desse conteúdo, respeitados os direitos de terceiros.

O material apresentado é de autoria de professores do Centro Paula Souza e resulta de experiência na docência e da pesquisa em fontes como livros, artigos, jornais, internet, bancos de dados, entre outras, com a devida autorização dos detentores dos direitos desses materiais ou contando com a permissibilidade legal, apresentando, sempre que possível, a indicação da autoria/crédito e/ou reserva de direitos de cada um deles.

Todas as obras e imagens expostas nesse trabalho são protegidas pela legislação brasileira e não podem ser reproduzidas ou utilizadas por terceiros, por qualquer meio ou processo, sem expressa autorização de seus titulares.

Agradecemos as pessoas retratadas ou que tiveram trechos de obras reproduzidas neste trabalho, bem como a seus herdeiros e representantes legais, pela colaboração e compreensão da finalidade desse projeto, contribuindo para que essa iniciativa se tornasse realidade. Adicionalmente, colocamo-nos à disposição e solicitamos a comunicação, para a devida correção, de quaisquer equívocos nessa área porventura cometidos em livros desse projeto.

O Projeto Manual Técnico Centro Paula Souza – Coleção Técnica Interativa, uma iniciativa do Governo do Estado de São Paulo, resulta de um esforço colaborativo que envolve diversas frentes de trabalho coordenadas pelo Centro Paula Souza e é editado pela Fundação Padre Anchieta. A responsabilidade pelos conteúdos de cada um dos trabalhos/textos inseridos nesse projeto é exclusiva do autor. Respeitam-se assim os diferentes enfoques, pontos de vista e ideologias, bem como o conhecimento técnico de cada colaborador, de forma que o conteúdo exposto pode não refletir as posições do Centro Paula Souza e da Fundação Padre Anchieta.

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecária Sílvia Marques CRB 8/7377)**

S586

Accetto, Egmar

Mecânica: eletroeletrônica para mecânica / Egmar Accetto, Warney Fernando Testa (autores); Vera Regina Gomes Ludovice Antunes (coautora); Marcos Paulo Marin Plez (revisor); Meire Satiko Fukusawa Yokota (coordenadora). -- São Paulo: Fundação Padre Anchieta, 2011 (Coleção Técnica Interativa. Série Mecânica, v. 3)

Manual técnico Centro Paula Souza

ISBN 978-85-8028-041-8

I. Mecânica 2. Eletroeletrônica I. Testa, Warney Fernando II. Antunes, Vera Regina Gomes Ludovice III. Plez, Marcos Paulo Marin IV. Yokota, Meire Satiko Fukusawa V. Título

CDD 607



GOVERNADOR

Geraldo Alckmin

VICE-GOVERNADOR

Guilherme Afif Domingos

**SECRETÁRIO DE DESENVOLVIMENTO
ECONÔMICO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**

Paulo Alexandre Barbosa



Presidente do Conselho Deliberativo

Yolanda Silvestre

Diretora Superintendente

Laura Laganá

Vice-Diretor Superintendente

César Silva

Chefe de Gabinete da Superintendência

Elenice Belmonte R. de Castro

**Coordenadora da Pós-Graduação,
Extensão e Pesquisa**

Helena Gemignani Peterossi

**Coordenador do Ensino Superior
de Graduação**

Angelo Luiz Cortelazzo

Coordenador de Ensino Médio e Técnico

Almério Melquíades de Araújo

**Coordenadora de Formação Inicial e
Educação Continuada**

Clara Maria de Souza Magalhães

**Coordenador de Desenvolvimento
e Planejamento**

João Carlos Paschoal Freitas

Coordenador de Infraestrutura

Rubens Goldman

**Coordenador de Gestão Administrativa
e Financeira**

Armando Natal Maurício

Coordenador de Recursos Humanos

Elio Lourenço Bolzani

Assessora de Comunicação

Gleise Santa Clara

Procurador Jurídico Chefe

Benedito Libério Bergamo

Apresentação

Desde que passou a conhecer as propriedades elétricas e magnéticas, a humanidade vem progredindo, por meio de estudos e pesquisas, rumo a descobertas que visam aplicações cada vez mais avançadas.

Dos elétrons livres ao armazenamento das cargas elétricas, do fluxo de elétrons ao efeito magnético visto com o uso de uma bússola, da compreensão das linhas de campo à utilização de transformadores e motores elétricos, tudo seguiu um caminho lógico e fundamentado. Apoiando-se em estudos científicos, as pesquisas empregam equipamentos e instrumentos de leitura e medição cada vez mais avançados, que aferem os resultados e procuram elucidar os mistérios que, mesmo nos dias atuais, o universo da eletricidade ainda nos traz.

Neste livro será vista parte dessa história. A estrutura atômica básica, a interação de campos eletromagnéticos, os princípios e conceitos sobre as propriedades elétricas da matéria, tais como resistência, corrente e tensão, a análise dos circuitos elétricos e suas leis serão alguns dos temas estudados.

A fusão desses conhecimentos levará à compreensão dos sistemas de conversão de energia, tais como os geradores e motores elétricos; às configurações estrela-triângulo e sua importância em aplicações industriais; e, posteriormente, ao estudo e desenvolvimento dos circuitos de comando, os quais permitem a integração lógica desses elementos, formando a base do controle de uma planta industrial.

Ao finalizar essa apresentação não podemos nos esquecer de agradecer pela ajuda dos muitos amigos, colegas e familiares na confecção desse livro. Em especial aos professores: Jun Suzuki, Meire S. F. Yokota (por nos direcionarem a essa obra), Valter N. Mori (pela ajuda com os inversores de frequência), Tera Miho S. Parede, Renato T. Koganezawa e Gelson J. Colli (pelo auxílio com a bibliografia), ao pessoal da Fundação Padre Anchieta e por fim aos nossos Mestres (em mais de um plano), por nos guiarem até aqui.

Bons estudos!

Os autores

Sumário

15 Capítulo I Princípios de eletricidade

- I.1 Grandezas elétricas fundamentais 16
 - I.1.1 O potencial elétrico e a tensão elétrica ... 16
 - I.1.2 A corrente elétrica 17
 - I.1.3 Resistência elétrica 18
- I.2 As leis de Ohm 19
 - I.2.1 Primeira lei de Ohm 19
 - I.2.2 Segunda lei de Ohm 19
- I.3 Associação de resistores 21
 - I.3.1 Associação em série 21
 - I.3.2 Associação em paralelo 22
 - I.3.3 Associação mista 24
 - I.3.4 Transformação de resistências
estrela-triângulo 26
- I.4 Energia e potência elétricas 29
 - I.4.1 Potência em resistores comerciais 30
 - I.4.2 Convenção de sinais 31
 - I.4.3 Rendimento energético 32
- I.5 Corrente contínua *versus* corrente alternada ... 32
 - I.5.1 O fasor – uma ferramenta útil 34
 - I.5.2 Comportamento de resistores, indutores
e capacitores em corrente alternada 36
 - I.5.3 Impedância – uma extensão da
lei de Ohm 39
 - I.5.4 Potência em corrente alternada 41



- I.6 Instrumentos de medição das
grandezas elétricas 43
 - I.6.1 Multímetro 43
 - I.6.2 Amperímetro alicate 49
 - I.6.3 Wattímetro 50
- I.7 Sistema trifásico de energia 51
 - I.7.1 O gerador trifásico 51
 - I.7.2 Conexões típicas de um gerador trifásico . 52
 - I.7.3 Sistema trifásico equilibrado 53
 - I.7.4 Potência em sistemas trifásicos 59

61 Capítulo 2 Motores elétricos

- 2.1 Classificação dos motores elétricos 62
- 2.2 Características gerais dos motores elétricos ... 63
- 2.3 Princípios de funcionamento dos
motores elétricos de corrente alternada 63
- 2.4 Princípios de funcionamento do
motor de indução trifásico 63
 - 2.4.1 Partes constituintes de um
motor de indução trifásico 65
- 2.5 Princípios de funcionamento do
motor monofásico 66
 - 2.5.1 Ligação dos enrolamentos dos motores
monofásicos 69



Capa: Mayara Barbosa Silva e Pierre Diniz Bellotti, alunos do Centro Paula Souza
Foto: Eduardo Pozella e Carlos Piratininga



Sumário

2.6	Escolha e especificação do motor trifásico	70
2.6.1	Especificações de motores elétricos	72
2.6.2	Tempo De Rotor Bloqueado E Temperatura Limite	83
2.6.3	Tempo de aceleração (t_a)	83
2.6.4	Carcaça como invólucro de proteção	84
2.7	Operação e manutenção de motores elétricos .	86
2.7.1	Carregamento conveniente dos motores .	86
2.7.2	Ventilação adequada	87
2.7.3	Controle da temperatura ambiente.	87
2.7.4	Cuidado com as variações de tensão.	87
2.7.5	Degradação dos isolantes térmicos.	88
2.7.6	Fixação correta dos motores e eliminação de vibrações	88
2.7.7	Lubrificação correta dos mancais.	89
2.7.8	Valores de placa de um motor.	90
2.8	Dispositivos elétricos de manobra e proteção ..	92
2.8.1	Fusíveis	93
2.8.2	Contatores.	99
2.8.3	Botoeira	100
2.8.4	Relés de sobrecarga ou térmicos.	101
2.8.5	Disjuntores.	102
2.9	Acionamentos de motores.	104
2.9.1	Partida direta	104
2.9.2	Partida por meio da chave estrela-triângulo	109
2.9.3	Partida por meio de chave compensadora	113

2.9.4	Outros tipos de ligações ou partidas.	113
2.9.5	Comandos de partida e reversão de giro	117
2.9.6	Uso da chave <i>soft-starter</i> para comando de partida e reversão	121
2.9.7	Uso de inversores de frequência para comandos de partida e reversão	125

149 Capítulo 3 Lógica digital para aplicação em eletropneumática

3.1	Constantes e variáveis booleanas	151
3.2	Tabela verdade	151
3.3	Porta E (ou AND)	152
3.4	Porta OU (ou OR)	153
3.5	Inversor ou operação NÃO (ou NOT)	154
3.6	Porta NAND (NÃO E ou NE)	155
3.7	Porta NOR (NÃO-OU ou NOU)	156
3.8	Implementando circuitos e tabela-resumo	157
3.9	Minimização de expressões booleanas pelo uso dos mapas de Karnaugh	160
3.9.1	Regras para a simplificação de mapas K (de Karnaugh)	161

165 Referências bibliográficas



TREKANDSHOOT/SHUTTERSTOCK



ANDREW LAMBERT PHOTOGRAPHY/SCIENCE PHOTO LIBRARY/SPLDCLATINSTOCK



IAKOV FILIMONOV/SHUTTERSTOCK



MAREK PAVLUCZUK/SHUTTERSTOCK



MYCOLAS/SHUTTERSTOCK



EVGENY KORSHENIKOV/SHUTTERSTOCK

Capítulo I

Princípios de eletricidade

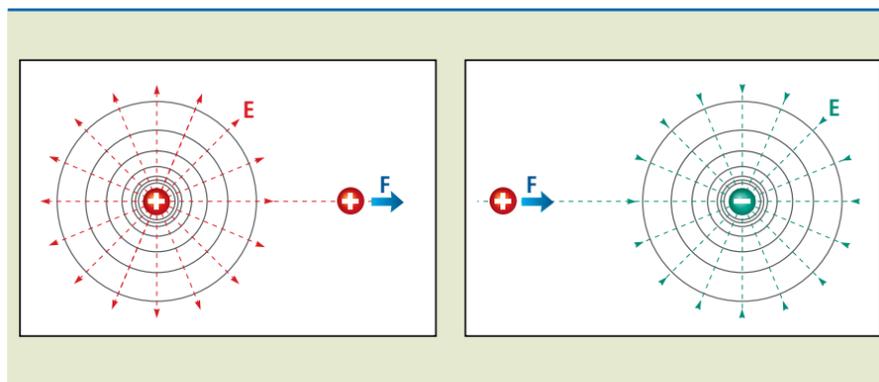
1.1 Grandezas elétricas fundamentais

Ao enunciar o conceito de **campo elétrico** (E), o cientista inglês Michael Faraday (1791-1867) demonstrou que ao redor de uma carga elétrica existe um campo elétrico. O campo elétrico E é representado por um vetor, um segmento de reta orientado, que sai das cargas positivas e entra nas cargas negativas. Uma carga (q) colocada nesse campo elétrico fica sujeita a uma **força elétrica** (F). Se a carga for positiva, a força F tem a mesma direção do campo elétrico E . Se for negativa, a força tem direção contrária à do campo, de acordo com a fórmula expressa na equação 1.1 e representada na figura 1.1.

$$F = q \cdot E \quad (1.1)$$

Figura 1.1

Campo elétrico e força sobre uma carga positiva.



Unidade que corresponde à força que faz um objeto de 1 kg ser acelerado a 1 m/s.

No Sistema Internacional de Unidades (SI), a força F é medida em **newton** (N) e a carga q é medida em **coulomb** (C). Portanto, a unidade do campo elétrico E é dada em N/C.

Quantidade de carga que atravessa a seção transversal de um condutor durante 1 s, produzindo uma corrente elétrica de 1 A (ampere).

Também dizemos que $1 \text{ C} = 6,28 \cdot 10^{18}$ elétrons/s.

1.1.1 O potencial elétrico e a tensão elétrica

Para o entendimento do significado de potencial elétrico, fazemos uma analogia com a força da gravidade e o campo gravitacional. Um corpo qualquer, ao ser abandonado no ar, é levado, pela força da gravidade, de um ponto mais alto (h_A), de maior energia potencial, para um ponto mais baixo (h_B), de menor energia potencial.

Do mesmo modo, uma carga elétrica positiva, ao ser abandonada em um campo elétrico, fica sujeita à ação de uma força elétrica que a leva de um ponto de potencial elétrico mais alto e positivo (V_A) para um de potencial elétrico mais baixo e negativo (V_B). Se a carga é negativa, o deslocamento se dá em sentido contrário. O exemplo dessa comparação é visto na figura 1.2.

Diz-se também que o deslocamento ocorre naturalmente porque o corpo possui energia potencial (de posição) maior na posição mais alta (h_A). Assim, o corpo se desloca da posição h_A , de maior energia potencial (E_{pA}), para a posição h_B , de menor energia potencial (E_{pB}). Da mesma forma, a carga elétrica (positiva) se desloca da posição de maior potencial elétrico para a de menor potencial elétrico.

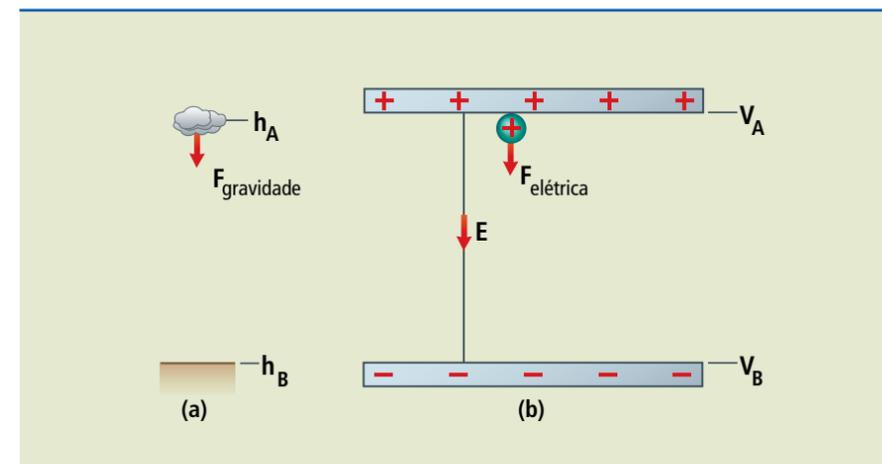


Figura 1.2

Analogia entre potencial gravitacional (a) e potencial elétrico (b).

Nos dois casos (gravitacional e elétrico), é necessária uma diferença de potencial para haver o deslocamento natural (do corpo e da carga). Em relação à carga elétrica, temos uma **diferença de potencial (ddp)**, com maior potencial em A e menor em B. A ddp, também chamada tensão elétrica (U), é a diferença entre os dois potenciais, como mostrado na equação 1.2.

$$U = V_{AB} = (V_A - V_B) \quad (1.2)$$

A unidade de medida da tensão elétrica ou ddp, no SI, é o volt (V).

1.1.2 A corrente elétrica

No ano de 1796, Alessandro Volta (1745-1827), professor e cientista italiano, construiu a primeira pilha (bateria) utilizando discos de cobre e zinco separados por um material que continha uma solução ácida. Com isso produziu o primeiro fluxo de cargas elétricas em laboratório. Considerando a pilha da figura 1.3, em cujos terminais foi ligado um fio condutor (cobre, alumínio, ouro, prata ou outros metais que possuem elétrons “livres”), seu polo positivo estabelece um campo elétrico capaz de atrair elétrons livres da extremidade do fio a que está ligado, ao mesmo tempo que o polo negativo gera um campo elétrico que repele elétrons na outra extremidade do fio.

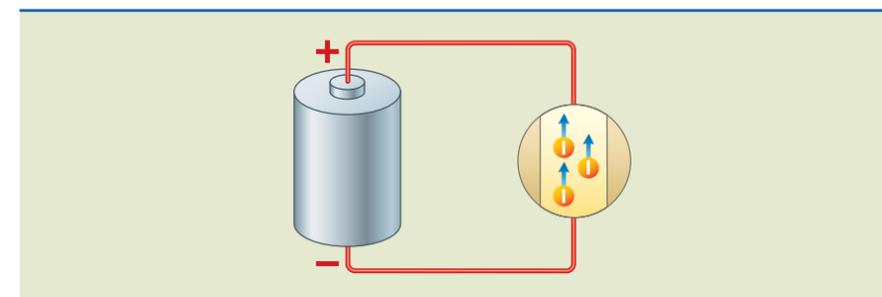


Figura 1.3

Elétrons movimentando-se no condutor ligado aos polos de uma pilha.

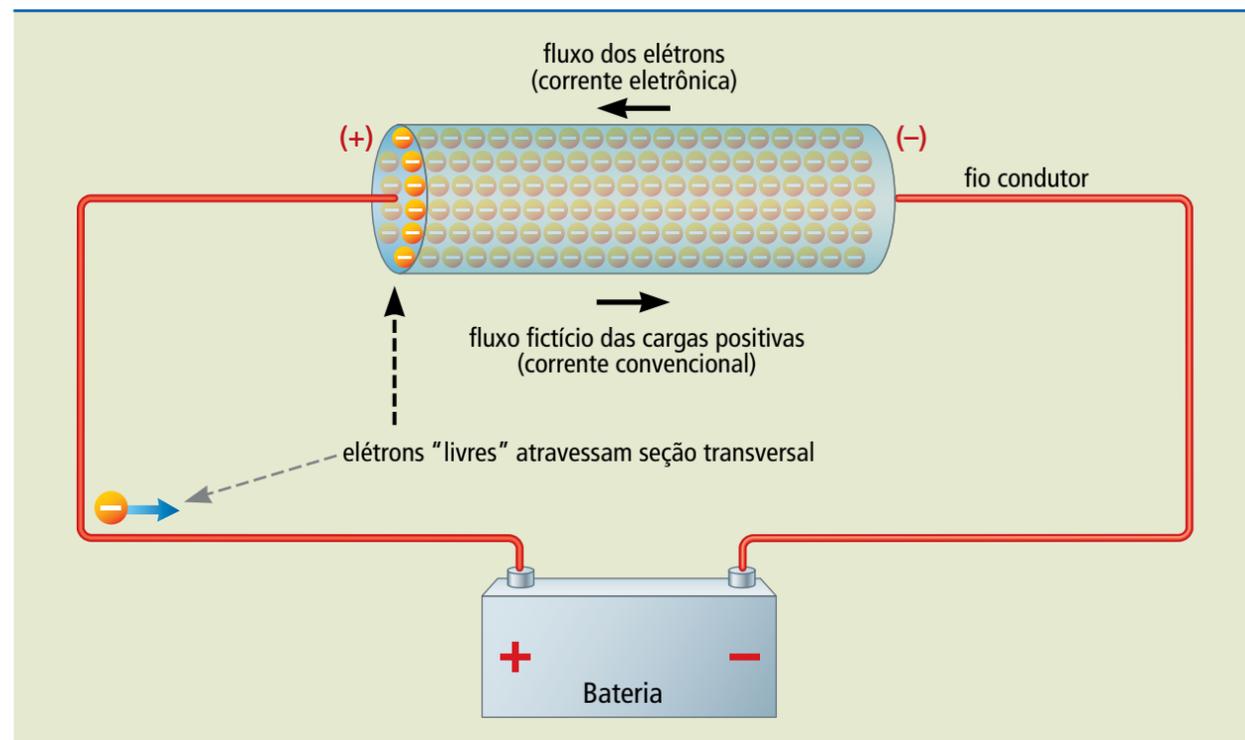
No interior do condutor, o campo elétrico força os elétrons a se movimentarem. Os elétrons se movimentam de átomo para átomo e, ao avançarem para o átomo

vizinho, repelem e substituem outro elétron. Os elétrons substituídos repetem o processo em outros átomos próximos, estabelecendo um fluxo por todo o condutor, na direção do polo positivo da pilha. A esse fluxo orientado de elétrons livres, sob a ação de um campo elétrico, dá-se o nome de corrente elétrica.

Quando o sentido da corrente elétrica é o do movimento dos elétrons, diz-se que a corrente é eletrônica ou real. Existe também uma convenção que adota o sentido da corrente como das cargas positivas, ou seja, o deslocamento das cargas. Nesse caso, acontece do potencial maior (+) para o potencial menor (-). A essa corrente é dado o nome de convencional, conforme ilustrado na figura 1.4.

Figura 1.4

Sentido real (eletrônico) e convencional da corrente elétrica.



1 ampere representa o fluxo de 1 coulomb (C) de cargas elétricas através da seção transversal do material condutor, durante 1 segundo (s). Portanto, $1 \text{ A} = 1 \text{ C}/1 \text{ s}$.

Se aplicarmos uma tensão elétrica (ddp) de 1 V (volt) entre os terminais de um material (resistor ôhmico) e a corrente que o atravessar for de 1 A (ampere), dizemos que o material possui resistência de 1 ohm (Ω).

A corrente elétrica I é definida como a quantidade de cargas Q (medida em coulombs) que atravessa uma seção do material (fio) durante certo tempo Δt (medido em segundos). A unidade de medida de corrente elétrica no SI é o **ampere** (A). Podemos calcular a corrente pela equação 1.3.

$$I = \frac{Q}{\Delta t} \quad (1.3)$$

1.1.3 Resistência elétrica

A grandeza resistência elétrica (R) de um condutor é definida como a dificuldade ou oposição que o material impõe à passagem da corrente elétrica. Essa resistência é medida em **ohms** (Ω).

Sabe-se que o movimento dos elétrons é diferente no vácuo e no interior de um condutor. Quando é aplicada uma ddp aos terminais de um condutor, os elétrons aceleram em direção ao polo positivo, mas durante seu trajeto, e levando em conta a constituição do material quanto à organização atômica, “chocam-se com os átomos”, sofrendo desvios. Assim explica-se o aparecimento da resistência elétrica em um material condutor, como mostrado na figura 1.5.

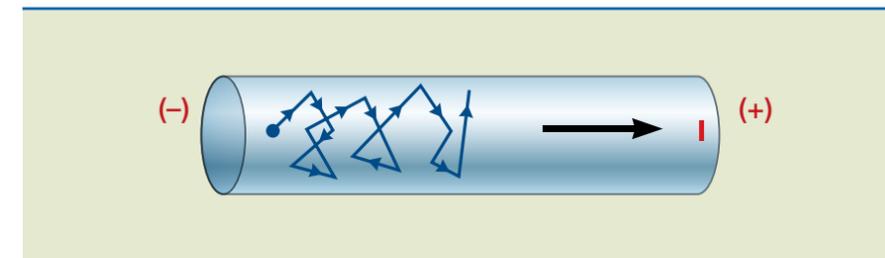


Figura 1.5

Efeito da resistência na corrente de um elétron.

1.2 As leis de Ohm

1.2.1 Primeira lei de Ohm

Em 1827, Georg Simon Ohm (1789-1854), físico e matemático alemão, verificou por meio de experimentos que, se determinada tensão U fosse aplicada aos terminais de um condutor, obtinha-se uma corrente I e que um aumento da tensão U causava um aumento no valor da corrente I . Observou também que o quociente entre os pares de valores de tensão e de corrente resultavam em uma constante, a resistência do material (R). Essa proporcionalidade é conhecida como 1ª lei de Ohm (equação 1.4) e também pode ser escrita na forma das equações 1.5, 1.6 e 1.7.

$$\frac{U_1}{I_1} = \frac{U_2}{I_2} = \frac{U_3}{I_3} = R \quad (\Omega) \quad (1.4)$$

$$R = \frac{U}{I} \quad (\Omega) \quad (1.5)$$

$$U = R \cdot I \quad (\text{V}) \quad (1.6)$$

$$I = \frac{U}{R} \quad (\text{A}) \quad (1.7)$$

Os componentes que obedecem a essas equações são chamados **resistores ôhmicos**.

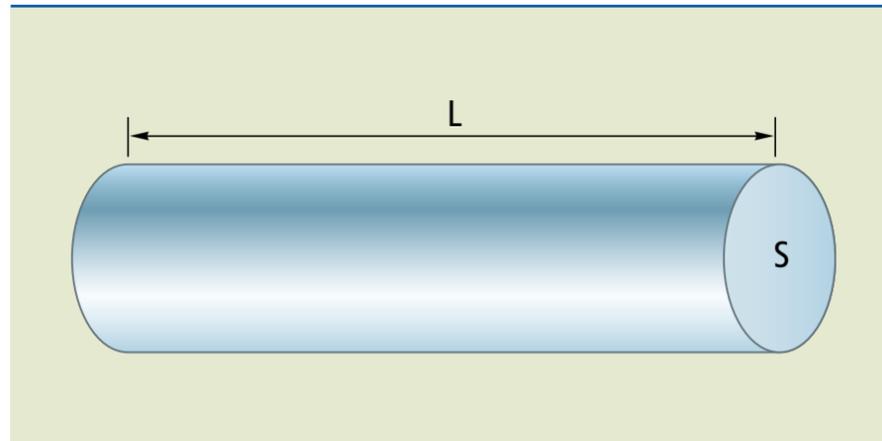
1.2.2 Segunda lei de Ohm

Ohm moldou fios de diferentes seções transversais S e diferentes comprimentos L e mediu os valores de suas resistências R (figura 1.6). Com esses parâmetros,

demonstrou que, em determinado fio condutor, mantendo-se a tensão e a temperatura constantes, a intensidade da corrente elétrica depende de seu comprimento e de sua seção transversal. Portanto, para fios de mesma espessura (seção transversal S), o aumento do comprimento (L) leva a um aumento proporcional na resistência (R).

Figura 1.6

Formato do fio para a 2ª lei de Ohm.



Para fios de mesmo comprimento (L), a diminuição da seção transversal (S) resulta no aumento na resistência (R). Com isso, Ohm concluiu que a resistência também depende do material de que é feito o fio e definiu a equação (1.8) que ficou conhecida como 2ª lei de Ohm:

$$R = \rho \cdot \frac{L}{S} \quad (\Omega) \quad (1.8)$$

em que:

L = comprimento do fio (em m);

S = seção transversal do fio (em m^2);

ρ = resistividade do material (em $\Omega \cdot m$).

Código de cores de resistores

Os resistores são componentes fabricados com valores padronizados. O valor da resistência do resistor pode vir carimbado em sua superfície ou ser estampado em forma de anéis coloridos, cujo código de cores pode ser visto na tabela da figura 1.7. No exemplo dado, temos o valor dos dois primeiros dígitos: 15 (anéis marrom e verde). O terceiro anel (marrom) multiplica o valor por 10. O quarto anel (prata) indica que a tolerância (variação) no valor nominal do resistor é de 10%. Assim, ficamos com um valor de resistência de $(150 \pm 15) \Omega$. Esse resistor pode ser fabricado com um valor mínimo de 135Ω até um máximo de 165Ω .

Um resistor com anéis coloridos (marrom, verde, marrom, prata, amarelo) é mostrado no topo. Linhas apontam para as colunas da tabela abaixo.

COR	1º algarismo	2º algarismo	Multiplicador	Tolerância
PRETO		0	X1	
MARROM	1	1	X10	
VERMELHO	2	2	X10 ²	
LARANJA	3	3	X10 ³	
AMARELO	4	4	X10 ⁴	
VERDE	5	5	X10 ⁵	
AZUL	6	6		
VIOLETA	7	7		
CINZA	8	8		
BRANCO	9	9		
PRATA			X0,01	± 10%
OURO			X0,1	± 5%

Figura 1.7

Código de cores para resistores.

1.3 Associação de resistores

Sempre que não se encontra no mercado um resistor de valor desejado, é necessário realizar uma associação de resistores. Tal associação é muito comum e para efeito de cálculos pode ser simplificada pelo resistor equivalente (R_{eq}), que representa a resistência total dos resistores associados. Outra situação que pode ocorrer é dispor de um equipamento com diversos resistores e ter de calcular sua resistência equivalente para avaliar a corrente consumida pela associação.

Os resistores podem ser associados em série, em paralelo e no modo misto, que contempla os dois casos.

1.3.1 Associação em série

Em uma associação em série, a corrente elétrica que percorre um resistor é a mesma em todo o circuito, conforme mostrado na figura 1.8, isto é:

$$I = I_1 = I_2 = I_3 = I_4 \quad (1.9)$$

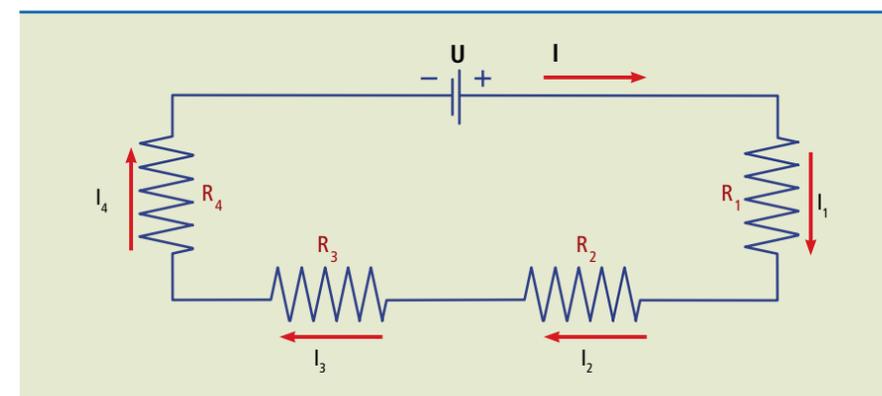


Figura 1.8

Circuito elétrico contendo resistores associados em série.

Aplicando-se a lei de Ohm, que estabelece que $U = R \cdot I$, a tensão do gerador da figura 1.8 pode ser escrita assim:

$$U = R_1 I_1 + R_2 I_2 + R_3 I_3 + R_4 I_4$$

Como $U = U_1 + U_2 + U_3 + U_4$ e considerando a equação 1.9, temos como resultado:

$$U = R_1 I + R_2 I + R_3 I + R_4 I$$

Colocando-se I em evidência, chega-se a:

$$U = I (R_1 + R_2 + R_3 + R_4)$$

Se $U/I = R_{eq}$, podemos concluir:

$$R_{eq} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 \quad (1.10)$$

Da associação em série chegamos às seguintes conclusões:

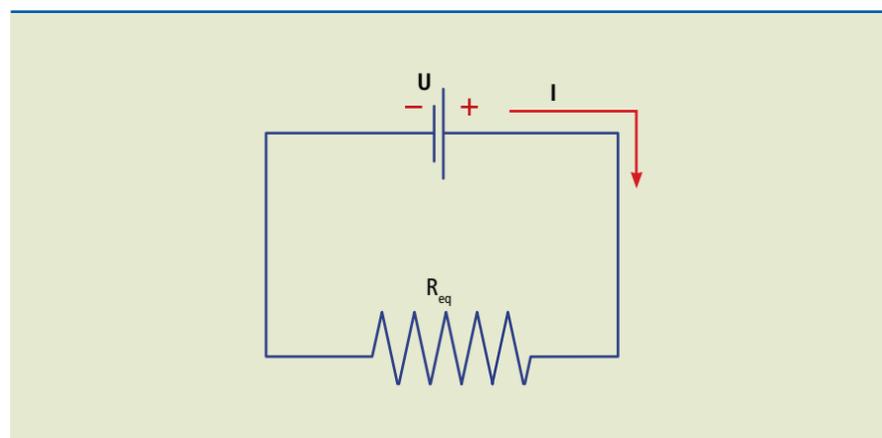
- a corrente elétrica é a mesma em todos os resistores;
- a tensão elétrica se divide entre todos os resistores proporcionalmente aos seus valores;
- o resistor equivalente à associação é a soma algébrica de todos os resistores envolvidos na associação (equação 1.10).

IMPORTANTE
O circuito com associação em série recebe o nome de divisor de tensão.

Conclusão: A resistência equivalente em uma associação em série é a soma das resistências individuais (figura 1.9).

Figura 1.9

Resistência equivalente.



1.3.2 Associação em paralelo

Em uma associação em paralelo, a tensão em todos os resistores é a mesma (figura 1.10). A soma das correntes que atravessam os resistores é igual à corrente total do circuito e é a mesma que atravessa o resistor equivalente. No caso dos resistores em paralelo, somam-se as correntes, enquanto nos circuitos com resistências em série as tensões é que são somadas.

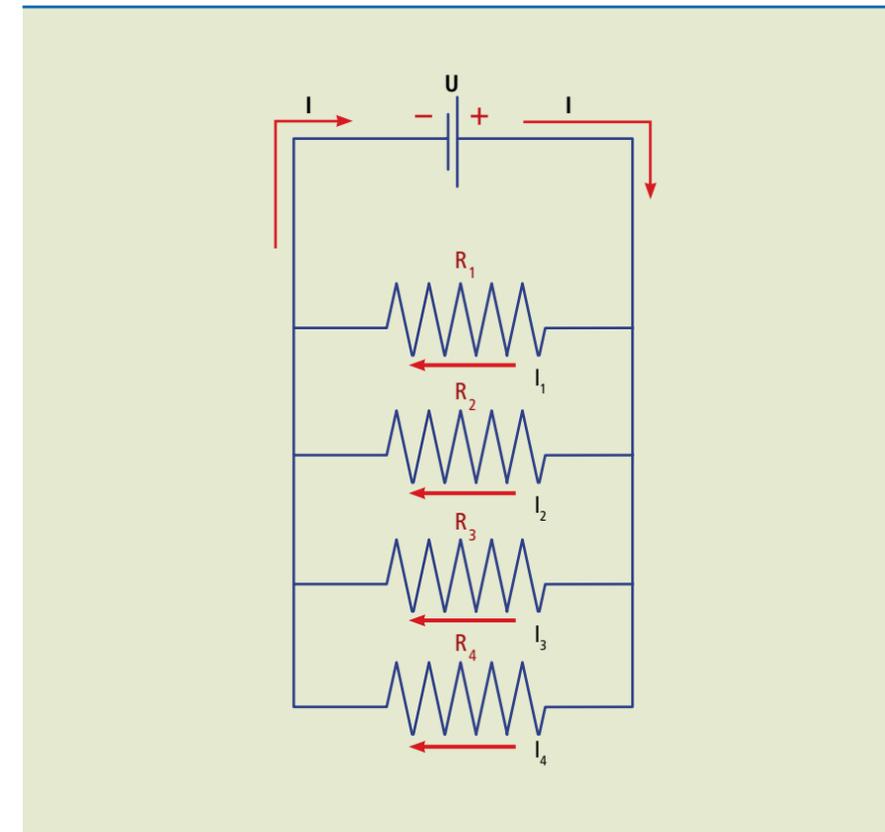


Figura 1.10

Circuito elétrico contendo resistores associados em paralelo.

A resistência equivalente de uma associação em paralelo sempre será menor que a do resistor de menor valor da associação.

Como todas as resistências estão submetidas à mesma tensão (figura 1.10), temos $U = U_1 = U_2 = U_3 = U_4$. A corrente total é igual à soma das correntes individuais, ou seja, $I = I_1 + I_2 + I_3 + I_4$. Podemos calcular a corrente nas resistências por:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; I_2 = \frac{U}{R_2}; I_3 = \frac{U}{R_3}; I_4 = \frac{U}{R_4}$$

sucessivamente. Chega-se, então, à equação 1.11:

$$I = \frac{U}{R_{eq}} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} + \frac{U}{R_4} \quad (1.11)$$

Como todas as tensões são iguais, podemos eliminá-las de todos os termos da equação, resultando na equação 1.12.

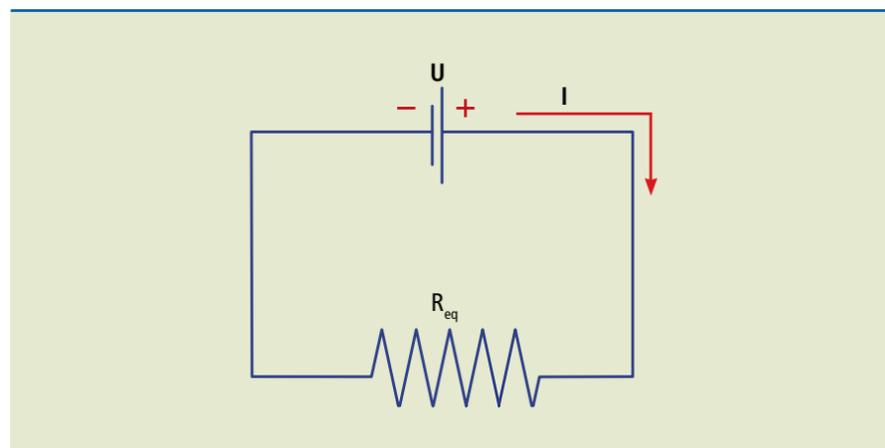
$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \quad (1.12)$$

DICA

O circuito com a associação de resistores em paralelo recebe o nome de divisor de corrente.

Conclusão: O circuito equivalente, tanto para resistências em série como para resistências em paralelo, é representado da mesma forma (figura 1.11).

Figura 1.11
Resistência equivalente.



Casos particulares na associação em paralelo

1. Quando se trabalha com apenas dois resistores em paralelo, podemos utilizar a equação:

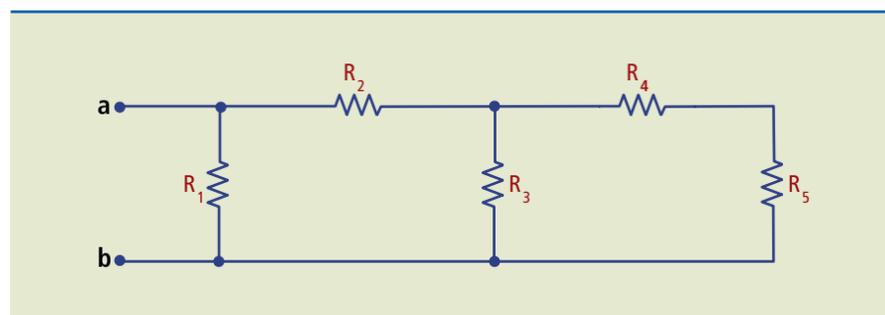
$$\frac{1}{R_{eq}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \rightarrow \frac{1}{R_{eq}} = \frac{R_2 + R_1}{R_1 \cdot R_2} \rightarrow R_{eq} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

2. Se todos os n resistores forem iguais e com valor R , podemos considerar $R_{eq} = R/n$. Assim, se $n = 2$, $R_{eq} = R/2$.

1.3.3 Associação mista

A associação mista significa que o circuito elétrico contém resistores associados em série e em paralelo. Para tanto, será considerado o circuito mostrado na figura 1.12 como exemplo de procedimento para determinar a resistência equivalente de uma associação mista. A resolução será feita por etapas.

Figura 1.12
Circuito misto de resistores.



Etapa 1

Associar todos os resistores que estejam em série. No caso da figura 1.12, temos R_4 e R_5 , que associados resultam em $R_A = R_4 + R_5$, mostrado na figura 1.13.

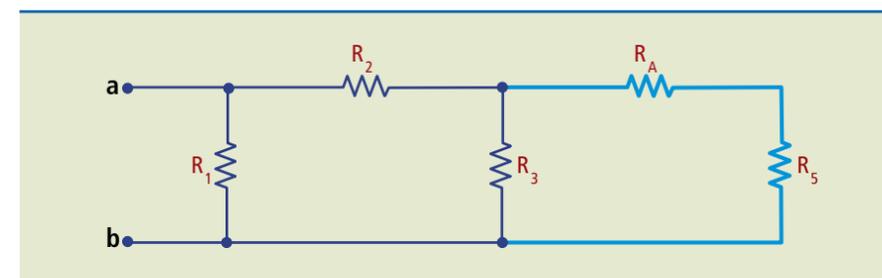


Figura 1.13
Resultado da etapa 1.

Etapa 2

Agora, temos R_3 em paralelo com R_A , que resulta no resistor equivalente

$$R_B = \frac{R_3 R_A}{R_3 + R_A}, \text{ mostrado na figura 1.14.}$$

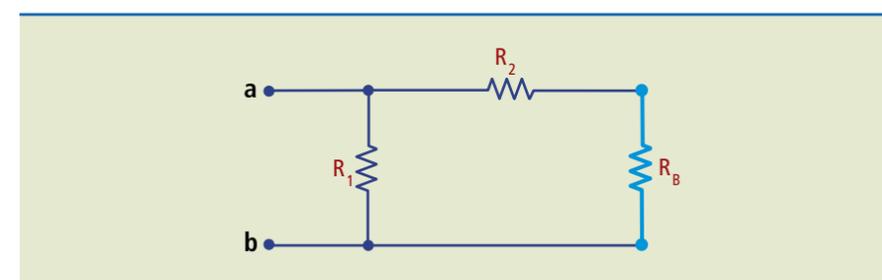


Figura 1.14
Resultado da etapa 2.

Etapa 3

Novamente, temos uma associação em série entre R_2 e R_B , que será chamada $R_C = R_2 + R_B$, mostrada na figura 1.15.

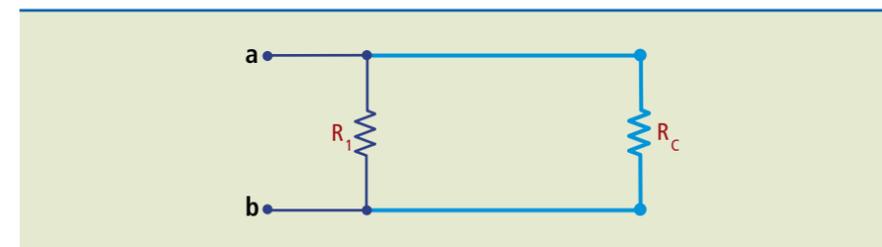


Figura 1.15
Resultado da etapa 3.

Etapa 4

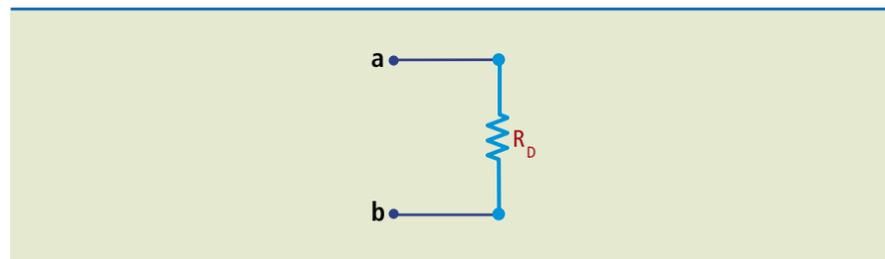
Agora, temos uma associação em paralelo entre R_1 e R_C , que será chamada:

$$R_D = \frac{R_1 R_C}{R_1 + R_C}$$

Aqui, R_D já é a resistência equivalente R_{eq} entre os pontos **a** e **b** (figura 1.16).

Figura 1.16

Resistência equivalente.



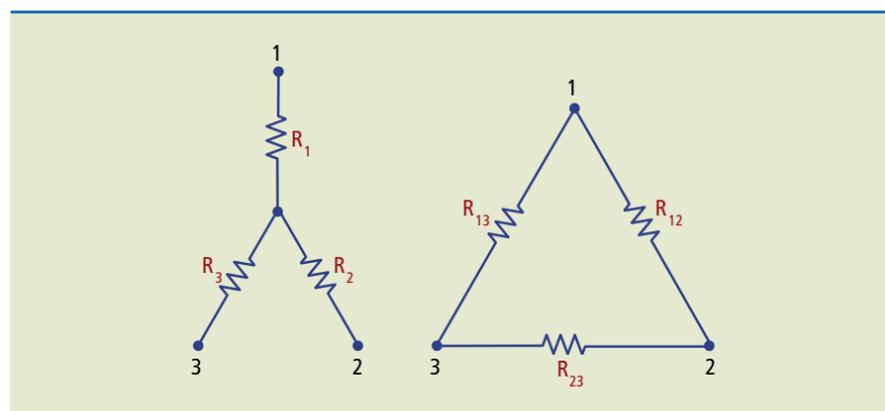
Conhecendo o valor da resistência equivalente (R_{eq}) e o valor da tensão (U), podemos aplicar a lei de Ohm para determinar o valor da corrente total (I) do circuito.

1.3.4 Transformação de resistências estrela-triângulo

Na prática podem existir situações em que haja associações de resistências que não se enquadram nos casos estudados até agora, ou seja, as associações em série, paralelo e mista. Em tal situação, será necessário utilizar a técnica da transformação estrela-triângulo, ou vice-versa, para a solução do problema, conforme mostra a figura 1.17.

Figura 1.17

Circuitos em estrela e triângulo.



Para a transformação de estrela para triângulo e de triângulo para estrela, devem-se aplicar as equações da tabela 1.1.

Tabela 1.1

Equações para transformação Y-Δ e Δ-Y.

Transformações de resistências Y-Δ e Δ-Y	
Estrela para triângulo (Y-Δ)	Triângulo para estrela (Δ-Y)
$R_{12} = \frac{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}{R_3}$	$R_1 = \frac{R_{12} R_{13}}{R_{12} + R_{13} + R_{23}}$
$R_{13} = \frac{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}{R_2}$	$R_2 = \frac{R_{12} R_{23}}{R_{12} + R_{13} + R_{23}}$
$R_{23} = \frac{R_1 R_2 + R_1 R_3 + R_2 R_3}{R_1}$	$R_3 = \frac{R_{13} R_{23}}{R_{12} + R_{13} + R_{23}}$

Exemplos

1. Transformar o circuito abaixo (figura 1.18) de estrela para triângulo.

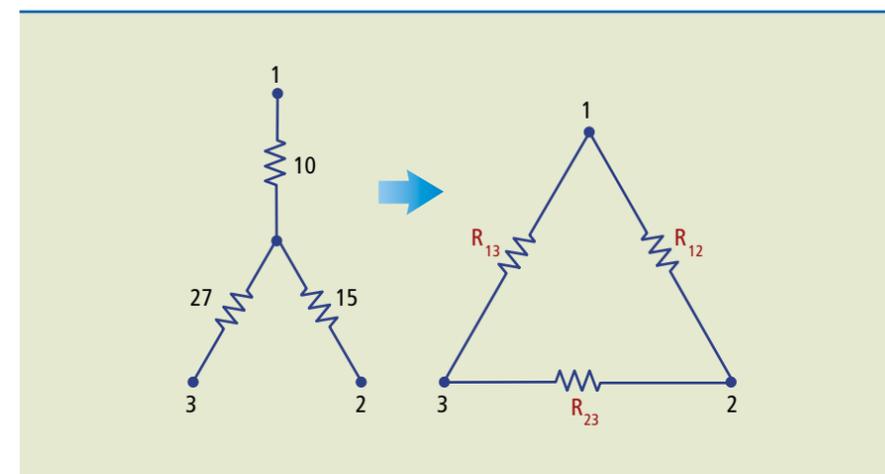


Figura 1.18

Transformação da ligação estrela para triângulo.

Solução:

Aplicando as fórmulas da transformação estrela-triângulo, obtemos:

$$R_{12} = \frac{10 \cdot 15 + 10 \cdot 27 + 15 \cdot 27}{27} = 30,56 \Omega$$

$$R_{13} = \frac{10 \cdot 15 + 10 \cdot 27 + 15 \cdot 27}{15} = 55 \Omega$$

$$R_{23} = \frac{10 \cdot 15 + 10 \cdot 27 + 15 \cdot 27}{10} = 82,5 \Omega$$

2. Transformar o circuito abaixo (figura 1.19) de triângulo para estrela.

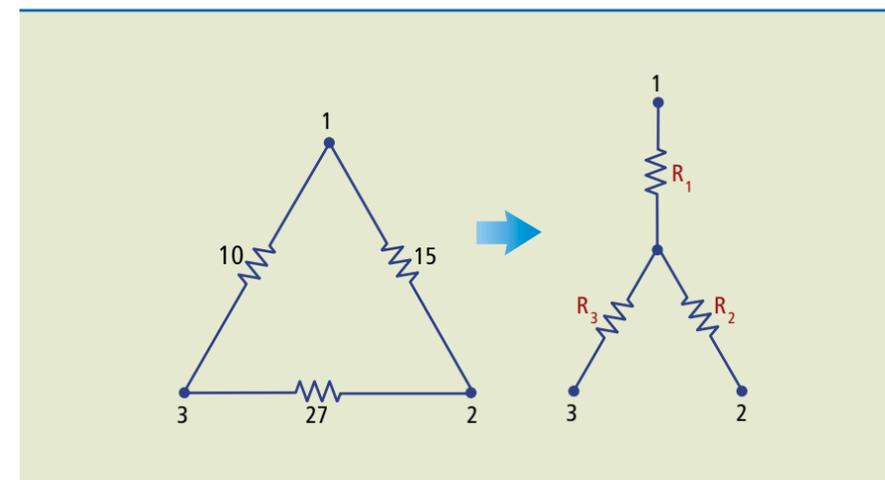


Figura 1.19

Transformação da ligação triângulo para estrela.

Solução:

Aplicando as fórmulas da transformação triângulo para estrela, obtemos:

$$R_1 = \frac{15 \cdot 10}{15 + 10 + 27} = 2,88 \, \Omega$$

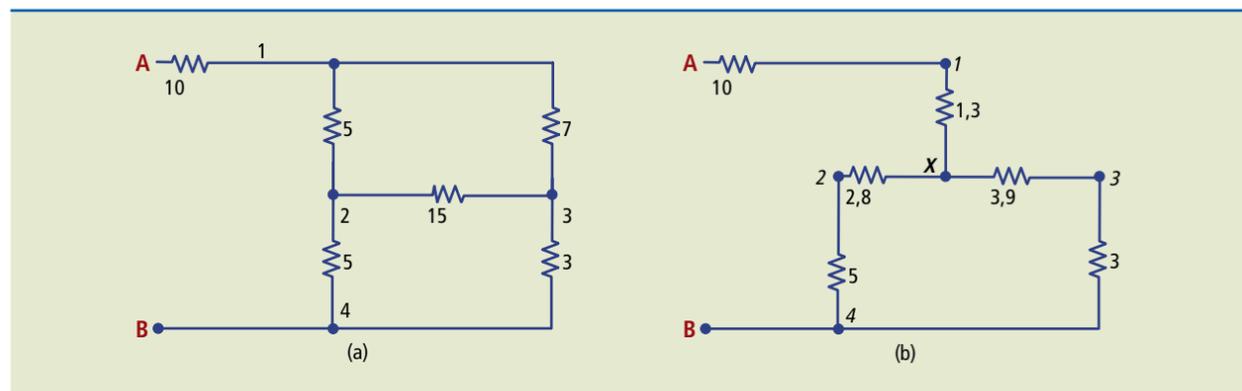
$$R_2 = \frac{15 \cdot 27}{15 + 10 + 27} = 7,79 \, \Omega$$

$$R_3 = \frac{10 \cdot 27}{15 + 10 + 27} = 5,19 \, \Omega$$

Figura 1.20

Processo de simplificação de circuito:
a) circuito original;
b) transformando o triângulo de nós 1, 2, 3 em estrela.

3. Determinar a resistência equivalente entre os pontos A e B do circuito da figura 1.20a.



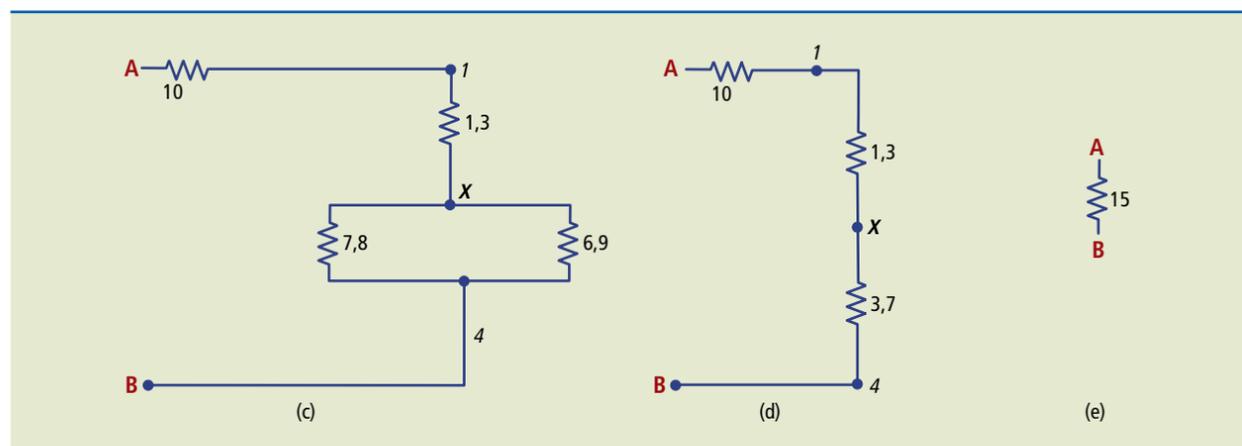
Solução:

Etapa 1: Transformando de triângulo para estrela os resistores entre os nós 1, 2 e 3 da figura 1.20a, obtemos o circuito da figura 1.20b.

Etapa 2: Associam-se em série os resistores do ramo que contém os nós X, 2 e 4, e o ramo dos nós X, 3 e 4, da figura 1.20b, obtendo a figura 1.20c.

Figura 1.20

Processo de simplificação do circuito.



Etapa 3: Associam-se em paralelo os resistores de 7,8 e 6,9 Ω da figura 1.20c, obtendo a figura 1.20d.

Etapa 4: Finalmente, associam-se em série os resistores da figura 1.20d resultando na figura 1.20e.

1.4 Energia e potência elétricas

Embora energia seja um conceito primitivo, da mesma forma que matéria, costuma-se defini-la como a capacidade de realizar trabalho. Ambas as grandezas, trabalho (τ) e energia (E), têm a mesma unidade, que no SI é o joule (J). Para a realização de um trabalho é preciso que haja a transformação da energia de uma forma em outra. Por exemplo: em um motor ocorre a transformação da energia elétrica em mecânica; em uma bateria, a energia química é convertida em elétrica; em uma lâmpada se dá a transformação de energia elétrica em luminosa.

A potência (P) é definida como a quantidade de trabalho realizado τ , ou energia convertida ΔE , por unidade de tempo. A potência pode, então, ser calculada dividindo-se a quantidade de trabalho realizado τ , ou a variação da energia ΔE , pelo intervalo de tempo considerado Δt , conforme a equação 1.13:

$$P = \frac{\tau}{\Delta t} = \frac{\Delta E}{\Delta t} \text{ s} \quad (1.13)$$

A unidade empregada no SI para potência é o watt (W), e, como vimos, para energia (ou trabalho) é o joule (J). Pela equação 1.13 acima, temos:

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$$

Em termos de energia mecânica, 1 J corresponde ao trabalho realizado por uma força constante de 1 N aplicada sobre um ponto, para deslocá-lo no espaço de 1 m na direção da força. A potência de 1 W é fornecida a um corpo por uma força de 1 N, que o desloca com uma velocidade de 1 m/s.

Em termos de energia elétrica, obtém-se P pela equação 1.14: $P = UI$ (1.14)

Assim, fornecer 1 W a uma carga corresponde a aplicar uma tensão de 1 V, com uma corrente de 1 A. Se essa carga ficar ligada por 1 s, receberá uma energia:

$$\Delta E = P \cdot \Delta t = 1 \text{ W} \cdot 1 \text{ s} = 1 \text{ J}$$

Com base na equação 1.14 acima e na 1ª lei de Ohm (equação 1.6), obtemos mais duas relações úteis como as equações 1.15 e 1.16 dadas a seguir:

$$P = UI = (RI)I = RI^2 \quad (1.15)$$

$$P = UI = U \left(\frac{U}{R} \right) = \frac{U^2}{R} \quad (1.16)$$

Outras unidades de potência, empregadas para representar o que se chama de potência mecânica, as potências de motores, são o HP (*horsepower*) e o cv (cavalo-vapor).

Conversão de unidades	
1 HP	745,7 W
1 cv	735,5 W

As outras unidades de energia (trabalho) usadas na prática são:

- caloria: cal, utilizada em processos térmicos;
- quilowatt-hora: kWh, usada para a medida de consumo de energia elétrica.

Conversão de unidades	
1 cal	4,18 J
1 kWh	$3,6 \times 10^6$ J

Exemplo

Calcular a quantidade de energia consumida em um banho de 20 minutos usando um chuveiro de potência 7 500 W. Apresentar o resultado em J e em kWh.

Solução:

Sabendo que 20 minutos = $20 \cdot 60$ s = 1 200 s, da equação 1.13 obtemos:

$$\Delta E = P\Delta t = 7\,500 \text{ W} \cdot 1\,200 \text{ s} = 9\,000\,000 \text{ J} = 9 \cdot 10^6 \text{ J}$$

Calculando em kWh:

Primeiro transforma-se a potência em kW: $P = 7\,500 \text{ W} = 7,5 \cdot 10^3 \text{ kW}$
Sabendo que $\Delta t = 20 \text{ min} = 1/3 \text{ h}$, obtemos: $\Delta E = 7,5 \cdot 1/3 = 2,5 \text{ kWh}$

Observa-se que o valor numérico em J é muito maior que seu correspondente em kWh. Portanto, torna-se mais prático para as concessionárias de energia elétrica trabalhar com o kWh.

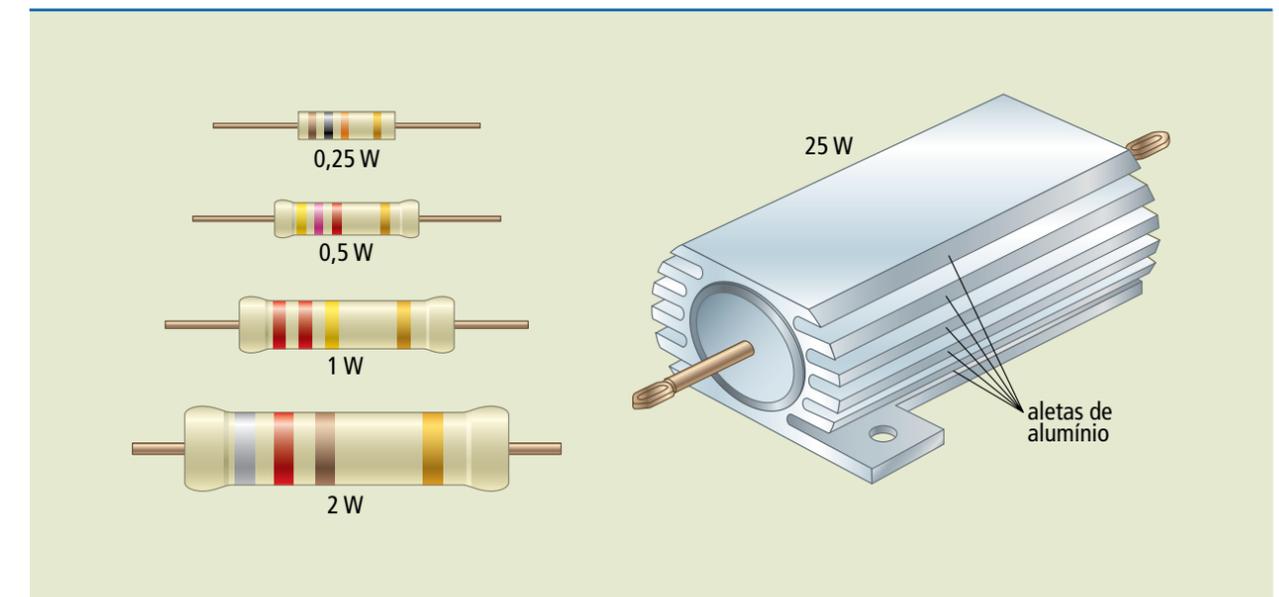
1.4.1 Potência em resistores comerciais

Muitos dispositivos, como é o caso dos resistores, dissipam, em parte ou totalmente, a potência consumida na forma de energia térmica. Em um chuveiro, o calor é trocado com a água. Nos componentes eletrônicos, a troca se dá em

geral com o ar. Assim, quanto maior a potência dissipada, maior a área externa do componente, sendo necessário, por vezes, o uso de dissipadores de calor. A figura 1.21 mostra o encapsulamento de resistores empregados em circuitos eletrônicos.

Figura 1.21

Tamanho do resistor, potência elétrica e dissipador de calor.



O efeito Joule

Ao falar de resistência elétrica (seção 1.1.3), foi comentado que, com a passagem da corrente elétrica, os elétrons, em seu trajeto, “chocam-se com os átomos” da estrutura do condutor. Isso aumenta a agitação dos átomos e, conseqüentemente, a temperatura do condutor/resistor. Assim, o resistor tem como principal característica transformar toda a energia elétrica recebida em energia térmica (calor).

Ao falar de potência (seção 1.4.1 – figura 1.21), também foi visto que, quanto maior a potência dissipada, maior deve ser o tamanho do resistor/dispositivo, para evitar danos a ele por temperatura excessiva. A esse fenômeno, do aquecimento do dispositivo pela passagem da corrente elétrica, é dado o nome de efeito Joule.

1.4.2 Convenção de sinais

Neste ponto é necessário lembrar-se de uma importante convenção. Em um bipolo gerador de energia elétrica a corrente elétrica (convencional) sai do polo positivo (potencial maior), enquanto em um bipolo receptor de energia elétrica a corrente entra pelo polo positivo. Adota-se também que a energia/potência fornecida pelo bipolo gerador é a mesma recebida/dissipada pelo bipolo receptor.

1.4.3 Rendimento energético

Nenhum processo de conversão de energia (energia elétrica em energia luminosa, por exemplo) tem 100% de eficiência. Isto é, nem toda a energia que chega a um dispositivo ou sistema é transformada na energia desejada. A eficiência ou rendimento energético (η) de um sistema é expresso em porcentagem e é dado pela equação 1.17:

$$\eta = \frac{E_{\text{saída}}}{E_{\text{entrada}}} \cdot 100 \quad (1.17)$$

É importante lembrar que dispositivos como um motor, por exemplo, dissipam apenas parte da potência consumida sob a forma de calor. Diz-se que o rendimento (η) de um motor é a porcentagem da energia elétrica consumida (equação 1.18) e, portanto, da potência transformada em energia mecânica.

$$\eta = \frac{P_{\text{saída}}}{P_{\text{entrada}}} \cdot 100 = \frac{P_{\text{mec.}}}{P_{\text{elét.}}} \cdot 100 \quad (1.18)$$

Exemplo

Um motor elétrico é percorrido por uma corrente de 5 A quando ligado em 220 V. Sabendo que o rendimento (η) do motor é 85%, calcular:

- a) a potência elétrica do motor (P_E);
- b) a potência mecânica (P_M) obtida no eixo do motor (em cv);
- c) a energia consumida (em kWh) em 3 horas de funcionamento.

Solução:

- Da equação 1.16 calculamos a potência elétrica do motor:

$$P_E = UI = 220 \text{ V} \cdot 5 \text{ A} = 1100 \text{ W} = 1,1 \text{ kW}$$

- Da equação 1.18 calculamos a potência mecânica do motor:

$$P_M = \eta P_E = 0,85 \cdot 1100 = 935 \text{ W}$$

Se $1 \text{ cv} = 735,5 \text{ W}$ e $P_M = 935 \text{ W}$, então: $P_M = 935/735,5 = 1,27 \text{ cv}$

- $E_c = P_E \cdot \Delta t = 1,1 \text{ kW} \cdot 3 \text{ h} = 3,3 \text{ kWh}$

1.5 Corrente contínua versus corrente alternada

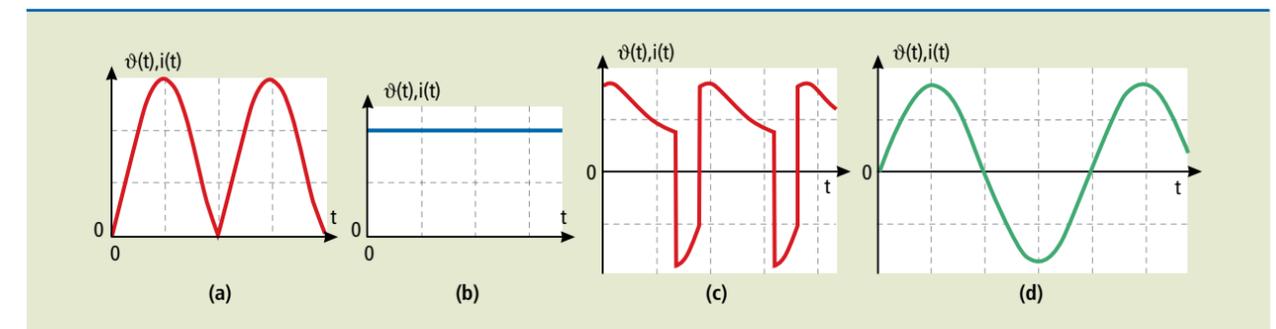
A maior parte da energia elétrica é gerada e transmitida em tensão e corrente alternadas. A maioria das cargas residenciais e industriais utiliza diretamente a tensão alternada, como, por exemplo, motores CA, estufas, lâmpadas de diver-

sos tipos, máquinas de solda a arco e fornos a arco. Outras cargas necessitam de tensões contínuas, como cubas eletrolíticas para o refino do alumínio, sistemas de galvanoplastia, sistemas de solda a arco em CC e motores CC (trens, elevadores, equipamentos industriais).

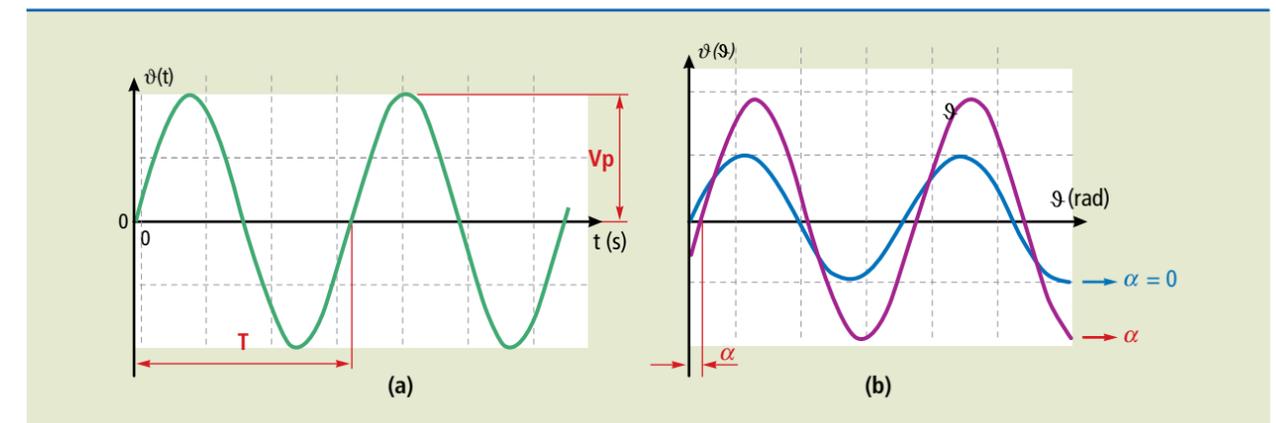
Uma tensão (ou corrente) contínua, como mostrado nos itens **a** e **b** da figura 1.22, não altera sua polaridade ao longo do tempo, ao contrário da tensão (ou corrente) alternada, mostrada nos itens **c** e **d**, na qual essa alteração ocorre. As formas de onda mostradas em **a** e **b** são contínuas, e a tensão da figura 1.22b é de grande interesse prático, por ser constante. Ela é obtida quando se faz uso, por exemplo, de pilhas, baterias, retificadores, fontes reguladas e geradores CC. A tensão mostrada no item **d** da figura 1.22, que tem formato senoidal, é a gerada e distribuída aos consumidores residenciais, comerciais e industriais.

Figura 1.22

Formas de onda de tensões e correntes:
a) contínua;
b) contínua constante;
c) alternada;
d) alternada senoidal.



A tensão e a corrente alternadas e seus parâmetros são mostrados na figura 1.23.



A tensão alternada senoidal da figura 1.23 é definida matematicamente pela equação (1.19):

$$v(t) = V_p \cos(\omega t + \alpha) \quad (1.19)$$

em que:

V_p é a amplitude, ou valor de pico, ou valor máximo da senoide;

Figura 1.23

Tensão alternada senoidal e parâmetros característicos:
a) tensão em função do tempo t ;
b) tensão em função do ângulo θ .

$\omega = 2\pi f$ é a velocidade angular em rad/s;
 $f = 1/T$ é a frequência do sinal em hertz (Hz), ou ciclos por segundo;
 T é o período da tensão em segundos (s), ou seja, a cada período T a forma de onda se repete (ver figura 1.22d);
 α é o ângulo de fase em radianos (rad); indica o deslocamento horizontal da forma de onda.

Um problema prático: qual é a potência consumida por uma resistência de chuveiro de valor R , conectada a uma fonte com tensão alternada definida pela equação acima (figura 1.22d)?

Solução: Se a tensão $v(t)$ fosse constante e de valor V_p , a potência consumida pelo chuveiro seria de $P = V_p^2/R$. Como nesse caso a tensão é alternada senoidal e, portanto, $v(t)$ é, no máximo, igual a V_p , fica evidente que a potência consumida será bem menor. Consegue-se provar e demonstrar experimentalmente que, para tensão senoidal, a potência realmente consumida é definida por:

$$P = \frac{(V_p/\sqrt{2})^2}{R}$$

É como se aplicássemos uma tensão contínua de valor $V_p/\sqrt{2}$ à resistência. Esse valor, que, colocado na fórmula, fornece a potência consumida real, é chamado **valor eficaz**.

Ao dizermos que a tomada da sala tem tensão de 110 V, estamos afirmando que seu valor eficaz é de 110 V, e seu valor de pico é de $110\sqrt{2} = 155,6$ V.

No dia a dia, praticamente só usamos o valor eficaz. É o valor que se obtém nos instrumentos de medição e que utilizamos para o cálculo da potência consumida. Resumindo, para tensões alternadas senoidais, o valor eficaz é calculado por:

$$V_{ef} = V_p/\sqrt{2}$$

Observação: Tudo o que foi discutido e demonstrado até aqui é válido também para correntes alternadas.

1.5.1 O fasor – uma ferramenta útil

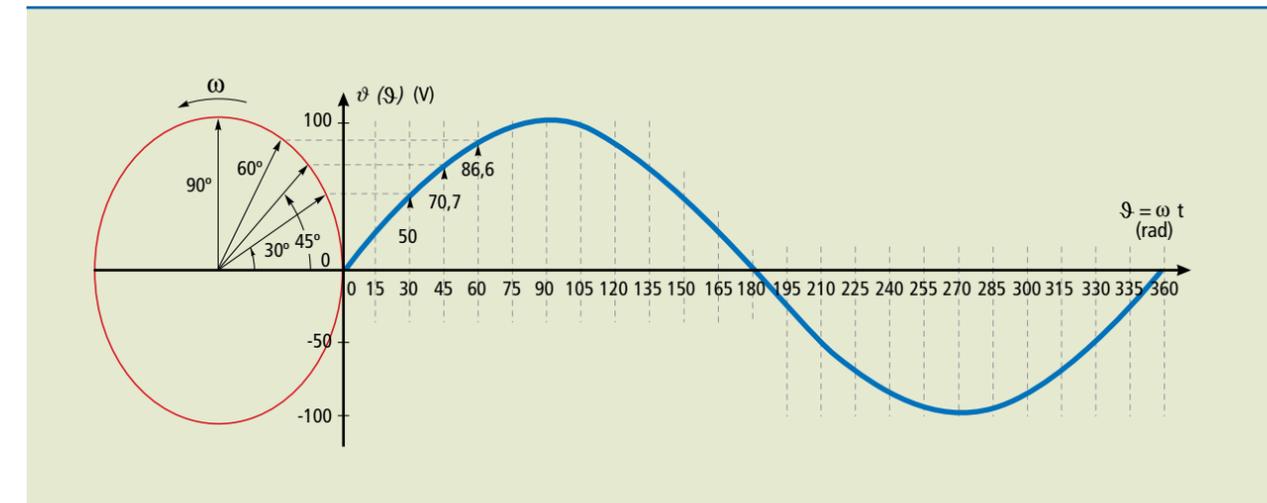
Lidar com equações trigonométricas como a equação senoidal é razoavelmente trabalhoso. Em eletricidade, costuma-se associar a equação senoidal a um número complexo, conforme indicado na figura 1.24.

O fasor, assim como o vetor, é um segmento de reta orientado. Porém, diferentemente do vetor, é um segmento de reta orientado que gira com a mesma velocidade angular que define sua senoide de origem.

O fasor é representado por um número complexo na forma polar. O comprimento da seta que o simboliza em um diagrama indica o módulo da tensão (ou corrente) alternada, ou seja, seu valor eficaz. O ângulo que a seta faz com o eixo horizontal corresponde ao ângulo de fase.

Figura 1.24

Tensão alternada senoidal e seu fasor correspondente.



Geralmente o fasor de referência é horizontal e corresponde a 0° . Adota-se o sentido anti-horário, a partir do fasor de referência, para a marcação de ângulos positivos.

$$v(t) = V_p \cos(\omega t + \alpha) \quad \Leftrightarrow \quad \dot{V} = \frac{V_p}{\sqrt{2}} \angle \alpha \quad (1.20)$$

O que é mostrado na equação (1.20) não é uma igualdade. A expressão dada à esquerda é a forma de onda senoidal real, que pode ser vista com o uso do osciloscópio. A da direita é o fasor \dot{V} , **número complexo** associado a $v(t)$. É uma notação mais compacta que facilita os cálculos de correntes e tensões.

A seguir, exemplo de cálculo para demonstrar a utilidade do uso dos fasores.

Exemplo

Se conectarmos dois geradores em série, um com tensão $v_1(t) = 10 \cos(377 t)$ V e o segundo definido por $v_2 = 10 \cos(377 t + \pi/2)$ V, quanto vale $v_1 + v_2$?

Solução:

Podemos resolver utilizando a trigonometria, mas é um processo trabalhoso que requer várias passagens. Vamos usar os fasores.

• **Passo 1:** converter as tensões $v_1(t)$ e $v_2(t)$ em fasores:

$$\dot{V}_1 = (10/\sqrt{2}) \angle 0^\circ \quad \text{e} \quad \dot{V}_2 = (10/\sqrt{2}) \angle 90^\circ$$

Para evitar confusão com o símbolo usado para corrente elétrica (i), costuma-se representar o número imaginário $\sqrt{-1}$ com a letra j . Ou seja, $j = \sqrt{-1}$.

- **Passo 2:** para somar os fasores, números complexos na forma polar, é preciso transformá-los para a forma cartesiana ou retangular. Obtemos, então:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 + \dot{V}_2 &= (10 / \sqrt{2})|0^\circ + (10 / \sqrt{2})|90^\circ \xrightarrow{\text{passando para forma cartesiana}} \\ &= (10 / \sqrt{2}) + (10 / \sqrt{2})j \xrightarrow{\text{voltando para forma polar}} \\ &= 10|45^\circ \end{aligned}$$

- **Passo 3:** passar da notação fasorial para a equação senoidal, em função do tempo:

$$v_1(t) + v_2(t) = 10\sqrt{2} \cos(377t + \pi/4) V$$

1.5.2 Comportamento de resistores, indutores e capacitores em corrente alternada

O resistor

A lei de Ohm afirma que $I = V(t)/R$. Assim, se a tensão é senoidal, com valor de pico V_p , a corrente também é senoidal, em fase com $V(t)$ e com valor de pico $I_p = V_p/R$.

A figura 1.25 mostra a tensão e a corrente em um resistor de 2Ω , alimentado por uma tensão senoidal com valor de pico de $100 V$ e frequência de $60 Hz$. O valor de pico da corrente será de $I_p = 100/2 = 50 A$. A figura 1.26 mostra os fasores da tensão e da corrente em fase.

Figura 1.25
Tensão e corrente em resistor.

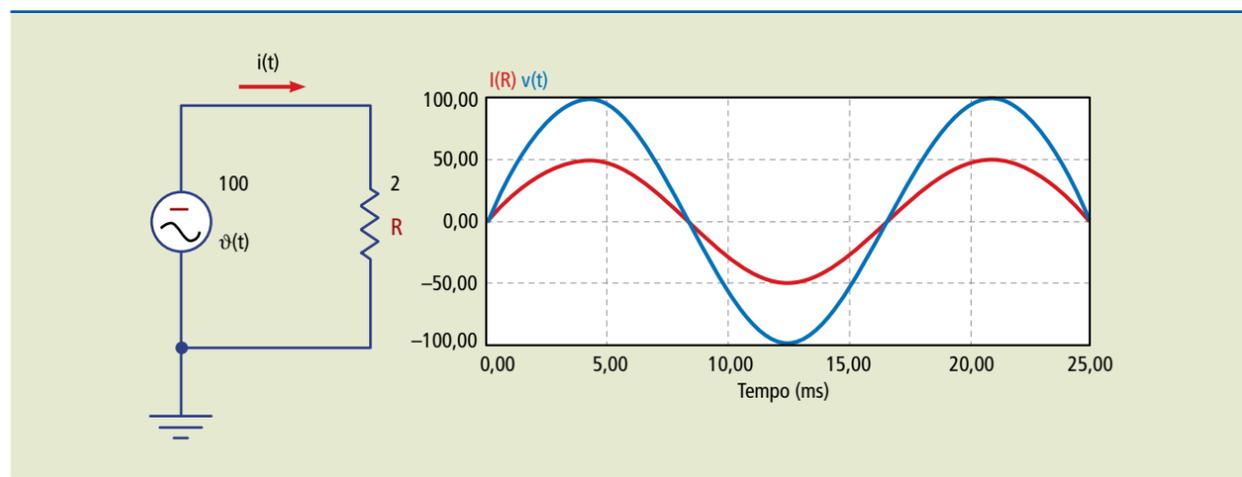
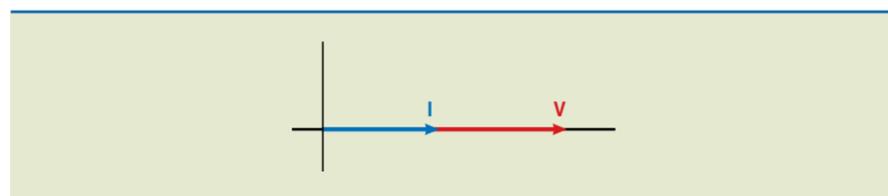


Figura 1.26
Diagrama fasorial com tensão e corrente em fase.



O indutor

O indutor é basicamente um condutor enrolado sobre um carretel, podendo ter núcleo de ferro ou de ar. A figura 1.27 ilustra o símbolo gráfico do indutor.

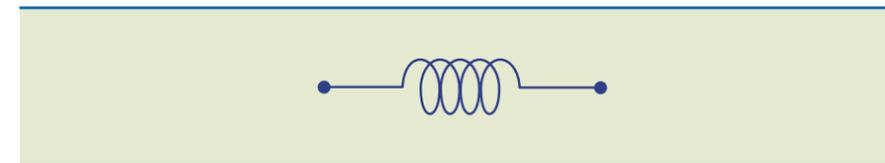


Figura 1.27
Símbolo do indutor.

Caracterizado pela indutância, medida em henry (H), armazena energia sob a forma de campo magnético e oferece oposição à passagem de corrente alternada. Assim, da mesma forma que foi definida a resistência em um resistor, no indutor define-se a reatância indutiva X_L , que tem a mesma unidade da resistência, ou seja, o ohm (Ω), como:

$$X_L = \omega L = 2\pi fL \quad (1.21)$$

Quanto maior a frequência, maior o valor de X_L e menor a corrente que passa pelo circuito. No caso da corrente contínua, em que a frequência é $f = 0$, a reatância é nula, ou seja, temos um curto-circuito.

A figura 1.28 mostra a tensão e a corrente em um indutor de indutância $L = 5,305 \cdot 10^{-3} H = 5,305 mH$, alimentado por uma tensão senoidal com valor de pico de $100 V$ e frequência de $60 Hz$. Uma vez que $X_L = \omega L = 2\pi fL$, o valor de pico da corrente é dado por:

$$I_p = 100/X_L = 100/(2\pi 60 \cdot 5,305 \cdot 10^{-3}) = 50 A$$

A corrente estará atrasada 90° com relação à tensão. Para verificar se a corrente está atrasada, basta localizar o instante em que a tensão começa a ficar positiva. A corrente começa a ficar positiva após $1/4$ de ciclo (90°). A figura 1.29 representa o diagrama fasorial com a corrente atrasada com relação à tensão.

Figura 1.28
Tensão e corrente em um indutor.

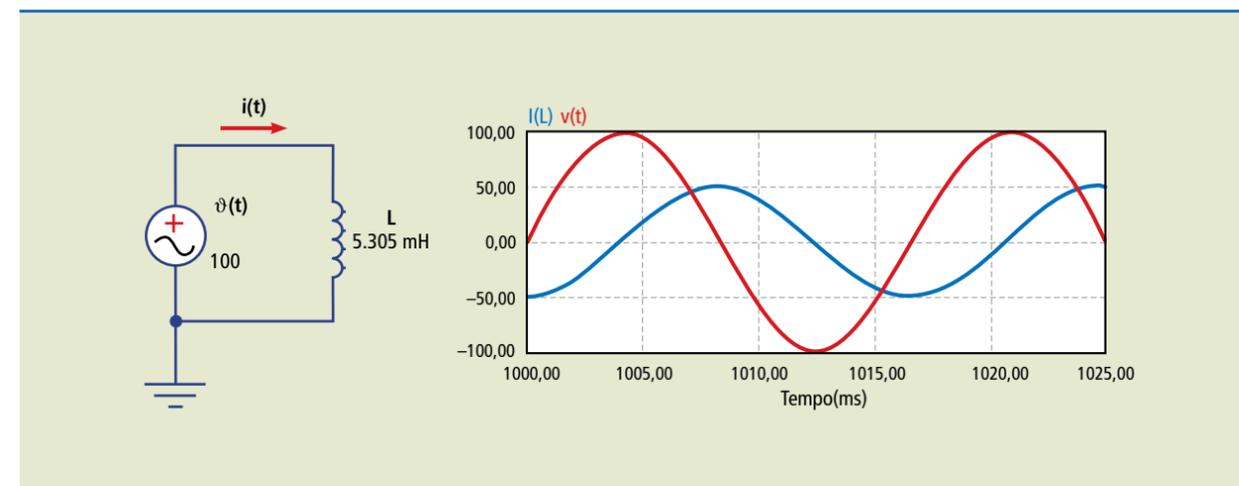
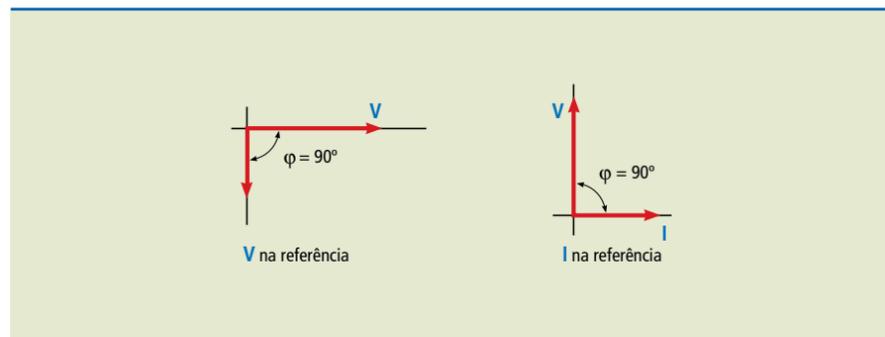


Figura 1.29

Diagrama fasorial com a corrente atrasada em 90° com relação à tensão.



O capacitor

O capacitor é um dispositivo elétrico formado por duas placas condutoras metálicas (por exemplo, filme de alumínio), separadas por um material isolante chamado dielétrico (poliéster, polipropileno, papel, ar etc.). Os capacitores são bastante empregados em instalações industriais para a correção do fator de potência. A figura 1.30 ilustra o símbolo gráfico do capacitor.

Figura 1.30

Símbolo do capacitor:



O capacitor, caracterizado pela capacitância medida em faraday (F), armazena energia em seu campo elétrico e oferece oposição à passagem de corrente alternada. Assim como foi definida a resistência para um resistor e a reatância indutiva para um indutor, em um capacitor é definida a reatância capacitiva X_C , que também possui a mesma unidade da resistência, o ohm (Ω), como:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} \quad (1.22)$$

Quanto maior a frequência, menor o valor de X_C e maior a corrente que passa pelo circuito. Para a corrente contínua, com $f = 0$, a reatância é infinita, ou seja, temos um circuito aberto.

A figura 1.31 mostra a tensão e a corrente em um capacitor de $C = 1,32 \text{ mF}$ alimentado por uma tensão senoidal com valor de pico de 100 V e frequência de 60 Hz. O valor de pico da corrente é dado por:

$$I_p = 100/X_C = 100/(2\pi \cdot 60 \cdot 1,32 \cdot 10^{-3})^{-1} = 50 \text{ A}$$

A corrente estará adiantada 90° com relação à tensão. Para verificar se a corrente está adiantada, basta localizar o instante em que a tensão começa a ficar positiva. A corrente começa a ficar positiva ¼ de ciclo (90°) antes da tensão. A figura 1.32 mostra o diagrama fasorial com a corrente adiantada em relação à tensão.

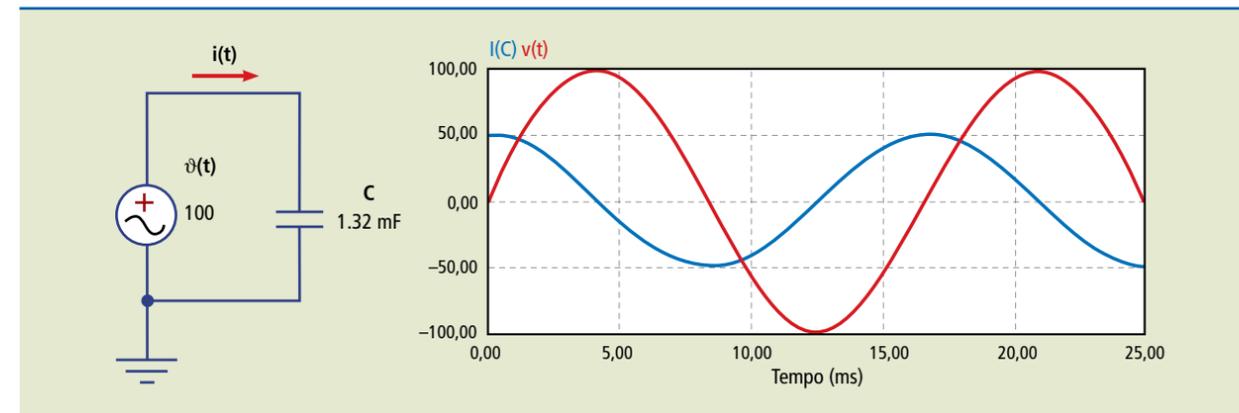
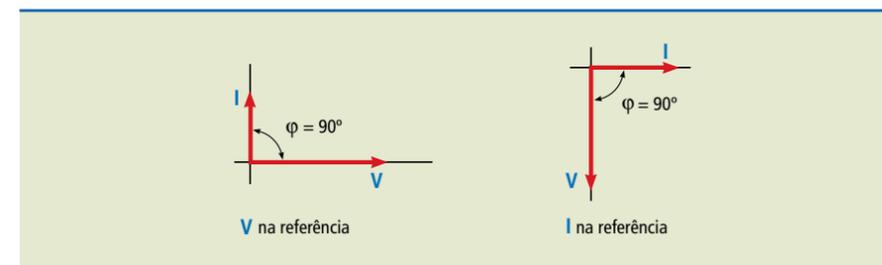


Figura 1.31

Tensão e corrente em um capacitor.

Figura 1.32

Diagrama fasorial com a corrente adiantada 90° com relação à tensão.



1.5.3 Impedância – uma extensão da lei de Ohm

Todos os circuitos elétricos de corrente alternada (CA) contêm alguma quantidade de resistência, indutância e capacitância. Para o estudo do circuito, devem ser calculadas as respectivas reatâncias: indutiva (X_L) e capacitiva (X_C).

A resistência, com as reatâncias, limita a corrente nos circuitos de corrente alternada. A oposição total causada por esses três elementos limitadores de corrente é denominada impedância (Z), cuja unidade é o ohm (Ω).

A impedância é associada a um número complexo que, se exibido na forma cartesiana ou retangular, tem a parte real representada pela resistência e a parte imaginária, pelas reatâncias. Uma reatância indutiva é, por convenção, designada por $+jX_L$. Por efeito oposto ao da reatância indutiva, a reatância capacitiva é designada por $-jX_C$. A resistência elétrica é sempre um número real e positivo.

	Resistor	Indutor	Capacitor
Resistência/ reatância (Ω)	R	$+jX_L$	$-jX_C$

Tabela 1.2

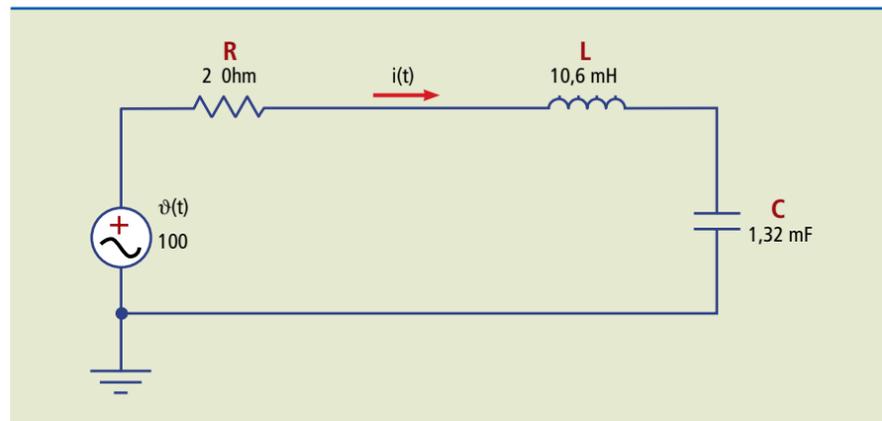
Resumo da representação da impedância.

Exemplo

Esses novos conceitos são empregados em um exercício em que se quer calcular a corrente do circuito da figura 1.33, que é alimentado por uma fonte senoidal com tensão de pico de 100 V e frequência de 60 Hz.

Figura 1.33

Circuito RLC em série.



Solução:

- **Passo 1:** Calcular o fasor correspondente à tensão $v(t)$, obtendo-se:

$$\dot{V} = (100/\sqrt{2})\underline{0^\circ}$$

- **Passo 2:** Calcular as reatâncias X_L e X_C dos componentes:

$$R = 2 \Omega \quad \dot{X}_L = j2\pi 60 \cdot 10,6 \text{ mH} = 4j\Omega \quad \dot{X}_C = -j \frac{1}{2\pi 60 \cdot 1,32 \text{ mF}} = -2j\Omega$$

- **Passo 3:** Calcular a impedância equivalente do mesmo modo que se calcula resistência equivalente em circuitos CC. Todas as ferramentas apresentadas (associação em série, em paralelo, transformação estrela-triângulo) são válidas, com a diferença de que agora se utilizam números complexos. Portanto, no exemplo temos a associação em série de três impedâncias que resulta em:

$$\dot{Z} = R + \dot{X}_L + \dot{X}_C = 2 + 4j - 2j = 2 + 2j = 2,83\sqrt{2}\underline{45^\circ} \Omega$$

- **Passo 4:** Calcular a corrente pela extensão da lei de Ohm, utilizando a impedância equivalente no lugar da resistência. Obtém-se:

$$\dot{i} = \frac{\dot{V}}{\dot{Z}} = \frac{(100/\sqrt{2})\underline{0^\circ} \text{ V}}{2,83\sqrt{2}\underline{45^\circ} \Omega} = 25\sqrt{2}\underline{-45^\circ} \text{ A}$$

O resultado apresenta uma corrente eficaz de 25 A, atrasada 45° com relação à tensão. Apesar do capacitor, o circuito tem característica indutiva, pois a reatância indutiva é maior que a capacitiva.

- **Passo 5:** Podemos obter a equação da forma de onda da corrente:

$$i(t) = 25\sqrt{2} \cos(377t - \pi/4) \text{ A}$$

1.5.4 Potência em corrente alternada

Potência instantânea em um resistor

Em corrente contínua, a potência é calculada simplesmente por $P = UI$. Em corrente alternada, a tensão e a corrente variam no tempo, resultando uma potência também variável no tempo, conforme ilustrado na figura 1.34, que mostra a tensão com valor de pico de 100 V e a corrente com valor de pico de 50 A em um resistor. A potência é o produto $v(t) \cdot i(t)$, calculado instantaneamente.

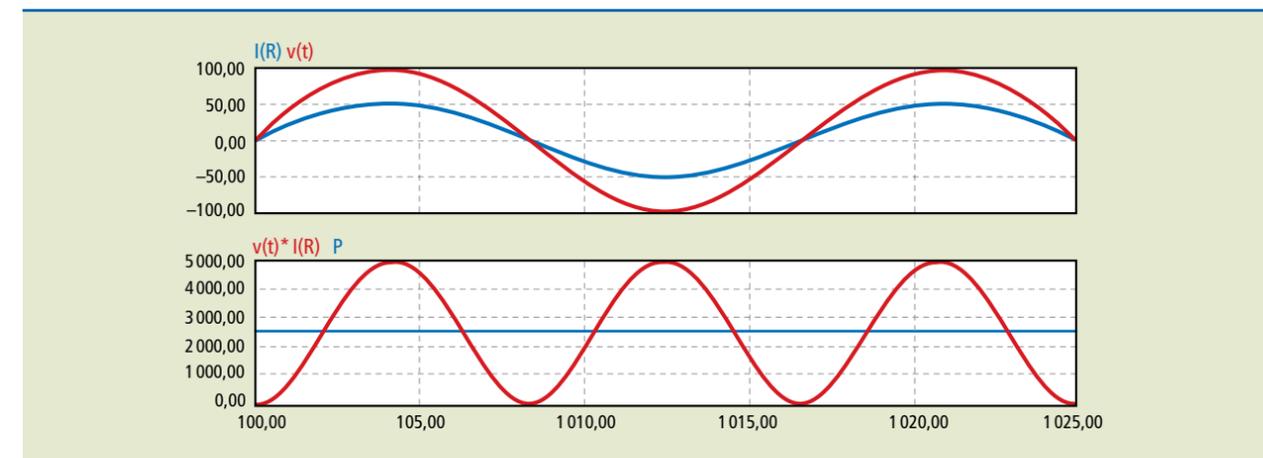
Nota-se que a potência varia de 0 a 5 000 W ao longo do tempo, mas é sempre positiva. Segundo a convenção discutida anteriormente, a potência sempre vai da fonte para a carga. Levando em conta a simetria do gráfico da potência, verifica-se que o valor médio da potência é 2 500 W, que é justamente o produto dos valores eficazes da tensão e da corrente:

$$P = V_{ef} I_{ef} = (100 / \sqrt{2}) \cdot (50 / \sqrt{2}) = 2\,500 \text{ W}$$

em que P é chamada potência média ou potência ativa e quantifica o trabalho médio realizado por ciclo. Sua unidade de medida é o watt (W). Esse é mais um bom motivo para usar valores eficazes no lugar dos valores de pico.

Figura 1.34

Gráfico superior: tensão e corrente instantâneas. Gráfico inferior: potência instantânea e potência média P .



Potência instantânea em um indutor

Seguindo o mesmo raciocínio, agora para o indutor, obtém-se o gráfico da figura 1.35. Nota-se que a potência instantânea é variável, mas seu valor médio é nulo ($P = 0$).

Percebe-se que, em um hemiciclo, a fonte entrega energia à carga, e no hemiciclo seguinte a carga devolve a mesma quantidade à fonte. Em média, o trabalho realizado é nulo. Existe corrente, existe fluxo de potência, mas em média não se realiza trabalho. Em instalações elétricas, permitir que a potência reativa circule implica a necessidade de condutores, transformadores, chaves, disjuntores de maior capacidade e maior custo. Esse tipo de potência é denominado **potência reativa (Q)** e sua unidade é o volt-ampère reativo (VAR). A potência reativa é calculada pelo pico do gráfico da potência instantânea, que nesse caso vale 2 500 VAR ($V_{ef} i_{ef}$).

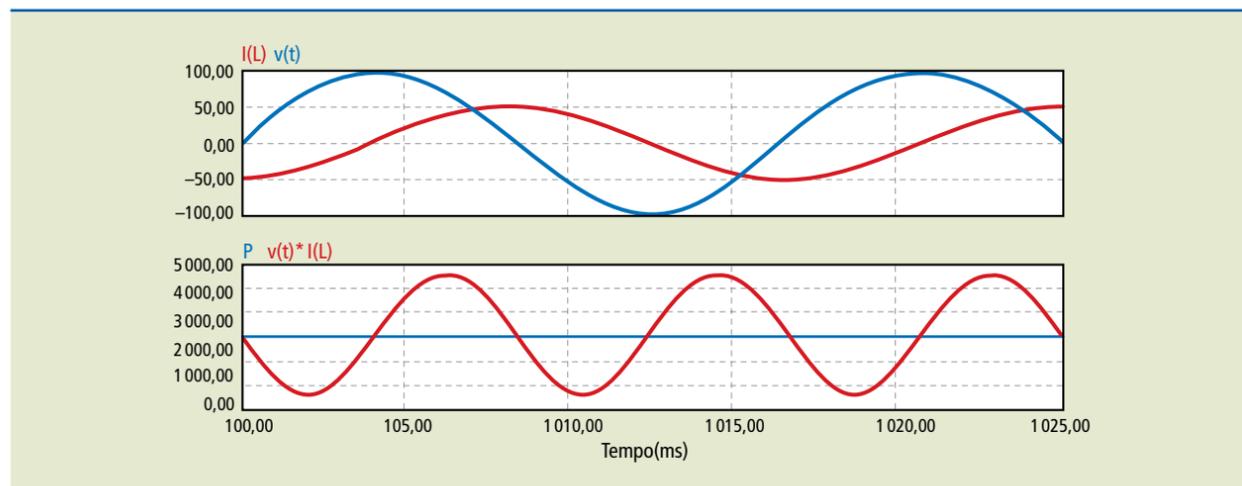
**Figura 1.35**

Gráfico superior: tensão e corrente instantâneas.
Gráfico inferior: potência instantânea e potência média P .

Potência instantânea em um capacitor

Para o capacitor, podemos fazer uma análise semelhante à do indutor, ou seja, a potência média é nula e apresenta um valor de potência reativa.

Potência ativa, reativa, aparente e fator de potência

Foi mostrado que as cargas resistivas (aquelas que apresentam a corrente em fase com a tensão) consomem apenas potência ativa, enquanto capacitores e indutores (corrente defasada em 90°) consomem apenas potência reativa. Na prática, os equipamentos encontrados no meio industrial são compostos pelos três componentes (R , L , C), em que a corrente se apresenta adiantada ou atrasada em um ângulo que varia entre 0° e 90° . Essas cargas consomem tanto potência ativa como reativa.

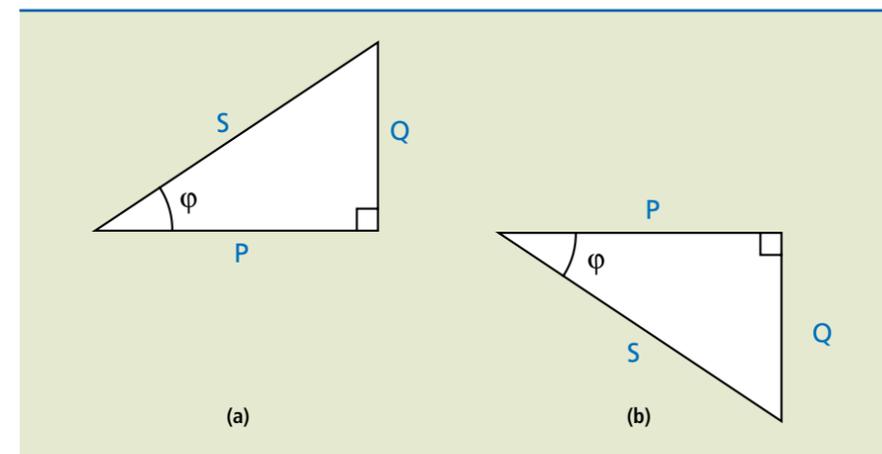
Em geral, podemos definir:

- potência ativa ou média (W): $P = V_{ef} I_{ef} \cos \varphi$ (1.23)
- potência reativa (VAR): $Q = V_{ef} I_{ef} \sin \varphi$ (1.24)
- em que φ é o ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente.
- potência aparente (VA): $S = V_{ef} I_{ef} = \sqrt{P^2 + Q^2}$ (1.25)

A representação gráfica de S , P e Q resulta no chamado triângulo das potências mostrado nos itens **a** e **b** da figura 1.36.

Define-se fator de potência como a relação entre potência ativa e potência aparente:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{V_{ef} I_{ef} \cos \varphi}{V_{ef} I_{ef}} = \cos \varphi \quad (1.26)$$

**Figura 1.36**

Representação gráfica das potências:
a) carga indutiva;
b) carga capacitiva.

Se $FP = 1$, ou seja, $\varphi = 0^\circ$, então a potência reativa é zero ($Q = 0$) e $S = P$. À medida que aumenta a contribuição da potência reativa Q , temos $S > P$, reduzindo o valor do fator de potência e , conseqüentemente, aumentando a corrente na rede. Por determinação legal, as concessionárias de energia obrigam os consumidores industriais e comerciais a manter o fator de potência ($\cos \varphi$) de suas instalações com valor superior a 0,92, e o proprietário incorre em multa caso isso não ocorra.

1.6 Instrumentos de medição das grandezas elétricas

A seguir serão apresentados instrumentos básicos para medida de grandezas elétricas que fazem parte do dia a dia do técnico mecânico.

1.6.1 Multímetro

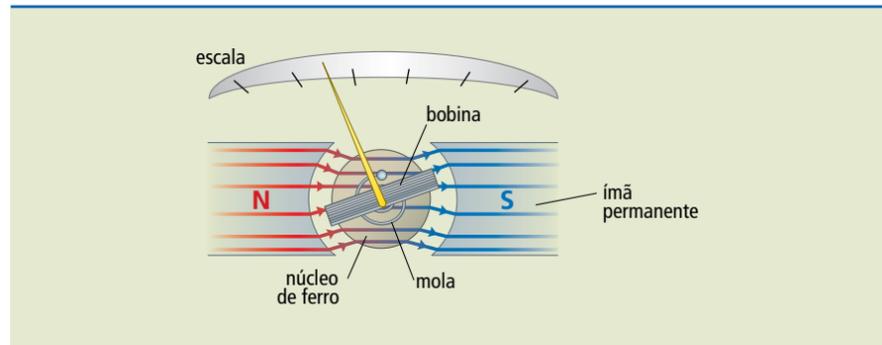
É um dos instrumentos de grande importância para utilização em laboratórios de qualquer especialidade. O multímetro, ou multiteste, permite a medição da tensão, da corrente e da resistência de um circuito elétrico. A figura 1.37 mostra os dois tipos de multímetros, o analógico (de ponteiro) e o digital.

**Figura 1.37**

Multímetros:
a) analógico;
b) digital.

O multímetro analógico utiliza um galvanômetro, que é um instrumento com um ponteiro montado sobre uma bobina móvel, imersa no campo magnético produzido por um ímã permanente (figura 1.38). Quando uma corrente elétrica percorre o enrolamento da bobina móvel, surge um campo magnético na bobina, que interage com o campo magnético do ímã. Dependendo do sentido da corrente elétrica, o ponteiro poderá se movimentar para a direita ou para a esquerda, na escala do instrumento.

Figura 1.38
Galvanômetro.



Com corrente nula, o torque aplicado à bobina é nulo, e o ponteiro fica em seu ponto de descanso, totalmente à esquerda da escala. Com corrente positiva, o ponteiro se movimenta no sentido horário. Se a movimentação do ponteiro for para a esquerda, entende-se que a polaridade das pontas em relação ao ponto de medição está invertida. Assim, podemos afirmar que o multímetro analógico é polarizado, e deve-se tomar o cuidado para sempre utilizar a ponta vermelha no positivo (+) e a ponta preta no negativo (-) dos pontos medidos.

O multímetro possui escalas distintas para cada grandeza a ser medida, como é mostrado na figura 1.39.

Figura 1.39
Escalas de um multímetro analógico.



O instrumento possui uma chave seletora, para selecionar a grandeza a ser medida pelo aparelho. Descrevem-se a seguir os procedimentos de medida de cada grandeza.

Medidas de tensão com multímetro analógico

Para efetuar as medidas de tensão, deve-se primeiramente saber se a tensão a ser lida é contínua (VDC) ou alternada (VAC). Com a chave seletora na posição VDC, mede-se o valor médio da tensão. Com a chave seletora no modo VAC, mede-se o valor eficaz das tensões alternadas senoidais. Para tensões alternadas não senoidais, o multímetro apresenta erro de medida. Alguns multímetros digitais conseguem medir o valor eficaz verdadeiro da tensão mostrando em sua caixa a inscrição “TRUE RMS” (valor médio quadrático verdadeiro ou valor eficaz verdadeiro).

A inserção do multímetro, utilizado como medidor de tensão, deve ser em paralelo com a carga a ser medida. Voltímetros têm resistência interna muito elevada e drenam pouca corrente do circuito que está sendo medido, o que afeta muito pouco o valor da tensão que se quer medir. A figura 1.40 mostra o símbolo gráfico de um voltímetro, e a figura 1.41, como ele é conectado aos pontos de medição. No caso, deseja-se medir a tensão entre os pontos a e b.

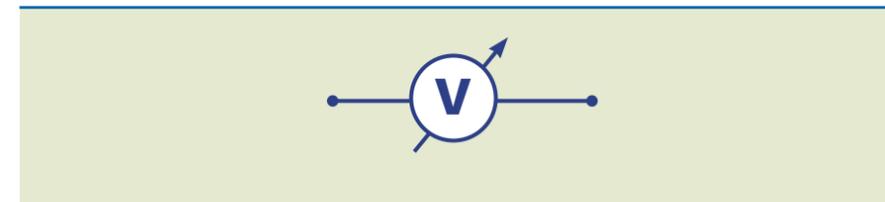


Figura 1.40
Símbolo utilizado para representar um voltímetro.

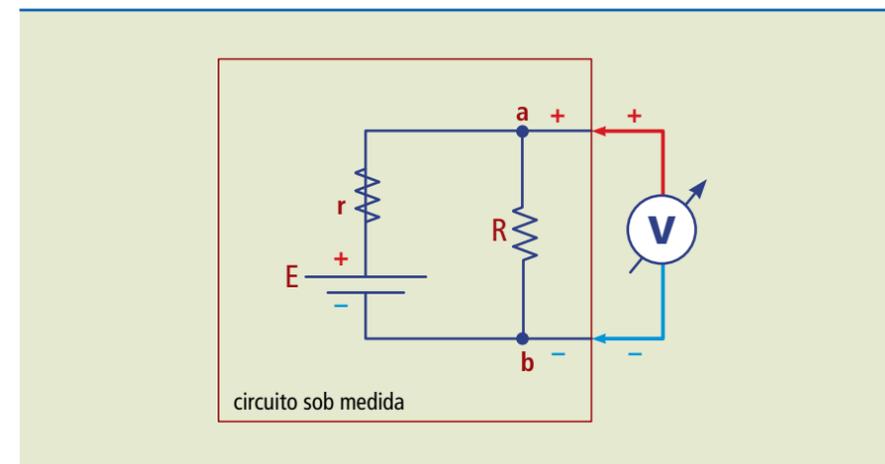


Figura 1.41
Medindo a tensão entre os pontos a e b.

O terminal positivo do instrumento deve estar no ponto a e o negativo, no ponto b, para que se tenha uma deflexão do ponteiro para a direita; ao contrário, teremos uma deflexão para a esquerda, o que é uma indicação de troca de polaridade. Uma sugestão prática importante é sempre colocar, ou posicionar, inicialmente a chave seletora na maior escala possível e ir reduzindo a escala até obter uma leitura mais precisa da grandeza. Evita-se, assim, queimar o instrumento quando temos dúvida quanto à polaridade e à magnitude da tensão a ser medida. A figura 1.42 indica as diversas escalas da chave seletora.

Figura 1.42

Chave seletora mostrando os valores de fim de escala para o modo de medida de tensão DC.



Analogamente, podemos medir valores eficazes de tensões CA, passando a chave seletora para a posição VAC (tensão em corrente alternada), escolhendo a escala adequada, conforme mostra a figura 1.43.

Figura 1.43

Escala para medida de tensões alternadas.



Medidas de corrente com multímetro analógico

Com a chave seletora na posição DCmA (figura 1.44), o multímetro é utilizado para medições de corrente elétrica CC (valor médio) que percorre o circuito.

Esse tipo de medição é feito em circuitos alimentados com tensão em corrente contínua (DC). Para fazer a leitura da corrente elétrica que percorre um circuito, deve-se introduzir o multímetro em série com o circuito a ser medido. Geralmente são realizadas as medições na linha positiva do circuito. Para isso, ligamos a ponta vermelha (+) no lado do gerador e a ponta preta (-) no lado do circuito a ser medido.

Figura 1.44

Escala para medida de correntes CC.

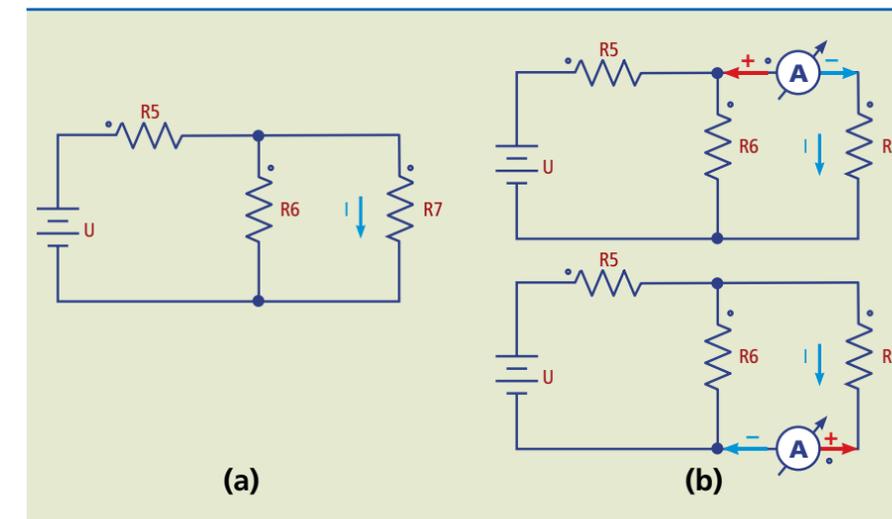


Também é possível realizar as medições no lado negativo da linha de alimentação. Para isso, liga-se a ponta preta (-) no lado do gerador e a ponta vermelha (+) do multímetro no lado do circuito a ser medido. Quando não se conhece a escala de valor da corrente a ser medida, deve-se inicialmente selecionar a chave de funções no maior valor e reduzir seu valor até obter uma leitura adequada. O símbolo usado para representar o amperímetro é mostrado na figura 1.45.

**Figura 1.45**

Símbolo gráfico do amperímetro.

A figura 1.46a mostra um circuito no qual se deseja medir a corrente I . A figura 1.46b mostra duas maneiras de conectar o amperímetro ao circuito para medir a corrente I . O amperímetro é instalado em série e, portanto, o circuito deve ser necessariamente interrompido para se conectar o instrumento.

**Figura 1.46**

a) Circuito a ser medido;
b) conexão do amperímetro.

Medidas de resistência com multímetro analógico

O ohmímetro é um instrumento usado para medidas de resistência elétrica. Na figura 1.47 são mostradas as escalas do ohmímetro. Deve-se multiplicar o valor lido pelo fator multiplicativo indicado na escala utilizada.

**Figura 1.47**

Escalas da chave seletora do multímetro utilizado como ohmímetro.

Para a realização de uma medida de resistência, o instrumento precisa estar calibrado e, para tanto, deve-se fazer o ajuste de zero do ponteiro. Para isso, é necessário juntar as duas pontas (vermelha e preta) e verificar se o ponteiro está indicando 0Ω . Caso contrário, deve-se fazer o ajuste por meio do botão localizado no painel do instrumento.

Esse ajuste precisa ser feito para cada mudança de escala na chave seletora. Uma vez conseguido o ajuste, as pontas de prova devem ser conectadas ao componente a ser medido. É importante que o componente esteja desconectado do circuito para:

- evitar que tensões presentes no circuito sejam aplicadas ao ohmímetro, podendo danificar ou dar falsos resultados de medida;
- evitar que, em vez da medida da resistência do componente, seja obtida a resistência da associação do componente com os demais existentes no circuito, o que certamente resultará em resistência menor que a real.

Erro comum que pode danificar o instrumento!

Muitas vezes o instrumento é deixado em cima da bancada na posição “corrente” ou “resistência” e, ao voltar a utilizá-lo, tenta-se medir tensões, sem alterar a chave seletora para “tensão”. Multímetros de menor custo sofrerão danos. Os de melhor qualidade e, portanto, mais caros são dotados de proteção que evita ou minimiza os danos.

É conveniente colocar a chave seletora na maior escala da posição “tensão” sempre que terminar de usar o instrumento.

Se o instrumento tiver conector especialmente dedicado para a medida de corrente, é conveniente retorná-lo ao borne de tensão.

Multímetro digital

Os multímetros digitais (figura 1.37b), em termos de operação, são exatamente iguais aos analógicos, porém fornecem a indicação em um visor de cristal líquido. O multímetro digital não apresenta erros de paralaxe (variação do valor lido em função do ângulo de leitura do operador), possíveis em instrumentos com ponteiro.

Outras vantagens do multímetro digital são:

- maior resistência a quedas por não ter partes móveis e delicadas;
- ausência de ajuste de zero;
- leitura direta da grandeza, sem a necessidade de aplicar fatores multiplicativos;
- maior impedância interna (da ordem de $10 M\Omega$) no modo voltímetro;

- alguns dispõem de funções adicionais, como medida de temperatura, teste de transistores, medida de capacitores, teste de diodos etc.

1.6.2 Amperímetro alicate

Esse instrumento, mostrado na figura 1.48, foi projetado em princípio para a medida de corrente, com a vantagem de que para inseri-lo no circuito não é preciso cortar os condutores, conforme mostrado na figura 1.49. Essa característica é muito importante em instalações industriais, por onde circulam correntes elevadas em cabos de grande seção transversal, nos quais a interrupção para a instalação do amperímetro em série é praticamente impossível.



EKIPA/SHUTTERSTOCK

Figura 1.48

Amperímetro alicate.

O amperímetro alicate faz a leitura com suas pinças envolvendo o condutor como em um abraço (figura 1.49). Com base na lei de indução de Faraday, a corrente alternada no condutor produz um campo magnético alternado no núcleo de ferro que compõe as pinças do alicate. Em uma segunda espira, enrolada no núcleo, é induzida uma tensão proporcional à corrente no cabo, que é medida por um voltímetro e indicada no *display*. Os instrumentos mais sofisticados e, portanto, mais caros também medem corrente contínua através do efeito Hall.



GREENEMPOWERMENT

Figura 1.49

Medida com o amperímetro alicate.

Apresentamos alguns cuidados específicos para a utilização de amperímetros alicate:

- o amperímetro alicate não deve ser aplicado em circuitos que possuam tensão superior a 750 VAC;
- não se deve medir corrente AC com as pontas de prova conectadas ao amperímetro alicate;
- as pinças do alicate devem envolver um único fio condutor. Nunca introduzir mais do que um fio fase simultaneamente no alicate para não haver erro de leitura;
- para fazer a leitura com exatidão, é necessário que a pinça esteja completamente fechada e que o fio fique no centro do espaço livre entre as pinças.

Os multímetros do tipo alicate usualmente dispõem da função memória (*data hold*). Para utilizar essa função quando estiver fazendo alguma medição, é preciso pressionar a chave “Data-Hold”. O valor exibido no visor é armazenado em uma memória, que pode ser visualizada mesmo depois de retirado o sinal aplicado. O valor armazenado sofre uma perda gradual com o tempo.

Essa função é útil ao realizar medidas em painéis, quando é impossível fazer a leitura do *display* por falta de espaço. Coloca-se, então, o instrumento, memoriza-se a medida e, ao término da operação, faz-se a leitura do valor medido.

1.6.3 Wattímetro

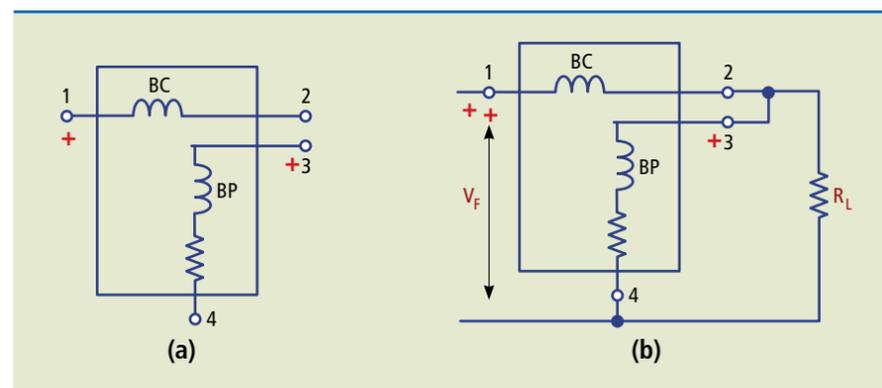
O wattímetro é o instrumento usado para medir a potência ativa ou média de um circuito elétrico. É composto por duas bobinas. Por uma delas, chamada bobina de corrente, passa a corrente da carga e a outra, chamada bobina de potencial, mede a tensão nos terminais da carga. Reunindo as leituras instantâneas da corrente e da tensão, o wattímetro “calcula” a potência ativa, definida pela equação 1.23:

$$P = V_{ef} I_{ef} \cos \varphi \quad (1.23)$$

Para que haja medição correta do sentido da potência medida (ver esquema da figura 1.50), é preciso que o terminal positivo da bobina de corrente esteja ligado na direção da fonte, e o terminal positivo da bobina de potencial esteja ligado ao outro terminal da bobina de corrente.

Figura 1.50

- a) Bobinas de corrente (BC) e de potencial (BP) de um wattímetro;
b) esquema de ligação de um wattímetro para medir a potência de uma carga R_L .



1.7 Sistema trifásico de energia

Sistema polifásico é aquele que contém dois ou mais circuitos elétricos, cada qual com sua fonte de tensão alternada. Essas tensões têm a mesma frequência e estão defasadas entre si de um ângulo definido. Cada circuito do sistema constitui uma fase. Dos sistemas polifásicos estudados, os cientistas chegaram à conclusão de que o sistema trifásico é o mais econômico.

O sistema trifásico, criado em 1890 por Nikola Tesla (1856-1943), apresenta as seguintes vantagens em relação ao sistema monofásico:

- entre motores e geradores do mesmo tamanho, os trifásicos têm maior potência que os monofásicos;
- as linhas de transmissão trifásicas empregam cabos de menor seção transversal e, portanto, menos material que as monofásicas para transportar a mesma potência elétrica;
- os motores trifásicos têm um conjugado uniforme, enquanto os monofásicos comuns têm conjugado pulsante;
- os motores trifásicos podem partir sem meio auxiliar, o que não acontece com os motores monofásicos comuns;
- os circuitos trifásicos proporcionam flexibilidade na escolha das tensões e podem ser utilizados para alimentar cargas monofásicas.

Um sistema trifásico ($3\emptyset$) é uma combinação de três sistemas monofásicos ($1\emptyset$). Em um sistema trifásico balanceado, a potência é fornecida por um gerador CA que produz três tensões iguais, mas separadas, cada uma defasada das demais em 120° (figura 1.51).

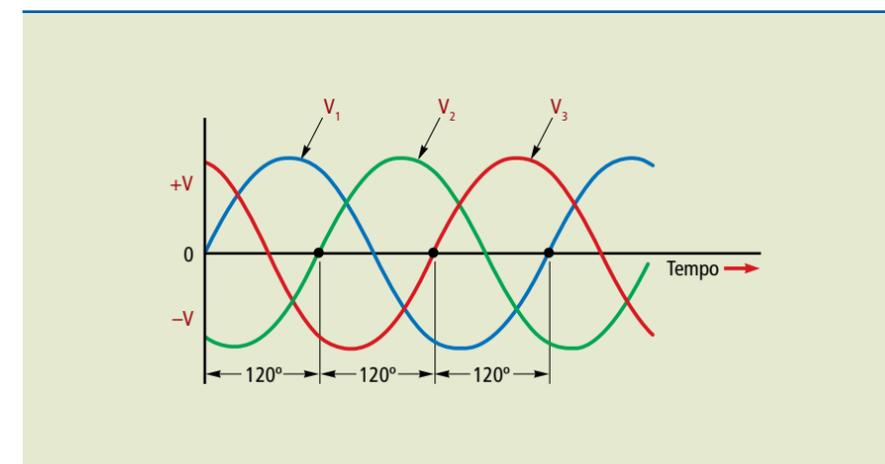


Figura 1.51

As três ondas de tensão senoidal.

1.7.1 O gerador trifásico

Na figura 1.52, temos o esquema da estrutura de um gerador trifásico com seus três conjuntos de enrolamentos (A-X, B-Y, C-Z). Na figura, podemos visualizar um gerador de corrente contínua que fornece sua corrente (I_{ext}) através de escovas e anéis (dispositivos para contato giratório) ao enrolamento do rotor (bobina

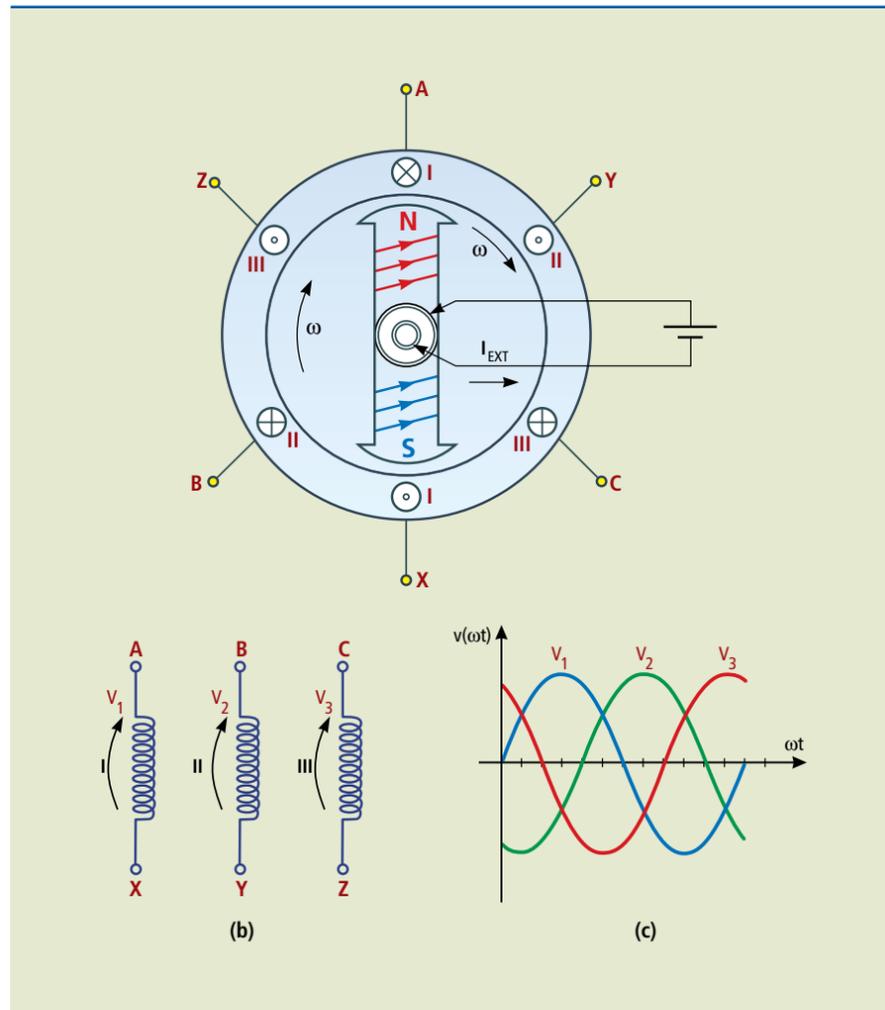
giratória). O rotor, por sua vez, é preso a um eixo que gira movimentado por força externa ao gerador — por exemplo, uma turbina ou queda-d'água.

A velocidade angular do rotor é controlada, de modo a obter a frequência de 60 Hz da rede elétrica. O enrolamento do rotor induz, então, o surgimento das tensões elétricas nos três enrolamentos fixos no estator do gerador. Por esses enrolamentos estarem separados por ângulos de 120°, as tensões são defasadas também em 120°, como mostrado no diagrama senoidal da figura 1.51.

Figura 1.52

Sistema trifásico:

- a) estrutura de um gerador trifásico (três enrolamentos: B-Y, A-X, C-Z);
- b) enrolamentos;
- c) formas de onda.



1.7.2 Conexões típicas de um gerador trifásico

Existem duas formas de ligar os terminais dos enrolamentos de um gerador trifásico. Essas configurações, denominadas estrela (ou **Y**) e triângulo (ou **Δ**), são mostradas na figura 1.53, na qual os enrolamentos do gerador estão representados por fontes de tensão independentes.

Na ligação estrela, os terminais X, Y e Z dos enrolamentos estão conectados a um ponto comum denominado neutro. Os terminais A, B, C e neutro ficam livres para a conexão das cargas.

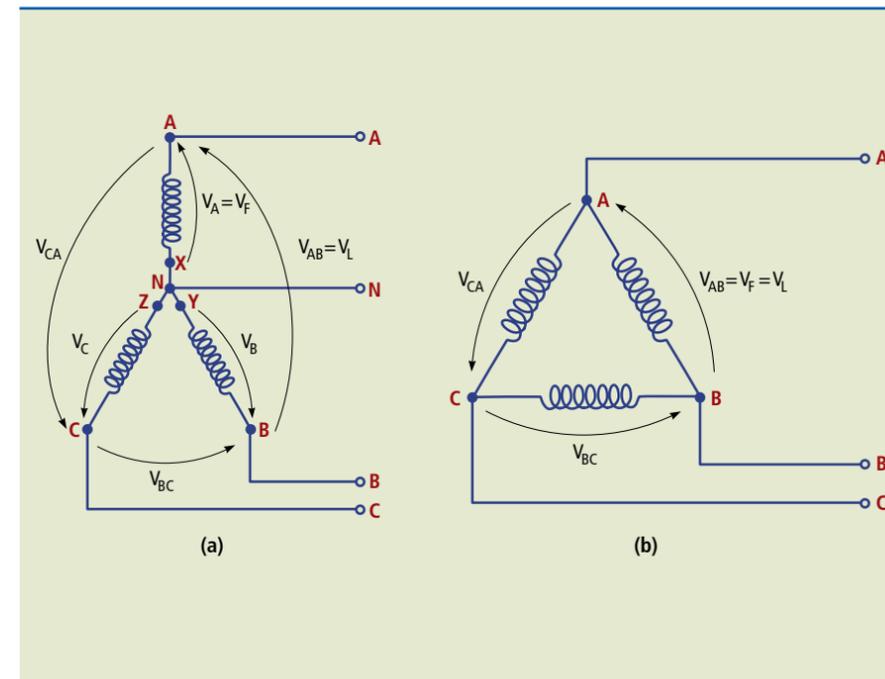


Figura 1.53

- a) Ligação estrela (ou **Y**);
- b) ligação triângulo (ou **Δ**).

1.7.3 Sistema trifásico equilibrado

Um sistema trifásico é dito equilibrado quando:

- as cargas são equilibradas, isto é, as cargas ligadas aos terminais do gerador têm a mesma impedância em todas as fases;
- os componentes do sistema (linhas, transformadores e geradores) têm características lineares e idênticas em cada fase;
- o sistema de tensões é simétrico, ou seja, as tensões têm módulos iguais e são defasadas em 120° uma da outra (figura 1.54).

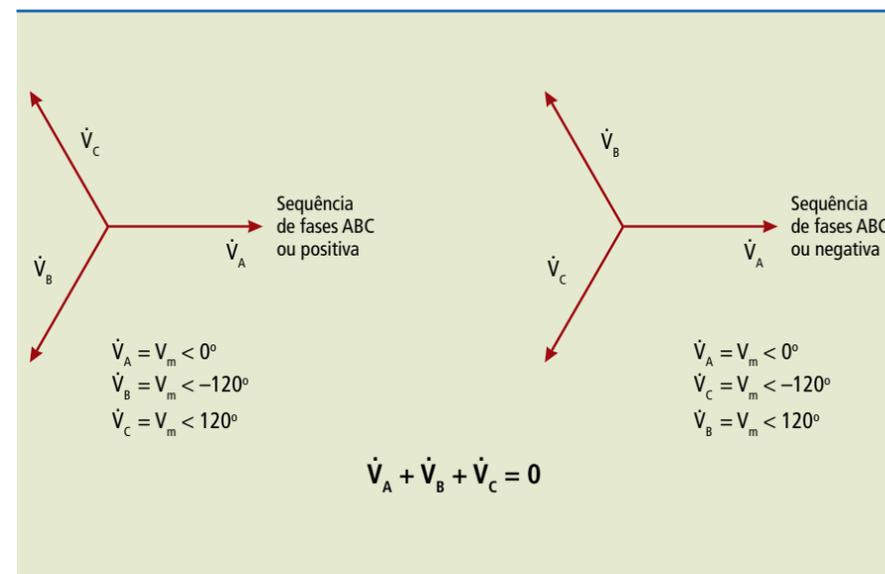
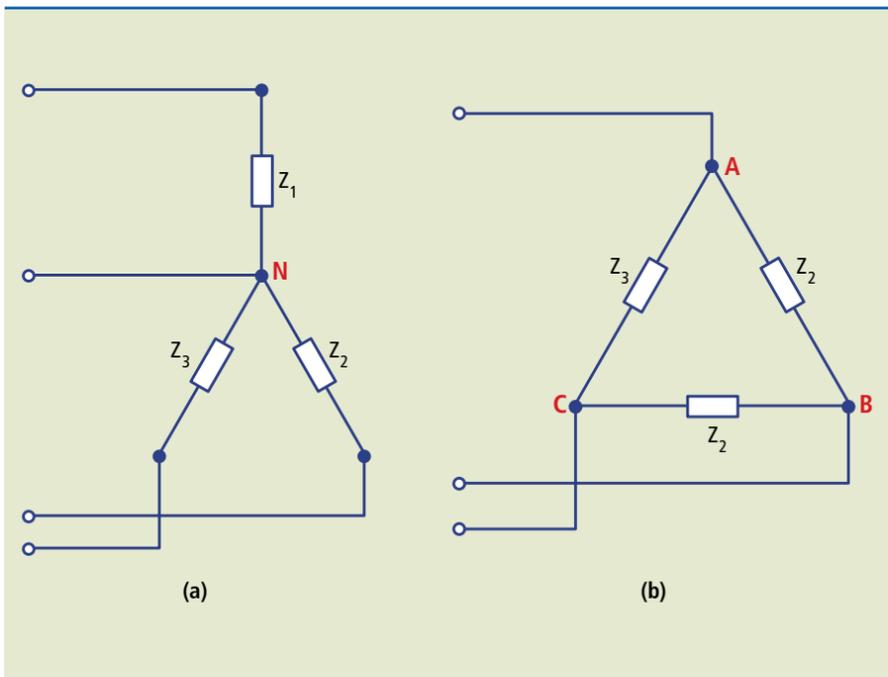


Figura 1.54

Sistema trifásico representado por fasores.

Tal como o gerador, uma carga trifásica equilibrada pode estar nas configurações estrela (ou Y) ou triângulo (ou Δ). O sistema trifásico de cargas a ser alimentado por esse gerador é representado na figura 1.55. Se ambos, o gerador e a carga, estiverem no formato estrela, temos as três fases e um neutro (N). Esse tipo de ligação também é chamado trifásico a quatro fios. A ligação da carga também pode ser feita no formato triângulo.

Figura 1.55
Cargas trifásicas a serem ligadas nos geradores:
a) estrela (ou Y);
b) triângulo (ou Δ).



Podemos utilizar os conceitos já vistos, de circuitos elétricos, para fazer a transformação do sistema estrela em triângulo e vice-versa, como mostram as figuras 1.56 e 1.57.

Figura 1.56
Transformação de triângulo para estrela.

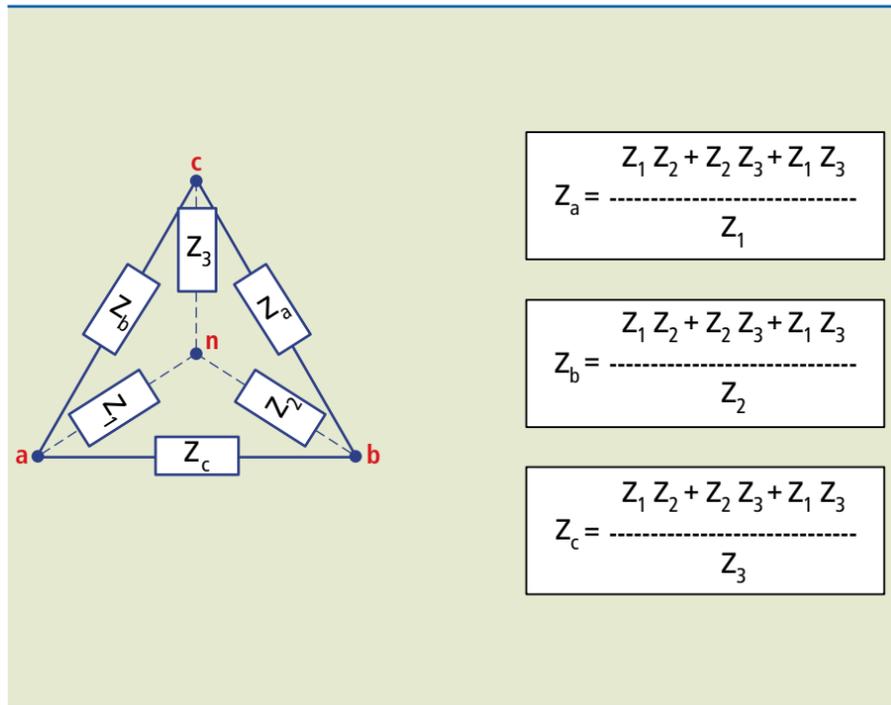
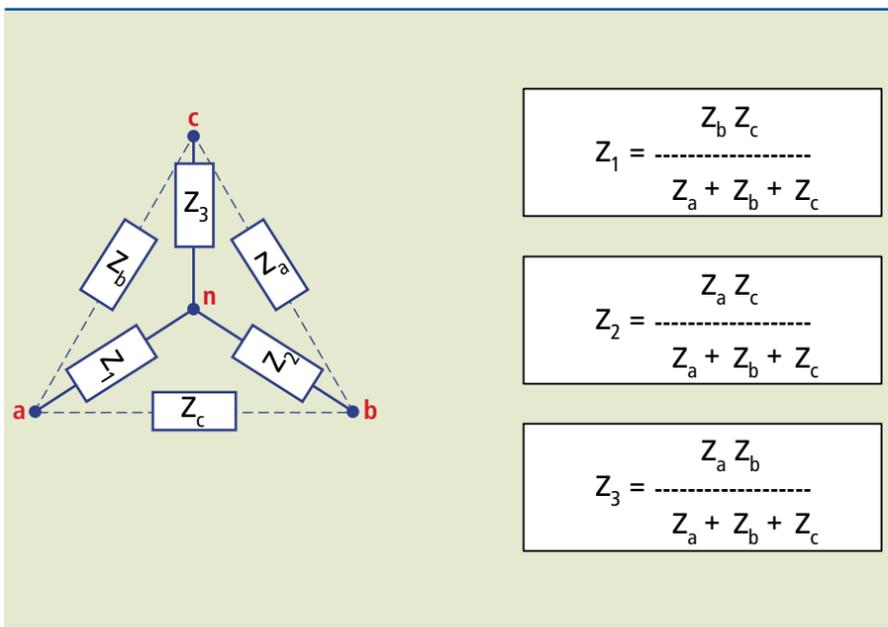
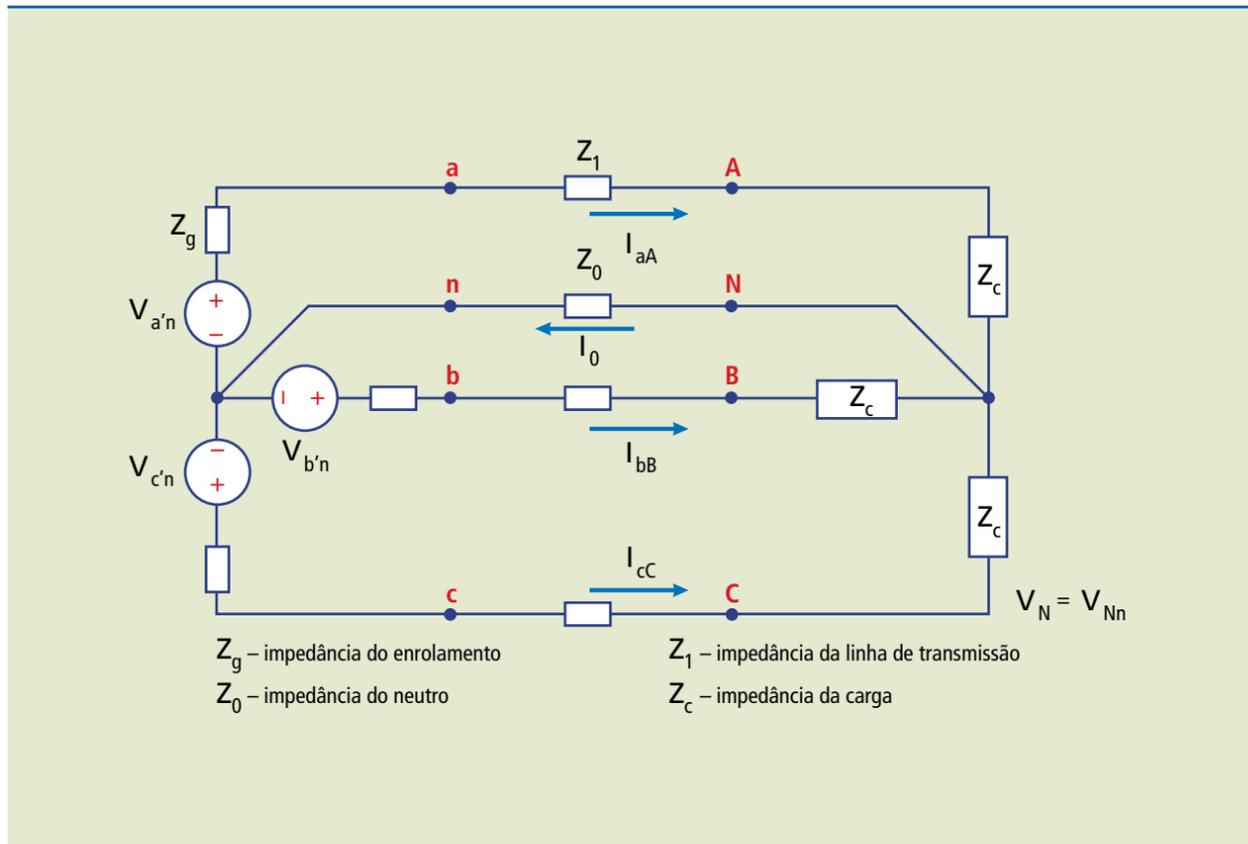


Figura 1.57
Transformação de estrela para triângulo.

Como o sistema trifásico é composto por três circuitos monofásicos, a representação pode ser feita como mostra a figura 1.58.

Figura 1.58
Gerador e carga ligados em estrela.



Podemos fazer o estudo considerando um sistema monofásico simples (figuras 1.59 e 1.60).

Figura 1.59
Circuito monofásico equivalente

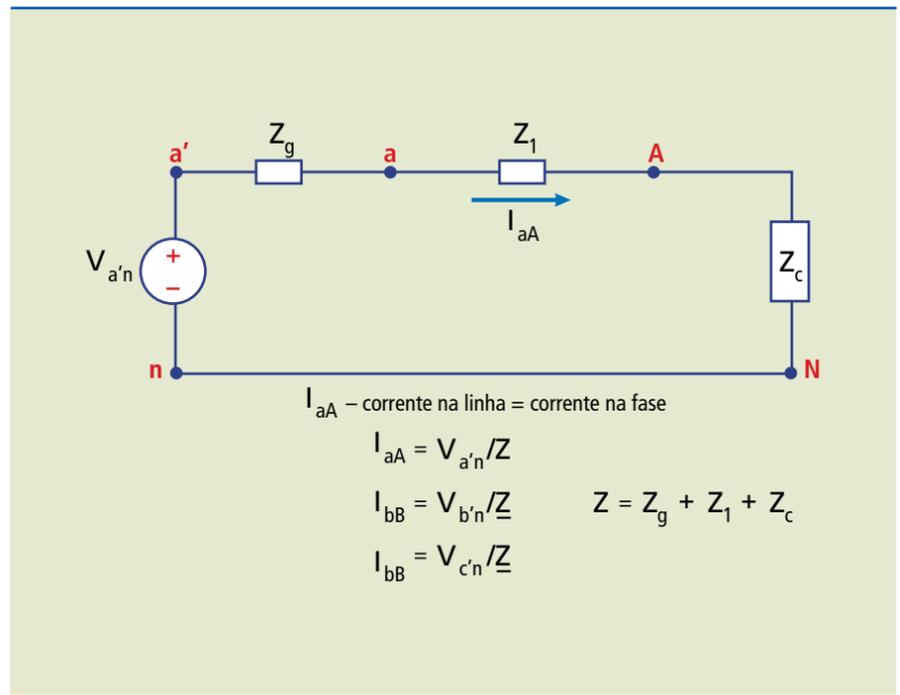
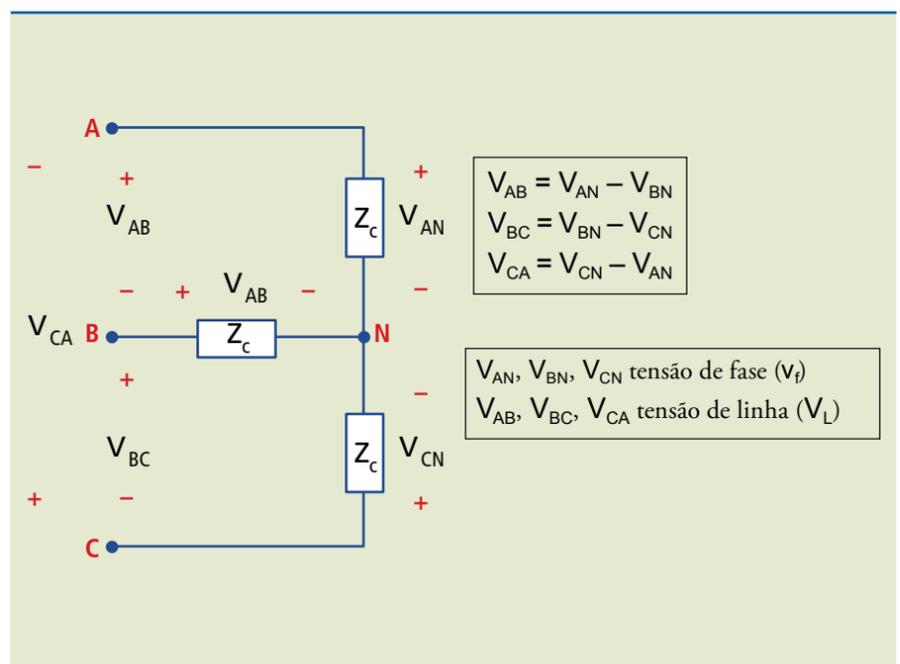


Figura 1.60



O diagrama fasorial de um sistema trifásico representa as relações no tempo das fases e não relações espaciais do circuito. Na figura 1.61, vemos o diagrama fasorial com as tensões de fase e de linha em relação ao neutro. A figura 1.62 mostra o esquema de um gerador em estrela e carga em triângulo.

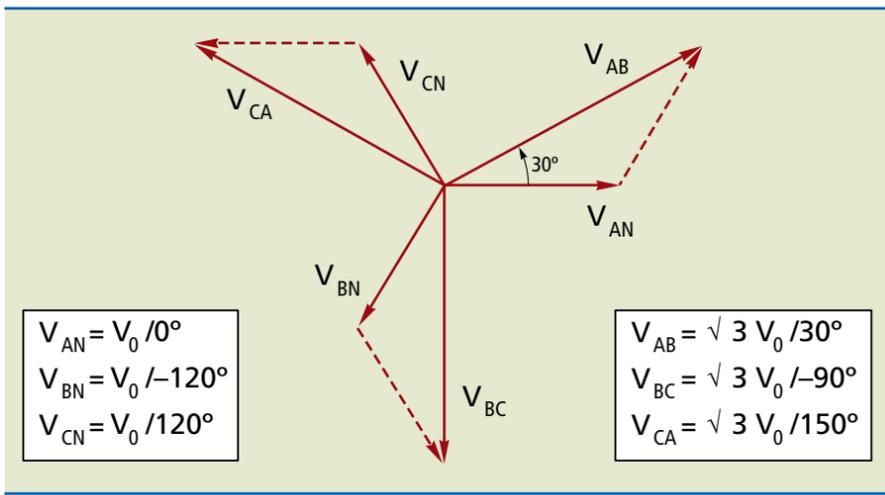


Figura 1.61
Tensões de fase e de linha de um sistema trifásico.

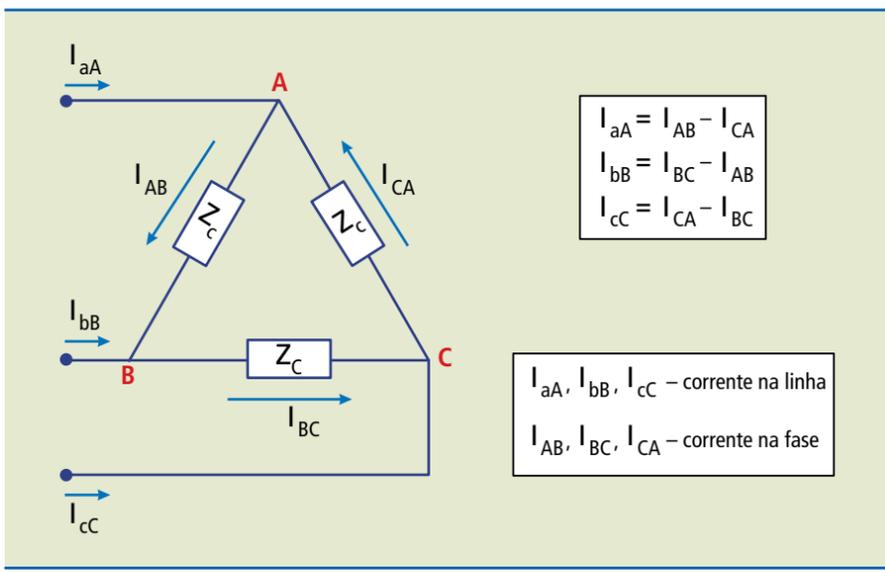


Figura 1.62
Gerador em estrela e carga em triângulo.

A figura 1.63 mostra o diagrama fasorial para a situação em que o gerador está configurado em estrela e a carga, em triângulo.

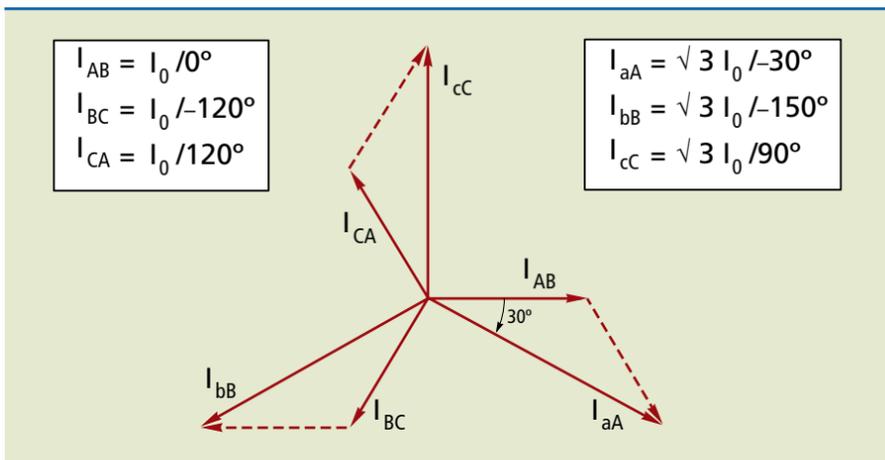


Figura 1.63

Abaixo, é apresentada a tabela 1.3, comparativa de tensões e correntes de um sistema trifásico equilibrado.

Tabela 1.3

Tabela-resumo de tensões e correntes de um sistema trifásico equilibrado.

Sequência de fases positiva		Tensão		Corrente	
		simples	composta	linha	carga
Y - Y	Fonte	V_{an}, \dots	$V_{ab} = \sqrt{3}/30^\circ V_{an}, \dots$	I_{aA}, \dots	—
	Carga	V_{AN}, \dots	$V_{AB} = \sqrt{3}/30^\circ V_{AN}, \dots$	—	I_{aA}, \dots
Y - Δ	Fonte	V_{an}, \dots	$V_{ab} = \sqrt{3}/30^\circ V_{an}, \dots$	$I_{aA} = \sqrt{3}/-30^\circ I_{AB}, \dots$	—
	Carga	—	V_{AB}, \dots	—	I_{AB}, \dots

Exemplo

Suponha um sistema trifásico equilibrado com tensão eficaz de 120 V e carga com impedâncias $Z = 30/35^\circ (\Omega)$. Calcule as correntes de linha.

Solução:

$$I_{AB} = \frac{V_{AB}}{Z} = \frac{120 \angle 0^\circ}{30 \angle 35^\circ} = 4 \angle -45^\circ \text{ A}$$

$$I_{BC} = \frac{V_{BC}}{Z} = \frac{120 \angle -120^\circ}{30 \angle 35^\circ} = 4 \angle -155^\circ \text{ A}$$

$$I_{CA} = \frac{V_{CA}}{Z} = \frac{120 \angle -240^\circ}{30 \angle 35^\circ} = 4 \angle -275^\circ \text{ A}$$

$$\begin{aligned} I_A &= I_{AB} - I_{CA} = 4 \angle -35^\circ - 4 \angle -275^\circ \\ &= 3,277 - j2,294 - (0,349 + j3,985) = 2,298 - j6,279 \\ &= 6,928 \angle -65^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_B &= I_{BC} - I_{AB} = 4 \angle -155^\circ - 4 \angle -35^\circ \\ &= -3,625 - j1,690 - (3,277 - j2,294) = -6,902 + j0,604 \\ &= 6,928 \angle +175^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I_C &= I_{CA} - I_{BC} = 4 \angle -275^\circ - 4 \angle -155^\circ \\ &= 0,349 + j3,985 - (-3,625 - j1,690) = 3,974 + j5,675 \\ &= 6,928 \angle +55^\circ \text{ A} \end{aligned}$$

1.7.4 Potência em sistemas trifásicos

Como estudado anteriormente, a potência ativa dissipada em uma carga monofásica é definida como:

$$P_{ATIVA} = V_F \cdot I_F \cdot \cos \varphi \quad (1.23)$$

em que:

V_F = módulo da tensão entre fase e neutro;

I_F = módulo da corrente por fase (na carga);

φ = ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente.

Sistema estrela (Y)

Em um sistema trifásico, com gerador e carga ligados em estrela (com neutro), podemos considerar a carga trifásica como três cargas monofásicas balanceadas (iguais em módulo e defasadas pelo mesmo ângulo duas a duas). Quando se trata de potência, há uma relação direta entre potência dissipada e energia consumida pela carga. Desse modo, como as potências ativas em cada fase são iguais, então a potência ativa total é a soma das potências ativas nas fases, ou seja, se a carga monofásica consome uma potência, a carga trifásica consumirá três vezes o valor da potência da carga monofásica:

$$P_{ATIVA} = 3 \cdot V_F \cdot I_F \cdot \cos \varphi \quad (1.27) \text{ para a carga trifásica em estrela.}$$

Lembrando ainda que, para a ligação em estrela:

$$I_F = I_L \text{ e } V_F = \frac{V_L}{\sqrt{3}} \quad (1.28)$$

em que V_L = módulo da tensão entre fases.

Podemos escrever a equação (1.28) da potência consumida de outra forma:

$$P_{ATIVA} = 3 \cdot \frac{V_L}{\sqrt{3}} \cdot I_L \cdot \cos \varphi \quad (1.29)$$

ou seja:

$$P_{ATIVA} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi \quad (1.30) \text{ para a carga trifásica em estrela.}$$

Sistema delta ou triângulo (Δ)

Como foi visto, para a carga trifásica, a potência ativa é calculada pela equação:

$$P_{ATIVA} = 3 \cdot V_F \cdot I_F \cdot \cos \varphi \quad (1.27)$$

Para os terminais do gerador e da carga, estão ligados em triângulo:

$$V_F = V_L \text{ e } I_F = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \quad (1.31)$$

Substituindo, temos:

$$P_{\text{ATIVA}} = 3 \cdot V_L \cdot \frac{I_L}{\sqrt{3}} \cdot \cos \varphi, \text{ ou seja:}$$

$$P_{\text{ATIVA}} = \sqrt{3} \cdot V_L \cdot I_L \cdot \cos \varphi \quad (1.30) \text{ para a carga trifásica em triângulo.}$$

Portanto, chega-se à conclusão de que a equação é a mesma para os dois casos (carga em estrela e em triângulo), porém é importante lembrar que os valores calculados são diferentes nos dois casos.

Caso as cargas estejam desbalanceadas, a potência total dissipada também é calculada pela soma das potências dissipadas em cada carga.

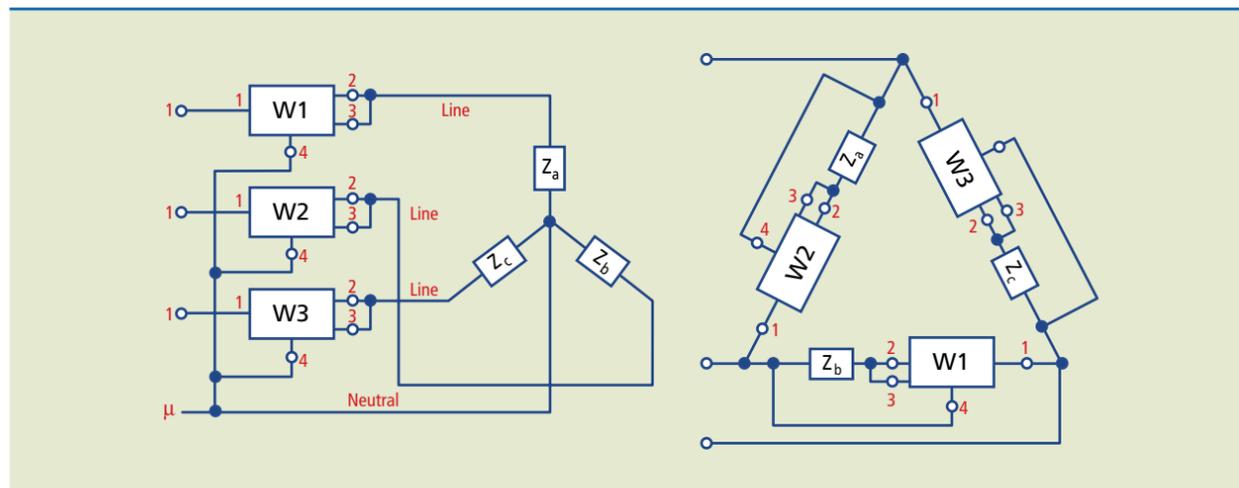
Medida de potência em circuitos trifásicos

Assim como nos sistemas monofásicos, no sistema trifásico o aparelho usado para a medida de potência é o wattímetro. O método específico para essa medida é descrito a seguir.

Método dos três wattímetros

A figura 1.64 demonstra um método para a medida instantânea de potência em uma carga trifásica. Tanto para a carga em estrela como para a carga em triângulo são usados três wattímetros e o mesmo conceito citado: a potência total consumida é a soma das potências consumidas em cada carga. Desse modo, não importa se as cargas estão balanceadas ou não.

Figura 1.64
Medida de potência
em carga trifásica.



Capítulo 2

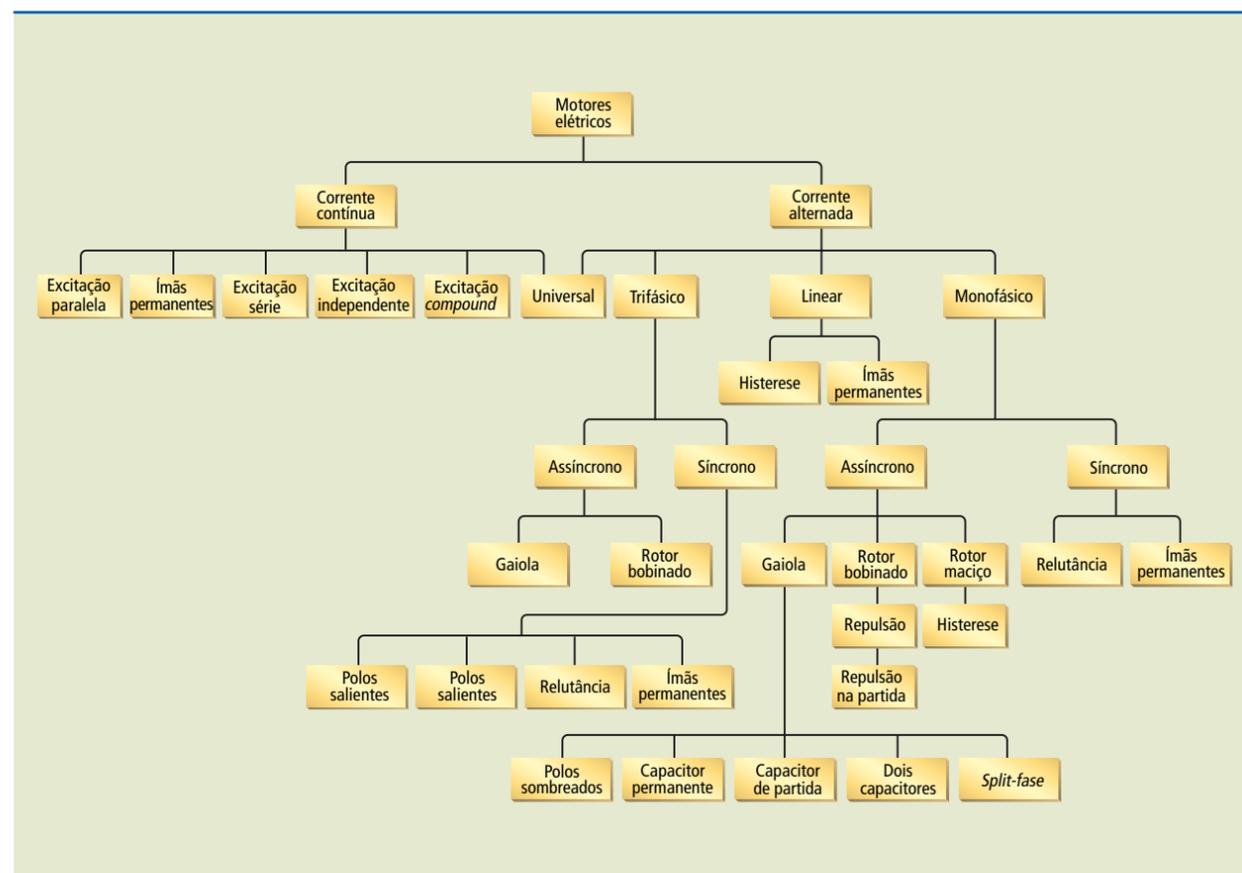
Motores elétricos

A conversão eletromagnética de energia relaciona as forças elétricas e magnéticas do átomo com a força mecânica aplicada à matéria e ao movimento. Como resultado dessa relação, podemos empregar máquinas elétricas para converter a energia mecânica em elétrica, e a energia elétrica em mecânica. Chama-se motor elétrico à máquina elétrica que transforma energia elétrica em energia mecânica, na forma de giro em seu eixo.

2.1 Classificação dos motores elétricos

Os motores elétricos são divididos em dois grandes grupos, tomando-se o valor da tensão como base: corrente contínua e alternada. A classificação dos diferentes tipos de motores elétricos pode ser visualizada na figura 2.1.

Figura 2.1
Classificação dos motores elétricos.



2.2 Características gerais dos motores elétricos

As principais características dos motores elétricos, em geral, são:

a) **Motores de corrente contínua (CC)**: são aqueles acionados por meio de uma fonte de corrente contínua. São muito utilizados nas indústrias, quando é necessário manter o controle fino da velocidade em um processo qualquer de fabricação. Como exemplo, pode ser citada a indústria de papel.

b) **Motores de corrente alternada (CA)**: são aqueles acionados por meio de uma fonte de corrente alternada. São utilizados na maioria das aplicações industriais, e seus principais tipos são:

b₁) **Motor síncrono**: trabalha em velocidade síncrona e é usado somente para grandes potências sem variação de velocidade (alto custo). Precisa de tensão alternada no estator e de corrente contínua no rotor.

b₂) **Motor de indução**: é o mais usado na indústria, pois é adaptável a uma grande variedade de cargas; apresenta custo reduzido, simplicidade de comando e bom rendimento na utilização da energia elétrica. Trabalha com velocidade pouco abaixo da síncrona (depende da carga mecânica no eixo). Atualmente, podemos controlar sua velocidade com o uso de inversores de frequência.

Nos motores síncronos, a velocidade síncrona (N_s) do rotor é fixa e é sincronizada com o campo girante do estator:

$$N_s = \frac{120 \cdot f}{p}$$

em que:
f = frequência da rede elétrica que alimenta o motor;
p = número de polos do motor.

2.3 Princípios de funcionamento dos motores elétricos de corrente alternada

Para entender os elementos básicos de um motor, é preciso lembrar que:

- ao aproximar dois ímãs, eles tendem a se alinhar atraídos pelos polos opostos;
- ao aplicar tensão a dois eletroímãs (enrolamentos ou bobinas), eles tendem a se alinhar segundo seus eixos longitudinais (como dois ímãs);
- com os eletroímãs desalinhados, surge uma força para alinhá-los;
- ao colocar tensão elétrica nos terminais de um enrolamento, o campo magnético induz o surgimento de campo magnético em outro enrolamento próximo, se estiver curto-circuitado (fechado).

2.4 Princípios de funcionamento do motor de indução trifásico

Na figura 2.2a, temos uma tensão monofásica senoidal aplicada ao enrolamento monofásico no estator de um motor. Essa tensão leva ao surgimento de uma corrente I senoidal e de um campo magnético H que atravessa os dois polos do estator. Na figura 2.2b, temos um enrolamento trifásico formado por três enrolamentos monofásicos separados por 120° . Alimentando esses enrolamentos com tensão trifásica senoidal (defasadas em 120°), surgem os campos H_1 , H_2 e H_3 , devidos a cada enrolamento.

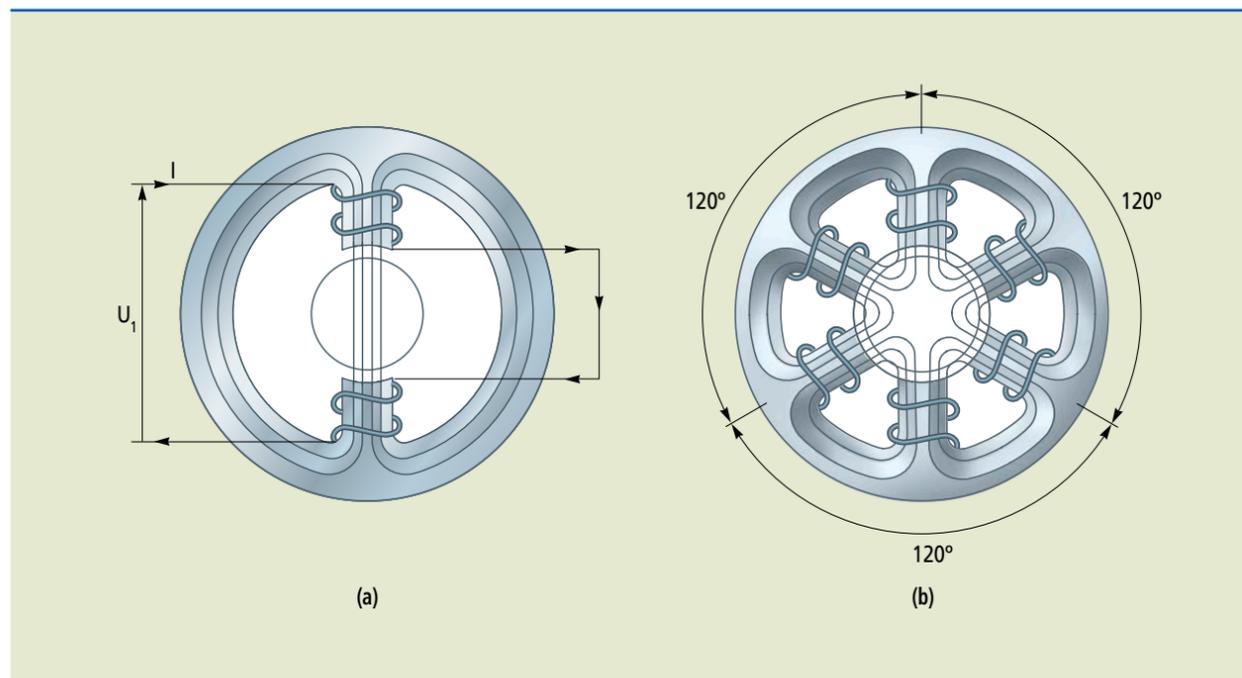


Figura 2.2
Enrolamentos de um motor de indução.

Esses campos magnéticos e suas resultantes são mostrados na figura 2.3.

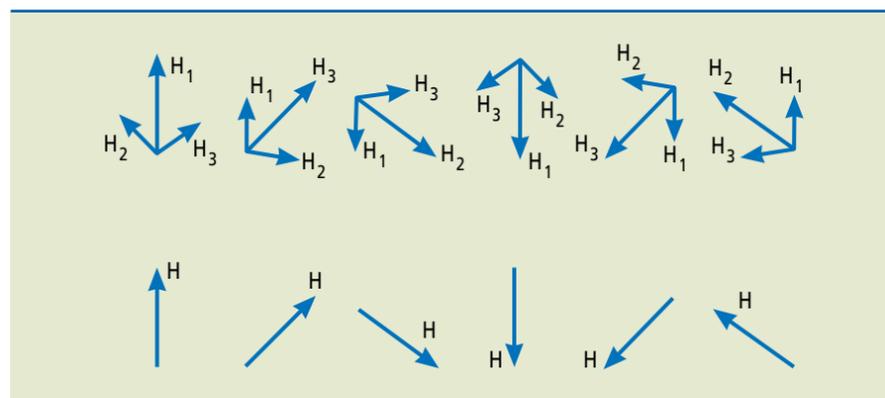


Figura 2.3
Campos magnéticos resultantes.

Assim, cria-se um campo girante como se houvesse um único par de polos girantes. No motor com rotor tipo gaiola de esquilo, onde a parte girante do motor é formada por um núcleo de chapas ferromagnéticas, temos barras condutoras curto-circuitadas que funcionam como enrolamento induzido. (Nos motores com rotor bobinado há também enrolamentos.)

Nos motores com rotor tipo gaiola de esquilo há um conjunto de condutores paralelos. Ao receber o campo girante do estator, surge no rotor um conjugado, que é um binário de forças. Portanto, o campo do rotor tende a acompanhar o campo girante do estator, que é a parte estática do motor formada por chapas ferromagnéticas, empilhadas e isoladas entre si. Uma das vantagens no motor com rotor tipo gaiola de esquilo é a ausência de escovas no rotor. O motor se torna mais simples e não há necessidade da troca de escovas na manutenção.

A carcaça do motor é em ferro fundido, aço ou alumínio e tem aletas para auxiliar na dissipação de calor do motor.

2.4.1 Partes constituintes de um motor de indução trifásico

Além do já descrito anteriormente, um motor trifásico deve conter bobinas, ou enrolamentos, alimentadas pela tensão da rede elétrica no estator. Essas bobinas ficam encaixadas em cavas do estator. Seu **entreferro** é bem estreito. A figura 2.4 é acompanhada da descrição de outras partes de um motor tipo gaiola de esquilo da WEG.

Distância que separa o rotor do estator.

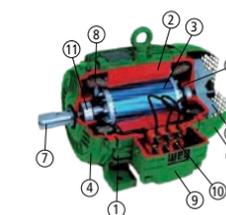
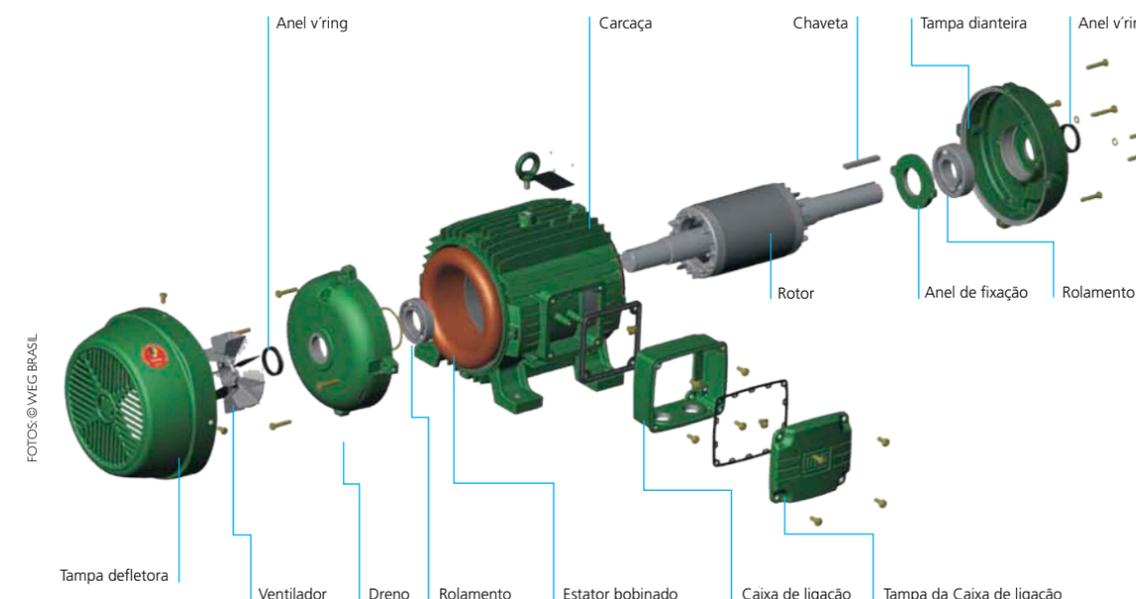


Figura 2.4
Partes construtivas de um motor tipo gaiola de esquilo.

Na figura:

Partes do estator:

- carcaça (1),
- núcleo de chapas (2) e
- enrolamento trifásico (8).

Partes do rotor:

- eixo (7) → é tratado termicamente, para evitar empenamento e fadiga, de forma a poder transmitir a potência mecânica do motor;
- núcleo de chapas (3) → tratadas termicamente, para reduzir perdas no ferro, como as do estator;
- barras e anéis de curto-circuito (12) → são de alumínio injetado sob pressão em uma única peça;
- outras partes: tampa (4), ventilador (5), tampa defletora (6), caixa de ligação (9), terminais (10) e rolamentos (11).

2.5 Princípios de funcionamento do motor monofásico

O uso de motores monofásicos com potência maior que 3 cv não é recomendado, para que não cause consumo excessivo de uma única fase da rede e, conseqüentemente, seu desbalanceamento. Isso não impede o uso de motores de potências maiores, basta apenas que as fases estejam balanceadas.

A função do capacitor, empregado em alguns motores monofásicos, a princípio, é armazenar cargas elétricas. O do tipo eletrolítico armazena maior quantidade de carga. Ao se aplicar uma tensão alternada senoidal a um capacitor, sabe-se que a corrente elétrica fica adiantada em 90° em relação à tensão. Assim, um capacitor é colocado em série com o enrolamento auxiliar em vários tipos de motor monofásico, causando o aparecimento de correntes defasadas. É como se cada um dos dois enrolamentos fosse ligado a uma fase diferente. Isso eleva o torque de partida do motor monofásico. No motor com capacitor de partida, após sua ligação e alcançada a velocidade em torno de 75% a 80% da velocidade síncrona, podemos abrir a chave centrífuga e desligar o circuito auxiliar de partida. A chave centrífuga é colocada em série com o capacitor e o enrolamento auxiliar.

Partes constituintes de um motor monofásico

Também nos motores monofásicos, os tipos gaiola de esquilo se destacam pela construção simples, fácil manutenção, maior robustez e confiabilidade. No entanto, por serem alimentados em circuito monofásico, não possuem campo girante, e sim campo pulsante. Para resolver o problema do torque de partida, são usados enrolamentos auxiliares para criar uma segunda fase “fictícia” no motor.

Desse modo, os componentes do motor monofásico são um pouco diferentes dos do motor trifásico: **enrolamento principal** (ligado à rede elétrica), **enrolamento auxiliar**, ligado à rede por um **capacitor de partida**, **chave centrífuga** e outras partes dependendo do tipo de motor monofásico. Na figura 2.5 são mostrados alguns modelos de motores monofásicos, que serão tratados separadamente.



FOTOS: © WEG BRASIL

Motor monofásico de fase dividida (*split-phase*)

Possui um enrolamento principal e um auxiliar defasados em 90°. O auxiliar é usado para o torque de partida e, quando o motor atinge certa rotação, é desligado por uma chave centrífuga (ou disjuntor centrífugo, ou relé de corrente), que é pressionada por molas, com o motor parado. Tem torque de partida praticamente igual ao nominal.

Em geral, é construído com potências de até $\frac{3}{4}$ cv. Para inverter seu sentido de rotação, inverte-se a polaridade dos terminais de ligação da rede em relação a um dos enrolamentos. A inversão do sentido deve ser feita sempre com o motor desligado. É usado em cargas que exigem pouco torque de partida, tais como: máquinas de escritório, ventiladores, exaustores, pequenos polidores, compressores herméticos, pequenas bombas centrífugas, esmeris, lavadoras de pratos.

Motor monofásico com capacitor permanente (*permanent split capacitor*)

Nesse tipo de motor, o enrolamento auxiliar e o capacitor estão sempre ligados. Assim o motor é menor e isento de manutenção, pois não tem contatos e partes móveis. Também permite reversão instantânea. É fabricado com potências que variam de 1/50 cv a 1,5 cv. Seu torque de partida é menor que o do motor de fase dividida, e seu uso é limitado a máquinas de escritório, ventiladores, exaustores, sopradores, bombas centrífugas, esmeris, pequenas serras, furadeiras, condicionadores de ar, pulverizadores e máquinas de lavar roupa. Esse tipo de motor tem tido demanda cada vez maior.

Motor monofásico com capacitor de partida

Esse tipo de motor possui capacitor em série com o enrolamento auxiliar e chave centrífuga. O capacitor é usado para proporcionar maiores torques de partida, por causa da maior defasagem entre as correntes dos enrolamentos. É fabricado com potências que variam de $\frac{1}{4}$ cv a 15 cv. É possível fazer a inversão do sentido de rotação como no motor de fase dividida, porém, nesse caso, a inversão pode ser feita com o motor em funcionamento. Pelo elevado torque de partida, pode ser utilizado em muitas aplicações, tais como: compressores, bombas para piscinas, equipamentos rurais, condicionadores de ar industriais e ferramentas em geral.

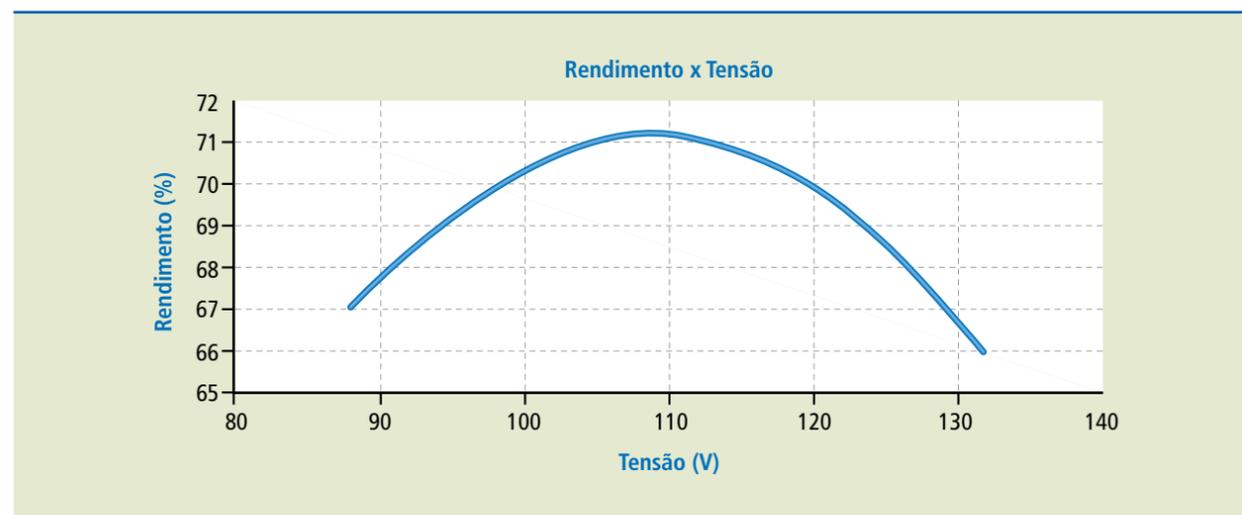
Figura 2.5

Motores monofásicos de capacitor permanente e tipo *split-phase*.

Motor monofásico com polos sombreados (*shaded pole*)

É o mais simples e econômico dos motores monofásicos. Dos vários tipos existentes, o mais comum é o de polos salientes, em que cada polo é dividido em dois, e um deles envolvido por uma espira em curto-circuito (um anel). Por ter valores baixos de torque de partida, de rendimento e de fator de potência, é fabricado com milésimos de cv até $\frac{1}{4}$ cv. Pela simplicidade e baixo custo, é o motor ideal para aplicações como movimentação de ar (ventiladores, exaustores, purificadores de ambiente, unidades de refrigeração, secadores de roupa e de cabelo), pequenas bombas e compressores, projetores de *slides* e aplicações domésticas.

Figura 2.6
Rendimento de motor monofásico.



Deve-se lembrar que o rendimento de um motor monofásico varia com a tensão da rede elétrica que o alimenta, como pode ser visto no gráfico da figura 2.6.

Motor monofásico com dois capacitores (*two value capacitor*)

Esse motor, na partida, funciona como o motor de capacitor de partida, e durante seu funcionamento trabalha como o motor de capacitor permanente. Por causa do alto custo, é fabricado com potências acima de 1 cv. Permite a inversão do sentido de rotação com o motor em funcionamento, invertendo-se a polaridade dos terminais ligados à rede em relação a um dos enrolamentos. No entanto, se forem necessárias inversões frequentes, é preferível o uso do motor de capacitor permanente.

Os esquemas de ligação dos vários tipos de motores monofásicos, mostrados na figura 2.7, estão assim distribuídos:

- motor com polos sombreados;
- motor de fase dividida;
- motor com capacitor de partida;
- motor com capacitor permanente;
- motor com dois capacitores.

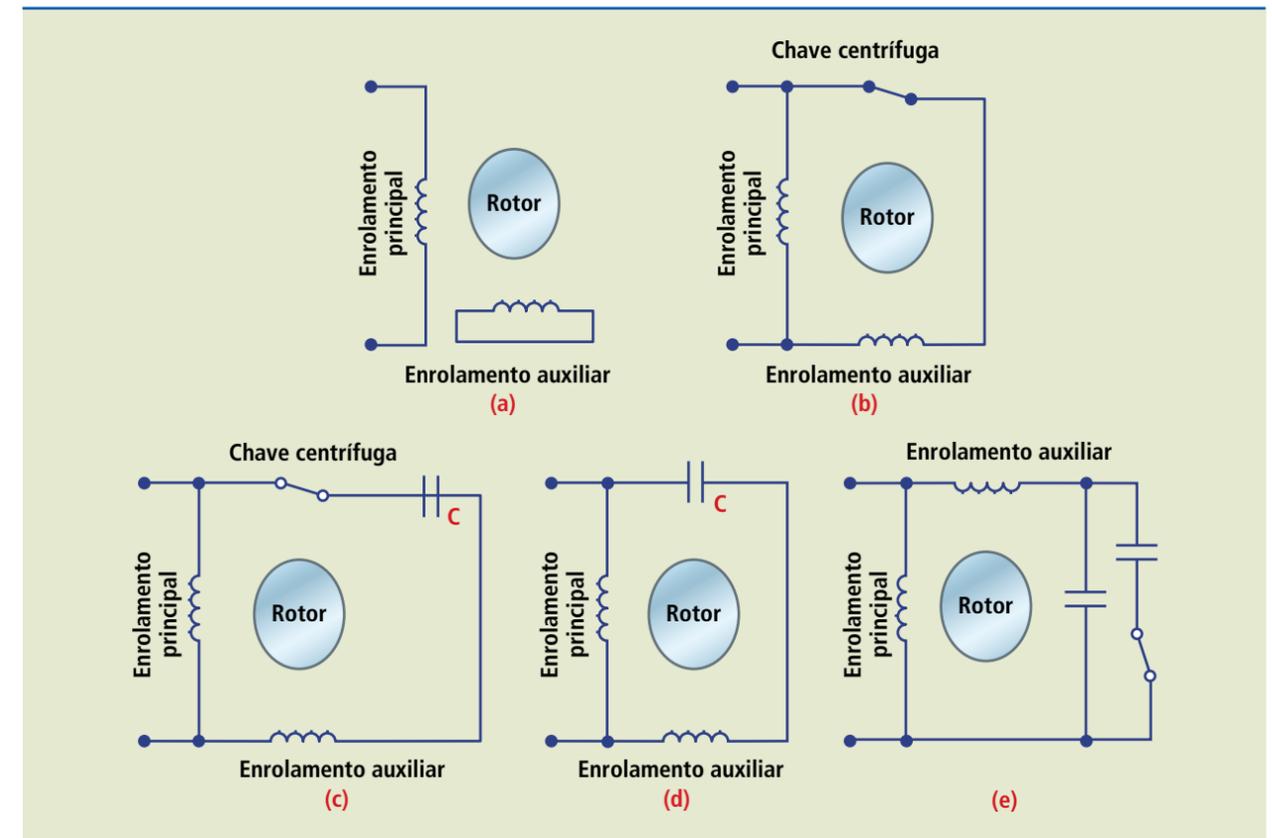


Figura 2.7
Esquemas para ligação de motores monofásicos.

2.5.1 Ligação dos enrolamentos dos motores monofásicos

De acordo com a quantidade de terminais disponíveis nos motores monofásicos, podem ser feitos diversos tipos de ligação, como os apresentados a seguir.

- **Motor com dois terminais:** deve ser ligado a apenas um valor de tensão, e não é possível inverter seu sentido de rotação.
- **Motor com quatro terminais:** seu enrolamento é dividido em duas partes (figura 2.8). Se as duas bobinas forem ligadas em série, o motor pode ser ligado em 220 V. Para ligar o motor em 110 V, ligam-se as bobinas em paralelo. Também não é possível inverter o sentido de rotação desse motor.

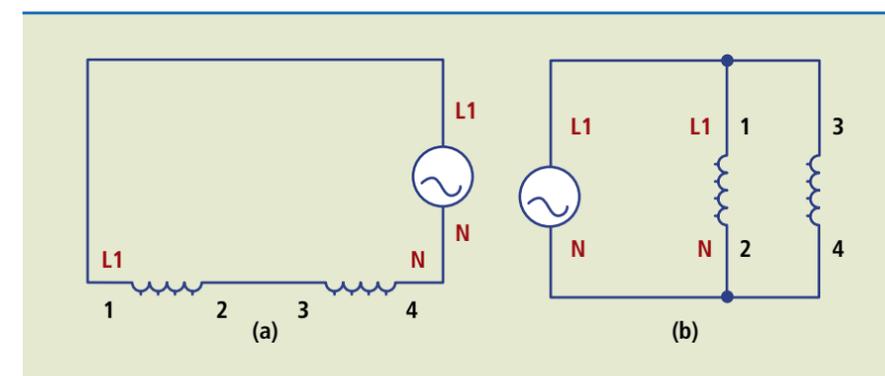
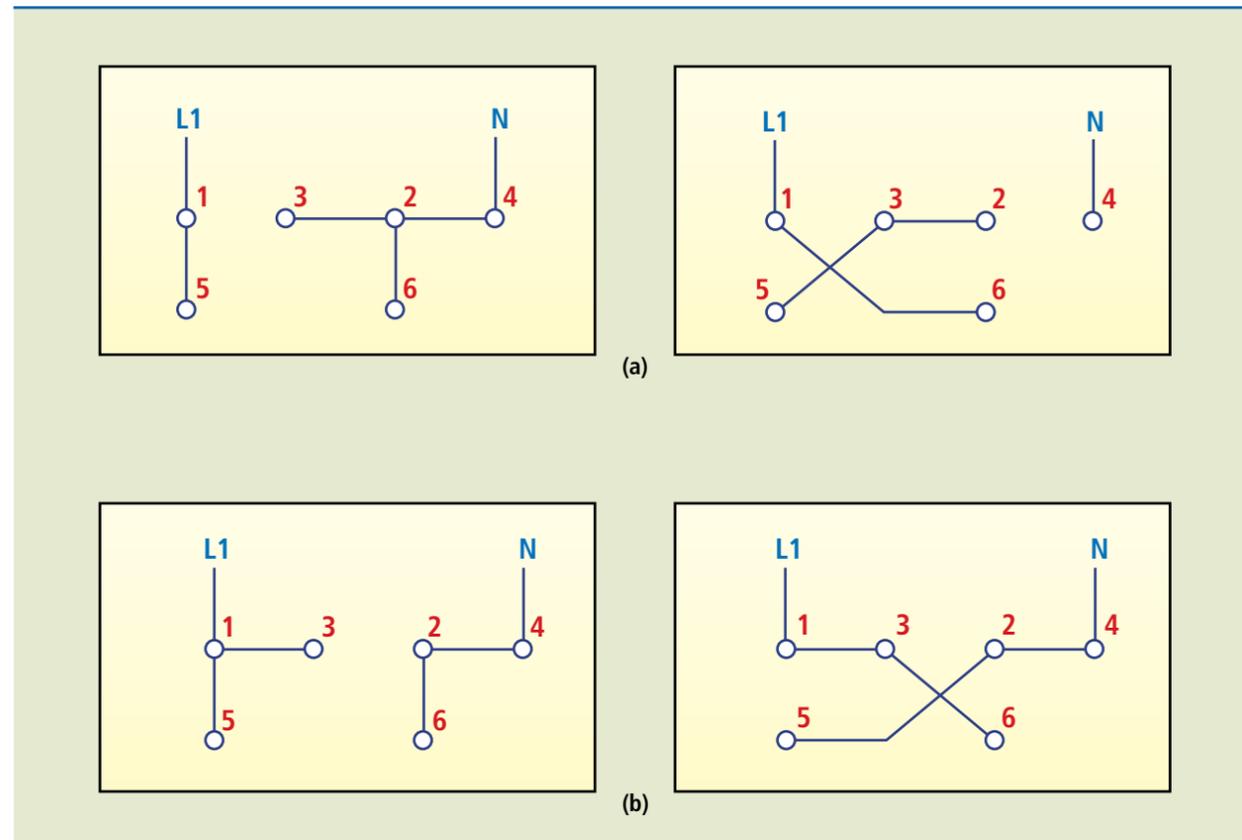


Figura 2.8
Ligação de motor com quatro terminais:
a) ligação em série;
b) ligação em paralelo.

Figura 2.9

a) Ligações no motor de seis terminais em 220 V;
b) ligações no motor de seis terminais em 110 V.

- **Motor com seis terminais:** pode ser ligado a duas tensões diferentes e ter seu sentido de rotação invertido. Para inverter o sentido de rotação, devemos inverter os terminais 5 e 6. Na figura 2.9a são mostradas as ligações do motor para 220 V, e na figura 2.9b, as ligações do motor para 110 V.



Vale ainda lembrar que os motores de fase auxiliar são os mais usados. Caso as bobinas desses motores não venham identificadas (por motivo de manutenção no motor, por exemplo), utilizamos o multímetro para encontrar a marcação correta. Inicialmente é feita a medição da resistência das três bobinas com o ohmímetro. Aquela com maior valor de resistência será a bobina auxiliar, pois tem o capacitor e a chave centrífuga em série com ela. Ligam-se, então, as bobinas em série à fase e ao neutro da rede. A sequência de menor corrente deve ser numerada nessa ordem: 1, 3, 2, 4.

2.6 Escolha e especificação do motor trifásico

Escolher um motor envolve muitos critérios. Alguns dos principais fatores de escolha são:

- características da rede de alimentação: tensão de alimentação do motor, frequência nominal (Hz), método empregado na partida;
- características do ambiente: altitude, temperatura ambiente, atmosfera ambiente;

- características construtivas: forma, potência (kW) e velocidade (rpm), fator de serviço, potência térmica, sentido de rotação;
- características da carga: momento de inércia e rotação da máquina acionada, curva do conjugado resistente, dados de transmissão, cargas axiais e radiais e seus sentidos (quando existentes), regime de funcionamento da carga (número de partidas/hora).

As características das cargas são fatores importantes para definição e escolha do tipo de motor mais adequado. É claro que para a mesma carga há a possibilidade de utilizar mais do que um tipo de motor.

Os motores de indução trifásicos têm uma vasta aplicação em diversas áreas e, portanto, é importante escolher o motor correto para cada aplicação. A tabela 2.1 e a figura 2.10 trazem alguns exemplos de aplicações dos motores de indução trifásicos.

Indústria	Aplicação
Água e saneamento	Estações de bombeamento
Papel e celulose	Refinadores, batedores, desfibradores, bombas centrífugas e a vácuo, compressores, picadores, moedores, descascadores
Madeira	Serras, bombas, compressores
Têxtil	Bombas, compressores, conjuntos motor-gerador
Siderurgia	Conjuntos motor-gerador, laminadores, ventiladores, bombas, compressores
Construção civil	Bombas, compressores para ar-condicionado
Máquinas operatrizes	Acionamento de prensas, compressores
Britagem	Moinhos de bola, moinhos de rolos, esmagadores (<i>crushers</i>), bombas, compressores
Química	Bombas, compressores
Borracha	Moinhos de borracha, bombas, misturadores de borracha (<i>bambury mixers</i>), extrusoras
Geração de energia elétrica	Sopradores, bombas de fornecimento de água e de resfriamento
Mineração	Grupos motor-gerador, escavadeiras, equipamento para guindastes, bombas, compressores, ventiladores

Tabela 2.1

Aplicação dos motores nas diversas áreas da indústria.

Figura 2.10

Exemplos de aplicação de motores.



2.6.1 Especificações de motores elétricos

Ao especificar a potência nominal de um motor para movimentar uma carga, é preciso ter conhecimento do conjugado solicitado por essa carga e da velocidade de rotação que essa carga deverá ter em condições normais.

Conjugado mecânico

O conjugado mecânico, também conhecido como torque, mede o esforço necessário que deve ter o motor para girar seu eixo. Existe uma estreita relação entre o conjugado mecânico e a potência desenvolvida pelo motor. Assim, se determinada quantidade de energia mecânica for utilizada para movimentar uma carga em torno de seu eixo, a potência desenvolvida depende do conjugado oferecido e da velocidade com que se movimenta a carga. O conjugado mecânico pode ser definido em diferentes fases do acionamento do motor, ou seja:

- Conjugado nominal (C_n) ou de plena carga: aquele que o motor desenvolve à potência nominal quando submetido à tensão e frequência nominais. É obtido pela equação 2.1:

$$C_n = \frac{P_{nm}}{2 \cdot \pi \cdot n_N} (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (2.1)$$

em que n_N é a rotação nominal em rotações por segundo (rps).

- Conjugado de partida (C_p): também conhecido como conjugado com rotor bloqueado ou conjugado de arranque, é aquele desenvolvido pelo motor sob

condições de tensão e frequência nominais durante a partida, e é normalmente expresso em $\text{kgf} \cdot \text{m}$ ou em porcentagem do conjugado nominal. O conjugado de partida deve ser de valor elevado, a fim de o motor ter condições de acionar a carga, desde a posição de inércia até a velocidade de regime em tempo reduzido. É obtido pela equação 2.2:

$$C_p (\%) = \frac{C_p}{C_n} \cdot 100 \quad (2.2)$$

- Conjugado base (C_b): é determinado de acordo com a potência nominal (C_{nm}) e velocidade síncrona (W_s) do motor. Normalmente, é obtido pelas equações 2.3 e 2.4:

$$C_b = \frac{716 \cdot P_{nm}}{W_s} (\text{kgfm}) \quad (2.3)$$

$$C_b = \frac{P_{nm}}{2 \cdot \pi \cdot n_s} (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (2.4)$$

em que n_s é a rotação síncrona (rps).

- Conjugado máximo (C_{ma}): é o maior conjugado produzido pelo motor quando submetido às condições de tensão e frequência nominais, sem, no entanto, ficar sujeito a variações bruscas de velocidade. O conjugado máximo deve ser o mais alto possível, de acordo com as condições a seguir:
 - a) O motor deve ser capaz de vencer eventuais picos de carga que podem acontecer em certas aplicações, como: britadores, misturadores, calandras e outras.
 - b) O motor não deve perder velocidade de modo brusco, quando ocorrerem quedas de tensão excessivamente rápidas.

O conjugado máximo é, em geral, expresso em porcentagem do conjugado nominal, como demonstrado na equação 2.5:

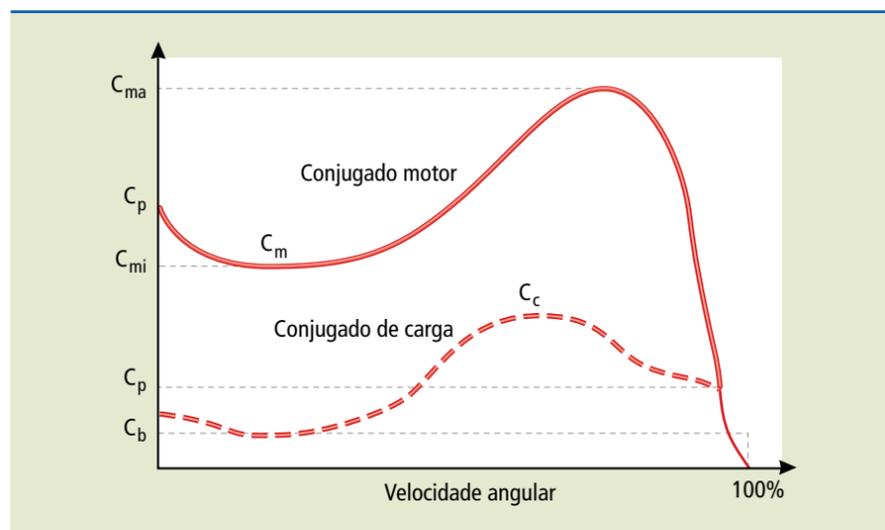
$$C_{ma} (\%) = \frac{C_{ma}}{C_n} \cdot 100 \quad (2.5)$$

- Conjugado mínimo (C_{mi}): é o menor conjugado na faixa de velocidade compreendida entre o conjugado nominal e o conjugado máximo, perante tensão e frequência nominais. Esse valor não deve ser muito baixo, isto é, a curva não deve apresentar uma depressão acentuada na aceleração a fim de que a partida não seja muito demorada, ocasionando um superaquecimento do motor, especialmente nos casos de a carga ter uma inércia elevada ou a partida se der com tensão reduzida.
- Conjugado de aceleração: é o conjugado desenvolvido na partida do motor, desde o estado de repouso até a velocidade de regime. Observando as curvas da figura 2.11, podemos concluir que, durante a fase de aceleração, a curva do conjugado

motor (C_m) é sempre superior à curva representativa do conjugado de carga (C_c). A diferença entre as curvas C_m e C_c fornece o conjugado de aceleração.

Figura 2.11

Curva conjugado versus velocidade.



Na tabela 2.2, temos a comparação de algumas características dos motores de indução de gaiola e de anéis, e na tabela 2.3 são apresentados os conjugados requeridos para determinados tipos de carga.

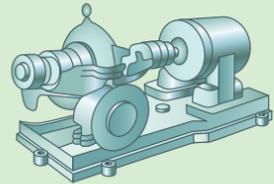
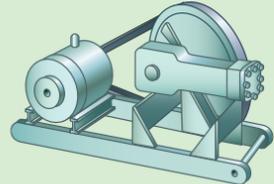
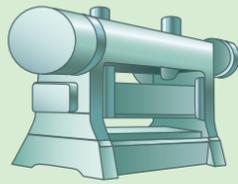
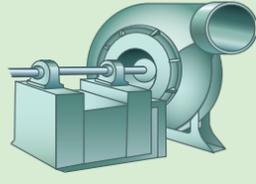
Tabela 2.2

Comparativo dos modelos de motores de indução e algumas características.

Tipo	Motor de indução de gaiola	Motor de indução de anéis
Projeto	Rotor não bobinado	Rotor bobinado
Corrente de partida	Alta	Baixa
Conjugado de partida	Baixo	Alto
Corrente de partida/corrente nominal	Alta	Baixa
Conjugado máximo	>160% do conjugado nominal	>160% do conjugado nominal
Rendimento	Alto	Alto
Equipamento de partida	Simple para partida direta	Relativamente simples
Equipamento de proteção	Simple	Simple
Espaço requerido	Pequeno	Reostato requer espaço grande
Manutenção	Pequena	Nos anéis
Custo	Baixo	Alto

Tabela 2.3

Tipos de carga e suas características relacionadas a um tipo de motor.

Tipos de carga	Conjugado requerido		Características da carga	Tipos de motor usado
	Partida	Máximo		
 Bombas centrífugas; ventiladores; furadeiras; compressores; retificadoras; trituradoras	Entre 1 e 1,5 vez o conjugado nominal	Valores máximos entre 200% e 250% do nominal	<ul style="list-style-type: none"> Condições de partidas fáceis tais como: engrenagens intermediárias, baixa inércia ou uso de acoplamentos especiais simplificam a partida. Máquinas centrífugas, tais como bombas em que o conjugado aumenta em função do quadrado da velocidade até um máximo, conseguindo na velocidade nominal. Na velocidade nominal pode estar sujeita a pequenas sobrecargas. 	<ul style="list-style-type: none"> Conjugado normal Corrente de partida normal Categoria N
 Bombas alternativas; compressores; carregadores; alimentadores; laminadores de barras	Entre 2 e 3 vezes o conjugado nominal	Não maior que 2 vezes o conjugado nominal	<ul style="list-style-type: none"> Conjugado de partida alto para vencer a elevada inércia, contra pressão, atrito de partida, rigidez nos processos de materiais ou condições mecânicas similares. Durante a aceleração, o conjunto exigido cai para o valor do conjugado nominal. É desaconselhável sujeitar o motor a sobrecargas durante a velocidade nominal. 	<ul style="list-style-type: none"> Conjugado de partida alto Corrente de partida normal Categoria N
 Prensas puncionadoras; guindastes; pontes rolantes; elevadores de talha; tesouras mecânicas; bombas de óleo para poços	3 vezes o conjugado nominal	Requer 2 a 3 vezes o conjugado nominal. São consideradas perdas durante os picos de carga	<ul style="list-style-type: none"> Cargas intermitentes, as quais requerem conjugado de partida, alto ou baixo. Requerem partidas frequentes, paradas e reversões. Máquinas acionadoras, tais como prensas puncionadoras, que podem usar volante para suportar os picos de potência. Pequena regulação é conveniente para amenizar os picos de potências e reduzir os esforços mecânicos no equipamento acionado. A alimentação precisa ser protegida dos picos de potências, resultantes das flutuações de carga. 	<ul style="list-style-type: none"> Conjugado de partida alto Corrente de partida normal Alto escorregamento Categoria D
 Ventiladores; máquinas-ferramentas; misturadores; transportadores	Em certos casos precisa-se de parte do conjugado nominal; em outros casos de 1 vez o conjugado nominal	1 ou 2 vezes o conjugado nominal em cada velocidade	<ul style="list-style-type: none"> Duas, três ou quatro velocidades fixas são suficientes. Não é necessário o ajuste de velocidade. Conjugado de partida pode ser pequeno (ventiladores) ou alto (transportadores). As características de funcionamento em várias velocidades podem variar entre potência constante, conjugado constante ou características de conjugado variável. Máquinas de cortar metal têm potência constante; cargas de atrito são típicas de conjugado constante; ventiladores são de conjugado variável. 	<ul style="list-style-type: none"> Conjugado normal ou alto (velocidades múltiplas)

Potência nominal

Para o cálculo da potência nominal do motor, é preciso conhecer seu conjugado e sua rotação, como estabelece a equação 2.6:

$$P_n = 2 \cdot \pi \cdot n_N \cdot C_n \quad (2.6)$$

em que:

P_n = potência nominal do motor [W];
 C_n = conjugado nominal do motor [Nm];
 n_N = rotação nominal do motor [rps].

Na equação da potência, o conjugado requerido pela carga é considerado igual ao conjugado nominal do motor. No entanto, se a velocidade tiver de ser reduzida, o conjugado necessário para a carga deve ser ajustado ao eixo do motor, como se vê na equação 2.7:

$$C_n = \frac{1}{\eta_{ac}} \cdot \frac{n_c}{n_N} \cdot C_{cn} \quad (2.7)$$

em que:

n_c = rotação da carga [rps];
 C_{cn} = conjugado de carga nominal [Nm];
 η_{ac} = rendimento do acoplamento ($\eta_{ac} = P_c / P_n$)
 n_N = rotação nominal do motor [rps];
 P_c = potência transmitida à carga [W];
 P_n = **potência nominal** do motor [W].

A tabela 2.4 faz um paralelo entre o tipo de acoplamento e a faixa de rendimento do acoplamento.

Tipo de acoplamento	Faixa de rendimento (%)
Direto	100
Embreagem eletromagnética	87-98
Polia com correia plana	95-98
Polia com correia em V	97-99
Engrenagem	96-99
Roda dentada (correia)	97-98
Cardã	25-100
Acoplamento hidráulico	100

Exemplo

Calcular a potência que um motor de 4 polos, na frequência de 60 Hz, deve ter para acionar uma carga com conjugado de 6 Nm, na rotação de 1 200 rpm, usando acoplamento por correia dentada.

Solução:

Dados: $C_{cn} = 6 \text{ Nm}$; $n_c = 1\,200 \text{ rpm}$; $n_N = 1\,800 \text{ rpm}$; $\eta_{ac} = 97 - 98\%$

$$C_n = \frac{1}{\eta_{ac}} \cdot \frac{n_c}{n_N} \cdot C_{cn} \quad e \quad P_n = 2 \cdot \pi \cdot n_N \cdot C_n$$

$$C_n = \frac{1}{0,97} \cdot \frac{1200}{1800} \cdot 6$$

$$C_n = 4,13 \text{ Nm}$$

$$P_n = 2 \cdot \pi \cdot \frac{1800}{60} \cdot 4,13$$

$$P_n = 778,49 \text{ W} = 1,06 \text{ cv}$$

Conjugado resistente da carga

A carga, como se sabe, é acionada ou movimentada pelo motor, que deve ter um conjugado suficiente para seu acionamento. O conjugado resistente é aquele exigido pela carga e depende do tipo de motor. A equação 2.8 é uma lei de formação geral para todos os conjugados:

$$C_c = C_o + k_c \cdot n^x \quad (2.8)$$

em que:

C_c = conjugado resistente da carga [Nm];
 C_o = conjugado da carga para rotação zero [Nm];
 k_c = constante que varia com a carga;
 x = parâmetro dependente da carga. Pode assumir os valores -1, 0, 1, 2.

Na equação 2.8, o conjugado da carga varia com o expoente x da rotação. Desse modo, é possível classificar as cargas em quatro grupos, de acordo com o expoente x : conjugado constante, conjugado linear, conjugado quadrático e conjugado hiperbólico.

Nos motores, a unidade de potência elétrica, no SI, é watt [W], mas é muito comum o emprego da unidade de potência mecânica cavalo-vapor [cv]. A conversão dessas unidades é: **1 cv = 0,736 W.**

Tabela 2.4

Tipos de acoplamentos e seus rendimentos

- **Carga de conjugado constante:** se, para uma carga, o expoente x é zero ($x = 0$), então o conjugado dessa carga não varia com a velocidade. Para essas máquinas, o conjugado é representado pela equação 2.9:

$$C_c = C_o + k_c = \text{constante} \quad (2.9)$$

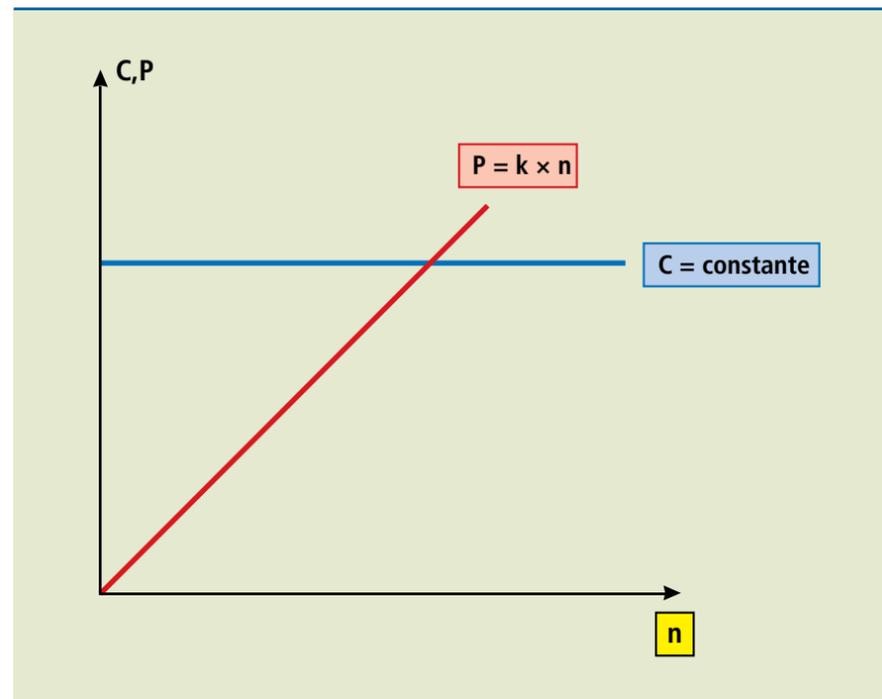
Para essas máquinas, a potência aumenta linearmente com a velocidade e segue a equação 2.10, o que pode ser visto no gráfico da figura 2.12.

$$P_c = (C_o + k_c) \cdot n \quad (2.10)$$

em que:

k_c = constante que depende da carga;
 P_c = potência da carga.

Figura 2.12
Carga de conjugado constante.



Compressores a pistão, talhas, guindastes, bombas a pistão, britadores e transportadores contínuos são alguns exemplos de cargas que possuem conjugado constante.

- **Carga de conjugado linear:** há máquinas nas quais o expoente x é igual a 1 ($x = 1$). Nesses casos, a equação do conjugado varia linearmente com a rotação n do motor. O conjugado cresce com a velocidade, como mostrado na equação 2.11:

$$C_c = C_o + (k_c \cdot n) = \text{linear} \quad (2.11)$$

A potência do motor, no entanto, varia com o quadrado da rotação (equação 2.12):

$$P_c = (C_o \cdot n) + (k_c \cdot n^2) \quad (2.12)$$

Sistemas de acoplamento hidráulico ou eletromagnéticos e geradores ligados em carga de alto fator de potência são exemplos de carga de conjugado linear.

- **Carga de conjugado quadrático (ou parabólico):** em alguns casos, temos cargas com $x = 2$. Nesses casos, o conjugado varia com o quadrado da rotação (equação 2.13):

$$C_c = C_o + (k_c \cdot n^2) \quad (2.13)$$

Enquanto o conjugado da carga é parabólico (quadrático), verifica-se que a potência do motor varia com o cubo da rotação (equação 2.14):

$$P_c = C_o + (k_c \cdot n^3) \quad (2.14)$$

Bombas centrífugas, ventiladores e misturadores centrífugos são exemplos de cargas com conjugado quadrático.

- **Carga de conjugado hiperbólico:** se o expoente da rotação é $x = -1$, o conjugado varia com o inverso da rotação (equação 2.15):

$$C_c = \frac{k_c}{n} \quad (2.15)$$

Nesse caso, a potência do motor permanece constante, ou seja, não varia com a rotação n (equação 2.16):

$$P_c = k_c = \text{constante} \quad (2.16)$$

Bobinadeiras, desbobinadeiras, máquinas de sonda e perfuração de petróleo são exemplos de cargas com conjugado hiperbólico.

Momento de inércia da carga

Em primeiro lugar, deve-se conhecer o conceito de carga. De modo geral, podemos definir carga de um motor como o conjunto de massa formado pelos componentes da máquina em movimento e firmemente preso ao eixo do motor. As cargas acionadas pelos motores elétricos podem ser classificadas de duas formas diferentes, como visto anteriormente:

- Carga com conjugado constante:** aquela que apresenta o mesmo valor de conjugado durante toda a faixa de variação da velocidade a que é submetido o motor. Nesse caso, a demanda de potência cresce linearmente com a variação da velocidade. Como exemplos, podem ser citados os laminadores, os elevadores de carga e a esteira transportadora.

Figura 2.13

Elevador de carga.



b) **Carga com potência constante:** aquela em que o conjugado inicial é elevado, reduzindo-se de forma exponencial durante toda a faixa de variação da velocidade. Como exemplos, podem ser citadas as bobinadeiras de fios ou de chapas, cujo diâmetro da bobina varia ao longo do processo, necessitando maior conjugado motor para maiores diâmetros e menor conjugado motor para menores diâmetros.

Agora, podemos conhecer o conceito de momento de inércia das massas.

O rotor dos motores elétricos apresenta massa que resiste à mudança de seu estado de movimento. Logo, o rotor reage quando, submetido a determinada rotação, é obrigado a acelerar. Essas considerações básicas permitem perceber que a inércia do rotor é um obstáculo à sua aceleração. Da mesma forma, podemos considerar o movimento das massas que estão ligadas ao eixo do motor, no caso a carga, que, como o rotor, resiste à mudança de movimentos.

O momento de inércia é uma característica fundamental das massas girantes. Pode ser definida como a resistência que os corpos oferecem à mudança de seu movimento de rotação em torno do eixo considerado, que, no caso do rotor, é sua própria massa, cuja unidade de medida é o $\text{kg} \cdot \text{m}^2$. A inércia a ser vencida pelo motor é dada pela equação 2.17:

$$J_T = J_m = J_c \text{ (kg} \cdot \text{m}^2\text{)} \quad (2.17)$$

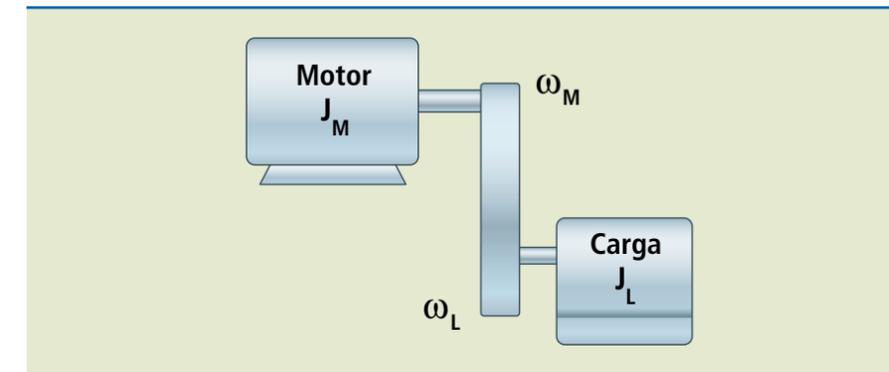
em que:

J_m = momento de inércia do rotor do motor;

J_c = momento de inércia da carga;

J_T = momento de inércia total.

Na figura 2.14 é mostrada uma máquina que tem sua velocidade de rotação diferente da velocidade do motor, e essa velocidade pode estar sendo acoplada por engrenagens (ou polias). Note que o momento de inércia deve ser em relação à rotação do motor.

**Figura 2.14**

Carga e motor ligados por transmissão ocasionando velocidades diferentes.

Para o sistema mostrado na figura 2.14, com um acoplamento sem perdas e considerando que o rendimento da transmissão do sistema é 100%, temos as equações 2.18 e 2.19:

$$T_M \cdot \omega = T_L \cdot \omega_L \quad (2.18)$$

$$\frac{T_M}{T_L} = \frac{\omega_L}{\omega_M} = a \quad (2.19)$$

em que:

a = relação de engrenagens;

T_M e T_L = conjugado do motor e da carga, respectivamente;

ω_M e ω_L = velocidade de rotação do motor e da carga, respectivamente.

Para calcular o torque de carga ao eixo do motor, usamos a relação de engrenagens expressa na equação 2.20:

$$T_{LM} = T_L \left(\frac{\omega_L}{\omega_M} \right) = a T_L \quad (2.20)$$

em que:

T_{LM} = conjugado da carga referido ao eixo do motor.

Pelo princípio da conservação da energia, a energia cinética de uma transmissão é invariável (equações 2.21 e 2.22):

$$J_M \frac{\omega_M^2}{2} = J_L \frac{\omega_L^2}{2} \quad (2.21) \quad \text{ou} \quad \frac{J_M}{J_L} = \frac{\omega_L^2}{\omega_M^2} = a^2 \quad (2.22)$$

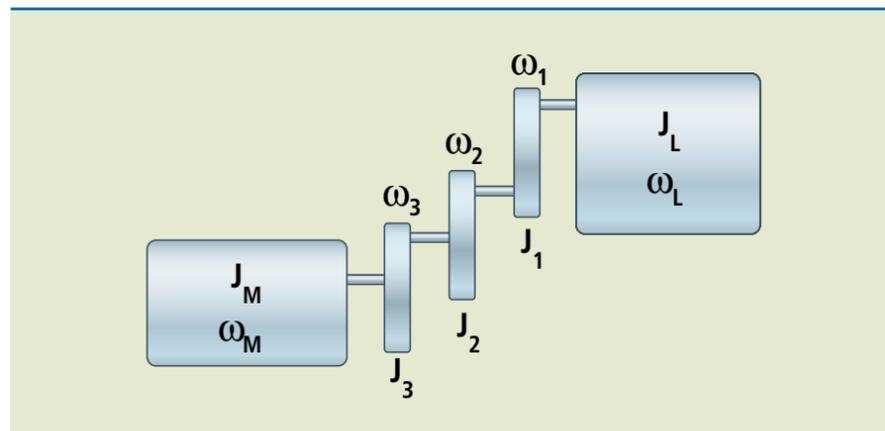
Para calcular o momento de inércia da carga ao eixo do motor, usamos a relação de engrenagens ao quadrado, expressa na equação 2.23:

$$J_M = a^2 \cdot J_L \frac{1}{2} \quad (2.23)$$

Pode haver mais de um nível de acoplamento, como mostrado na figura 2.15. Nesse caso, como existem três níveis de acoplamento, o cálculo do momento de inércia total em relação ao eixo do motor é expresso na equação 2.24:

$$J_{LM} = J_L \frac{\omega_L^2}{\omega_M^2} + J_1 \frac{\omega_1^2}{\omega_M^2} + J_2 \frac{\omega_2^2}{\omega_M^2} + J_3 \frac{\omega_3^2}{\omega_M^2} \quad (2.24)$$

Figura 2.15
Carga e motor em velocidades diferentes.

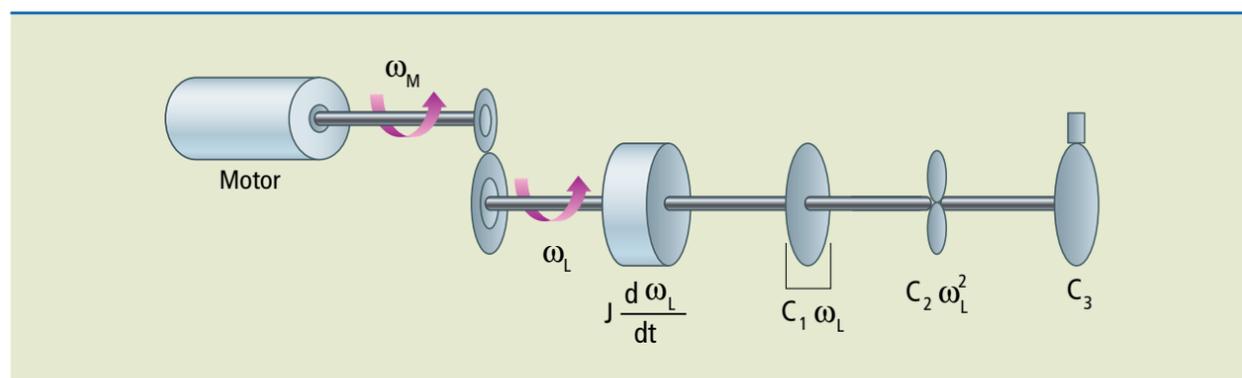


O momento de inércia, como visto na equação 2.25, é dado por:

$$J_T = J_M + J_{LM} \quad (2.25)$$

Figura 2.16
Acionamento com uso de caixa de redução.

Na figura 2.16 é mostrado um motor acionando um conjunto de cargas por meio de um redutor (caixa de engrenagens que tem por finalidade a redução de velocidade), de tal forma que a velocidade da carga seja diferente da velocidade do motor.



Nesse caso, podem ser feitas as seguintes observações:

- Quando o motor é acoplado à carga por uma caixa redutora, ocorre uma significativa redução da inércia referida ao eixo do motor.
- Os coeficientes de atrito viscoso e de ventilação são fortemente reduzidos.

A presença de uma redução da velocidade permite o acionamento da carga de forma mais suave que o acoplamento direto, com a carga acoplada diretamente ao eixo do motor. O uso da redução é necessário para compatibilizar as características de rotação e torque do motor com as características da carga. Em comparação com o acoplamento direto, a desvantagem consiste na perda de rendimento por causa das perdas na redução.

2.6.2 Tempo de rotor bloqueado e temperatura limite

No tempo em que o motor é percorrido por sua corrente de partida, o rotor, estando bloqueado, ocasiona um aumento de temperatura. Essa temperatura, chamada temperatura limite, define as classes de isolamento das máquinas elétricas. A temperatura máxima de cada classe é mostrada na tabela 2.5.

Classe	T _{máx} (°C)
A	105
E	120
B	130
F	155
H	180

Tabela 2.5
Temperatura máxima para cada classe.

Por norma, os motores usados para aplicação normal são instalados em temperaturas ambientes máximas de 40 °C. Acima disso, as condições de trabalho são consideradas especiais. As classes B, F e H são as mais comuns para motores de aplicação normal.

2.6.3 Tempo de aceleração (t_a)

É o tempo despendido pelo motor para tirar a carga da inércia, isto é, da velocidade zero até a velocidade normal. Esse tempo permite observar se o motor, operando sob condições de tensão e frequência normais, consegue acionar a carga obedecendo às condições de estabilidade térmica do material isolante.

O ideal é que o tempo de aceleração seja bem menor que o tempo de rotor bloqueado, obedecendo à relação da equação 2.26:

$$t_a < t_b \cdot 0,8 \quad (2.26)$$

em que:

t_{rb} = tempo máximo de rotor bloqueado.

As principais causas que contribuem para o sobreaquecimento dos motores são:

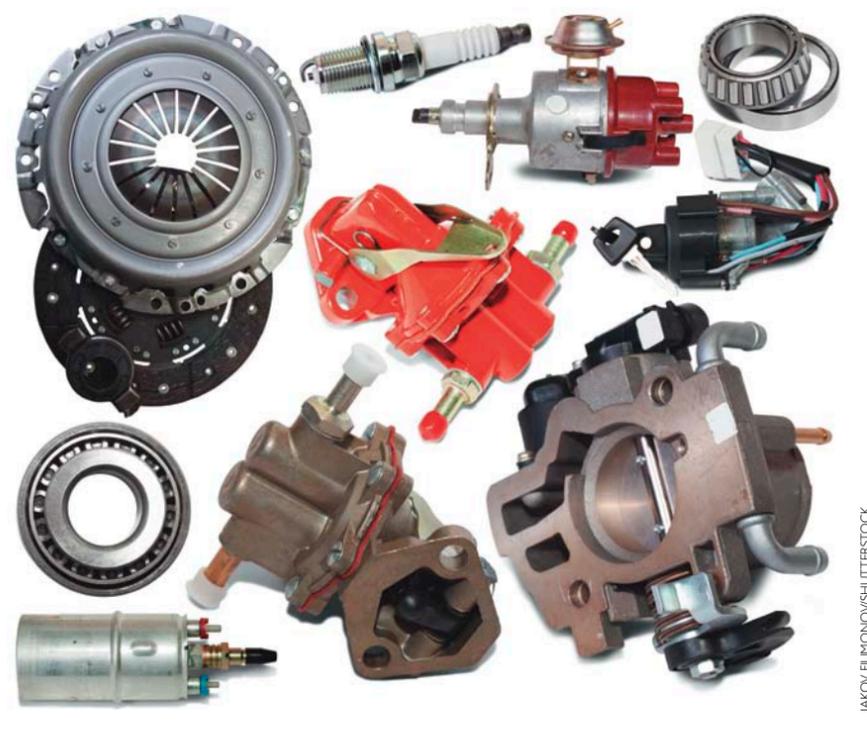
- obstrução da ventilação;
- temperatura ambiente elevada;
- variação excessiva da tensão e da frequência da rede;
- bloqueio do rotor;
- excesso de partidas, inversões de rotação e frenagens;
- falta de fase;
- sobrecarga excessiva;
- regime de trabalho muito variável.

2.6.4 Carcaça como invólucro de proteção

A carcaça, além de acondicionar, também serve de proteção do motor ou, mais precisamente, do conjunto estator-rotor. A exigência do grau de proteção (IP) depende diretamente do ambiente no qual o motor é instalado. Um motor instalado ao tempo, sujeito a sol e chuva, exige um grau de proteção superior a um motor instalado no interior de uma sala limpa e seca.

Os ambientes considerados agressivos para motores são aqueles com presença de pó, poeira, fibras, partículas etc. ou, ainda, molhados ou sujeitos a jato de água. Motores operando completamente imersos são casos especiais.

Figura 2.17
Carcaças.



IAKOV FILIPONOV/SHUTTERSTOCK

Para que os motores possam trabalhar de modo adequado nesses ambientes, devem possuir algumas características construtivas especiais, tais como:

- enrolamento com camadas duplas de impregnação;
- pintura alquídica interna e externa, anticorrosiva;
- placa de identificação de aço inoxidável;
- elementos de montagem zincados;
- ventilador de material antifaiscante;
- retentores de vedação entre o eixo e as tampas;
- caixa de ligação vedada por juntas de borracha;
- calafetagem na passagem dos cabos pela carcaça;
- caixa de ligação em ferro fundido.

Os graus de proteção são especificados pelas letras IP seguidas por dois algarismos. O primeiro algarismo indica o grau de proteção contra a penetração de corpos sólidos estranhos e contato acidental. O segundo algarismo indica o grau de proteção contra a penetração de água no interior do motor (tabela 2.6).

1º algarismo		2º algarismo	
0	sem proteção	0	sem proteção
1	corpos estranhos com dimensões acima de 50 mm	1	pingos de água na vertical
2	corpos estranhos com dimensões acima de 12 mm	2	pingos de água até a inclinação de 15° com a vertical
3	corpos estranhos com dimensões acima de 2,5 mm	3	pingos de água até a inclinação de 60° com a vertical
4	corpos estranhos com dimensões acima de 1,0 mm	4	respingos de todas as direções
5	proteção contra acúmulo de poeiras prejudiciais ao motor	5	jatos d'água em todas as direções
6	totalmente protegido contra poeira	6	água de vagalhões
		7	imersão temporária
		8	imersão permanente

Tabela 2.6

Graus de proteção do motor:

Os motores trifásicos totalmente fechados para aplicação normal são fabricados com os seguintes graus de proteção:

- IP54 – Proteção completa contra toque e acúmulo de poeiras nocivas (5). Proteção contra respingos de todas as direções (4). São utilizados em ambientes empoeirados.
- IP55 – Proteção completa contra toque e acúmulo de poeiras nocivas (5). Proteção contra jatos d'água em todas as direções (5). São utilizados nos casos em que os equipamentos são lavados periodicamente com mangueiras.
- IP(W)55 – Idênticos ao IP55, porém são protegidos contra intempéries, chuva e maresia. São utilizados ao ar livre. Também são chamados motores de uso naval.

2.7 Operação e manutenção de motores elétricos

Nas indústrias, os motores são os que mais consomem energia elétrica. São responsáveis por cerca de 50% de toda a energia elétrica consumida e, por isso, necessitam de monitoramento constante. Para que um motor tenha a vida útil aumentada e diminua o consumo de energia elétrica, é preciso adotar algumas ações para a realização de manutenção preventiva.

Cerca de 90% dos motores elétricos instalados são assíncronos, com rotor em curto-circuito.

2.7.1 Carregamento conveniente dos motores

O dimensionamento de um motor elétrico, para trabalhar nas condições normais de tensão e frequência, é feito para que se tenha um conjugado nominal C_n , a uma velocidade nominal N_n .

O conjugado resistente deve sempre ser menor que o conjugado nominal. Se for igual ou superior, o aquecimento resultante será dado pelas perdas elétricas (ou perdas térmicas), as quais variam com o quadrado do conjugado resistente (carga).

Para outra situação, um motor “subcarregado” apresenta apreciável redução no rendimento. O carregamento ideal deveria corresponder à carga do trabalho a ser realizado.

Na tabela 2.7 é mostrada a variação, com a diminuição do rendimento, de um motor assíncrono trifásico de 75 cv, 4 polos, em função do carregamento apresentado em regime normal de operação.

2.7.2 Ventilação adequada

Aproveitando a rotação do eixo do motor, um ventilador, interno ou externo, é ligado a esse eixo para fazer seu resfriamento. Como o ar que circula dentro do motor eventualmente contém impurezas, isso pode comprometer o sistema de resfriamento e a dispersão de calor, acarretando maior aquecimento. Nas indústrias, é comum encontrar motores instalados em ambientes fechados, que limitam a circulação do ar, provocando aquecimentos excessivos. Assim, para assegurar o bom funcionamento das instalações, tomam-se as seguintes precauções:

- limpar os orifícios de ventilação e as aletas, a fim de retirar a poeira e os materiais fibrosos;
- providenciar a livre circulação do ar no local de instalação do motor;
- verificar o funcionamento do sistema de ventilação auxiliar e os dutos de passagem de ar.

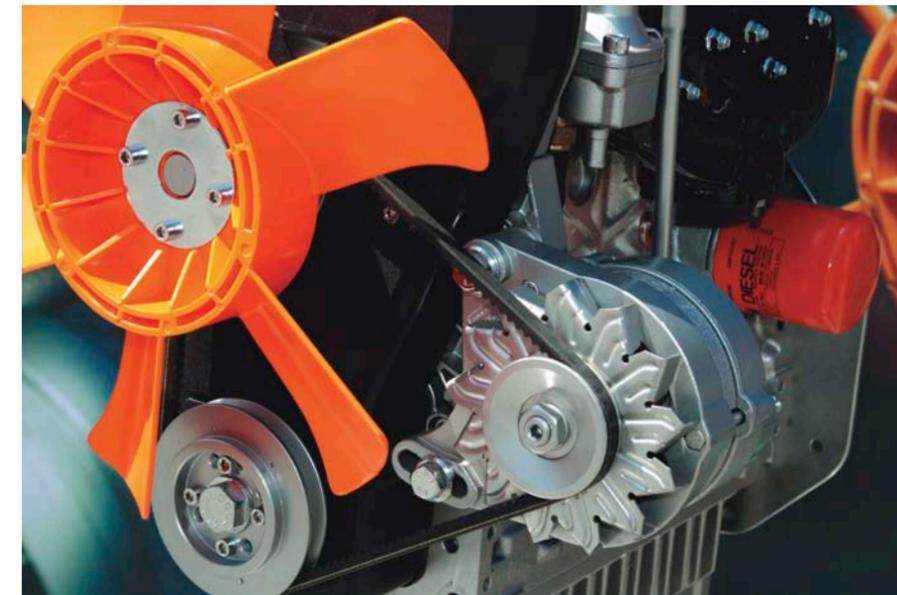


Figura 2.18
Sistema de ventilação.

2.7.3 Controle da temperatura ambiente

Os motores foram projetados para operar em 40 °C, considerada temperatura ambiente, em razão do fato de os materiais que compõem a parte interna do motor suportarem essa temperatura.

2.7.4 Cuidado com as variações de tensão

As variações de tensão, para cima ou para baixo, ocasionam um superaquecimento do motor, por não estarem de acordo com seus valores nominais de funcionamento.

Tabela 2.7

Rendimento versus carregamento do motor.

Variação do rendimento de motores de 75 cv	
Carregamento (%)	Diminuição do rendimento (%)
70	1
50	2
25	7

2.7.5 Degradação dos isolantes térmicos

Com a variação de temperatura para cima ou para baixo, há uma sensível diminuição da vida útil dos isolantes térmicos que fazem parte do motor. As causas principais para essa ocorrência são: sobretensão de linha, corrente excessiva nas partidas, depósito de poeira (que podem formar pontes condutoras), ataque por vapores ácidos ou gases arrastados pela ventilação.

Procedimentos para manutenção dos isolantes térmicos

Para evitar a degradação dos isolantes térmicos, recomendam-se as medidas seguintes:

- equipar os quadros de alimentação com aparelhos de proteção e comandos apropriados e proceder a verificações periódicas de seu funcionamento;
- nos períodos de parada dos motores, limpar as bobinas dos enrolamentos;
- instalar filtros nos sistemas de ventilação dos motores, proporcionando-lhes manutenção adequada;
- deixar os motores em lugares salubres;
- observar se há desprendimento de fumaça;
- verificar periodicamente as condições de isolamento;
- equipar os motores com dispositivos de alarme e proteção contra curtos-circuitos;
- observar ruídos e vibrações intempestivas;
- observar sinais de superaquecimento e anotar periodicamente as temperaturas durante a operação;
- observar o equilíbrio das correntes nas três fases;
- verificar se a frequência prevista para o motor é realmente igual à frequência da rede de alimentação.

2.7.6 Fixação correta dos motores e eliminação de vibrações

Um motor nunca deve ser fixado em uma inclinação sem que se tenha certeza de suas características. Vibrações anormais reduzem o rendimento do motor. As vibrações podem ser consequência de uma falha no alinhamento, de uma fixação insuficiente ou defeituosa do motor em sua base, de folgas excessivas dos mancais ou ainda de um balanceamento inadequado nas partes giratórias.

Medidas para prevenir vibrações

A fim de controlar as vibrações, algumas medidas preventivas podem ser tomadas, como:

- observar o estado dos mancais;
- observar a vida útil média dos mancais (informação fornecida pelos fabricantes);
- controlar e analisar as vibrações de forma muito simples: basta colocar uma ferramenta sobre o mancal, aproximando o ouvido e detectando as falhas pelos ruídos produzidos;

- tomar cuidado ao substituir um rolamento por outro;
- nas paradas de longa duração, trocar periodicamente a posição de repouso dos rotores dos motores elétricos, assim como das partes móveis das máquinas.

2.7.7 Lubrificação correta dos mancais

Como visto anteriormente, a temperatura ambiente considerada para um motor é de 40 °C. A essa temperatura estão submetidos todos os componentes do motor, incluindo o rolamento de esferas, que em funcionamento integral tem vida útil em torno de três a quatro anos, dependendo das condições de trabalho.



Figura 2.19
Rolamento.

De tempos em tempos, deve-se fazer a lubrificação dos rolamentos. Essa medida prolongará sua vida útil e elevará seu rendimento e o do motor.

A lubrificação dos rolamentos é feita, em geral, com graxa mineral. Quando as temperaturas de operação são elevadas (de 120 °C a 150 °C) ou as velocidades de rotação superam 1 500 rpm, usa-se óleo mineral. Esses óleos devem ter características lubrificantes adequadas às condições de trabalho. Nos motores de pequena potência, a lubrificação inicial na montagem é prevista de modo a assegurar um número elevado de horas de funcionamento. Às vezes, a reserva de graxa é suficiente para toda a vida útil do equipamento. Nos motores maiores, há a necessidade de lubrificação externa.

Recomendações para prolongar a vida útil dos rolamentos

- respeitar os intervalos de lubrificação;
- não engraxar excessivamente os rolamentos e limpá-los com gasolina antes de colocar a graxa nova (salvo se houver evacuador automático de graxa);
- utilizar as graxas recomendadas pelo fabricante, em função do serviço e da temperatura;

- para os mancais lubrificados a óleo, verificar os anéis de retenção e utilizar o óleo recomendado;
- observar a temperatura dos mancais em operação;
- cuidar para que a temperatura ambiente permaneça dentro dos limites normais;
- se o motor precisa funcionar em um ambiente anormal, assinalar esse fato ao fabricante no momento do pedido;
- durante a limpeza, evitar depósitos de poeira nas caixas de rolamentos.

2.7.8 Valores de placa de um motor

Os valores de placa são típicos de funcionamento do motor. São de grande relevância, tanto na escolha do motor como em sua manutenção ou troca. Auxiliam também na escolha do controle a ser usado, por exemplo, o de um inversor de frequência. Na figura 2.20, é mostrado um exemplo de placa de identificação de um motor trifásico do tipo gaiola de esquilo de 4 polos de baixa tensão. É descrito, a seguir, o significado de cada um dos campos da placa.

Figura 2.20

Valores de placa de um motor trifásico do tipo gaiola de esquilo.

NOME DO FABRICANTE NBR 7094			
~ 3			
MOTOR INDUÇÃO-GAIOLA	Hz 60	CAT N	
kW(cv)	1.1(1,5)	RPM 1700	
FS 1,15	ISOL B	Ip/In 5,4	IP55
220/380 V		4,78/2,77 A	
			16 kg
		REND. % = 72,7%	
		COS φ 0,83	

Na figura:

- **Nome do fabricante:** possui o nome (marca) do fabricante do motor.
- ~ 3: esse símbolo indica ser um motor trifásico e, portanto, deve ser ligado a uma rede trifásica.
- **Motor indução-gaiola:** indica o tipo do motor.
- **Frequência do motor:** indica qual a frequência de trabalho do motor ou o tipo de rede elétrica ideal para seu funcionamento (50 Hz ou 60 Hz, depen-

dendo da rede elétrica do local ou país. No Brasil, a rede elétrica trabalha com 60 Hz). Usar o motor em uma frequência de trabalho diferente dessa altera seu tempo de vida útil. Isso ocorre, por exemplo, no caso do uso de inversores de frequência.

- **Cat:** nesse exemplo, o motor pertence à categoria N. Trata-se de uma classificação dos motores de acordo com a norma NBR 7094, que indica qual tipo de curva torque \times velocidade o motor segue. A categoria N refere-se a um motor muito usado em bombas, ventiladores e máquinas operatrizes.
- **Potência do motor:** indica a potência fornecida no eixo do motor. A unidade pode ser dada em kW, HP ou cv. O HP tem sido substituído pelo cv, quando se deseja especificar potência mecânica do motor elétrico.
- **RPM:** indica a rotação do eixo do motor já incluindo o escorregamento. Nesse exemplo, por ser um motor de 4 polos, o eixo do motor tem uma velocidade síncrona ou nominal de 1800 rpm. Por ser do tipo assíncrono, esse motor nunca chega a alcançar sua velocidade síncrona, pois possui um escorregamento. A velocidade típica do motor (com carga no eixo) é de 1700 rpm. O motor trabalha a 94,4% de sua rotação nominal ($100 \times 1700/1800$). Ou seja, possui um escorregamento de 5,6% ($100\% - 94,4\%$).
- **Fator de serviço (FS):** indica potência extra do motor. Nesse exemplo (1,15), o motor pode trabalhar transferindo 15% a mais de potência do que o especificado, se necessário. Pode, portanto, transferir 15% a mais que um motor do mesmo tamanho. Isso pode ser útil quando se precisa economizar espaço na colocação do motor. Mas há um custo a pagar por essa vantagem: o fator de potência ($\cos \phi$) e o rendimento (η) do motor são alterados, caso o motor atue nessa faixa de potência; sua vida útil também é reduzida.
- **Isol** (ou classe de isolamento): classificação do motor segundo a temperatura máxima em seus enrolamentos. Nesse exemplo, B indica que o motor pode suportar até 130 °C.
- **Ip/In:** esse número especifica a relação numérica de quantas vezes a corrente de partida (I_p) é maior que a corrente nominal (I_n) do motor (com o rotor bloqueado, por exemplo).
- **IP** (índice de proteção do motor): é uma classificação (segundo a norma NBR IEC 60529) em que se leva em conta o fator de proteção das pessoas quanto à isolamento elétrico do motor, em relação a pó, líquidos e outras condições ambientais de trabalho do motor. Nesse exemplo, o primeiro dígito 5 indica proteção do motor contra poeira, e o segundo dígito 5, proteção contra jatos de água.
- **Tensão de trabalho:** indica a(s) tensão(ões) nominal(ais) (ou de trabalho) do motor. Nesse exemplo, o motor trabalha na tensão nominal de 220 V na ligação em triângulo (220 V em cada bobina ou enrolamento do motor). Para a partida, na ligação em estrela, o motor é ligado em 380 V.
- **Corrente de trabalho:** é a corrente nominal (ou de trabalho) do motor. Quando ligado à tensão de 220 V, o motor consome 4,78 A; quando ligado à tensão de 380 V, consome 2,77 A.
- **Esquema de ligação:** especifica a configuração dos bornes para as ligações em triângulo (220 V) ou estrela (380 V), ou seja, mostra como conectar os bornes do motor em cada tipo de ligação. Nesse exemplo, como se trata de um motor de seis pontas, temos apenas esses dois tipos de conexão.
- **Peso:** o motor do exemplo pesa 16 kg.

- **Rend. %:** mostra o rendimento do motor (η) em porcentagem, ou a relação entre a potência no eixo e a potência ativa consumida pelo motor. No exemplo, o motor pode fornecer 72,7% da energia consumida da rede elétrica ao eixo (à carga).
- **COS ϕ :** o fator de potência, ou $\cos \phi$, indica o ângulo entre a corrente e a tensão fornecidas ao motor, ou seja, significa que uma parte da corrente consumida pelo motor não é aproveitada, sendo devolvida à rede elétrica. Isso causa um dimensionamento maior dos fios usados na instalação elétrica. Esse fator ($\cos \phi = 0,83$, nesse exemplo) deve ser compensado na ligação geral dos motores para que seja atingido um valor estabelecido pela concessionária de energia elétrica ($\cos \phi \geq 0,92$). Em geral, isso é feito usando um banco de capacitores acoplado à entrada de energia dos motores.

2.8 Dispositivos elétricos de manobra e proteção

Os dispositivos de manobra (ou comando) e de proteção podem ser classificados em:

- de baixa tensão, quando projetados para emprego em circuitos cuja tensão de linha é inferior ou igual a 1 000 V;
- de alta tensão, quando projetados para emprego em circuitos cuja tensão de linha é superior a 1 000 V.

Figura 2.21

Estação de alta tensão.



No caso mais geral, podemos distinguir em um dispositivo de manobra ou de proteção três tipos de circuitos internos:

- a) o circuito principal, constituído pelo conjunto de todos os circuitos associados, cujo dispositivo de manobra ou de proteção tem função de fechar ou abrir;

b) o circuito de comando, que é diferente do principal e comanda a operação de fechamento, de abertura ou ambas;

c) o circuito auxiliar, que é diferente do principal e do circuito de comando, usado também para outras finalidades, tais como sinalização, intertravamento etc.

2.8.1 Fusíveis

Os dispositivos fusíveis ou, apenas, fusíveis constituem a proteção mais tradicional dos circuitos e dos sistemas elétricos. Sua operação consiste na fusão do elemento fusível, também chamado elo fusível, contido em seu interior. O elemento fusível, isto é, o “ponto fraco” do circuito, é um condutor de pequena seção transversal que, por sua alta resistência, sofre um aquecimento maior que o dos outros condutores à passagem da corrente. Para uma relação adequada entre a seção do elemento fusível e a do condutor protegido, ocorre a fusão do metal do elemento, quando o condutor atinge uma temperatura próxima da máxima admissível.

O elemento fusível é um fio ou uma lâmina, geralmente de cobre, prata, estanho, chumbo ou liga, colocado no interior do corpo do fusível, em geral de porcelana, esteatite ou papelão, hermeticamente fechado.

Alguns fusíveis possuem um indicador, que permite verificar se o dispositivo fusível operou ou não; em sua maioria, apresentam em seu interior um material granulado extintor, de areia de quartzo, que envolve por completo o elemento fusível.

A figura 2.22 mostra a composição de um fusível, no caso mais geral.

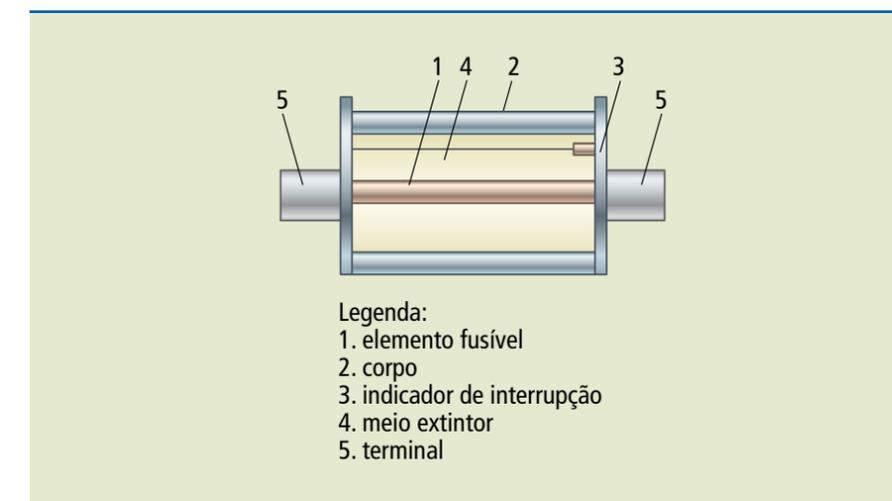


Figura 2.22

Componentes típicos de um fusível.

Segundo a **IEC 269**, os fusíveis para aplicações industriais apresentam a seguinte classificação:

- **gl** – são fusíveis limitadores de corrente; têm a capacidade de interromper desde a corrente mínima de fusão até o valor nominal de interrupção;

International
Electrotechnical
Commission.

- **gII** – obedecem às mesmas características anteriores, diferindo, no entanto, daquelas nos seguintes aspectos:
 - até $I_{nf} \approx 50 \text{ A}$, os fusíveis **gII** são mais rápidos do que os fusíveis **gI**;
 - entre $100 \text{ A} \leq I_{nf} < 1000 \text{ A}$, os fusíveis **gI** e **gII** têm as mesmas características;
- nas aplicações domésticas, as capacidades de interrupção dos fusíveis **gI** e **gII** são divergentes.

As principais características elétricas dos fusíveis são:

- Corrente nominal** – Aquela que pode percorrer o fusível por tempo indefinido sem que ele apresente aquecimento excessivo. O valor da corrente de fusão de um fusível é normalmente estabelecido em 60% superior ao valor indicado como corrente nominal.
- Tensão nominal** – Aquela que define a tensão máxima de exercício do circuito em que o fusível deve operar regularmente (alta ou baixa tensão).
- Capacidade de interrupção** – É o valor máximo eficaz da corrente de curto-circuito que o fusível é capaz de interromper, dentro das condições de tensão nominal e do fator de potência estabelecido. Podem ser classificados como ultrarrápidos e retardados.

Os fusíveis do tipo NH e Diazed (tipo D) devem operar satisfatoriamente nas condições de temperatura ambiente para as quais foram projetados. A figura 2.23 apresenta alguns fusíveis NH e Diazed e suas bases.

Figura 2.23

Fusíveis NH e Diazed e suas bases.



O fusível NH (figura 2.24) é utilizado em instalações elétricas industriais. Possui seis tamanhos diferentes, apresenta apenas o tipo retardado e sua corrente nominal varia de 6 A a 1 250 A.

Figura 2.24

Fusível NH.



Já os fusíveis Diazed (figura 2.25) são utilizados nas instalações elétricas residenciais e industriais. Sua capacidade varia de 2 A a 63 A, apresentam os tipos ultrarrápido e retardado e trabalham com uma tensão máxima de 500 kV.

Figura 2.25

Base com fusível Diazed.



Os fusíveis atuam dentro de determinadas características de tempo de fusão *versus* corrente, fornecidas em curvas específicas. Para correntes elevadas de curto-circuito, os fusíveis NH e Diazed atuam em um tempo extremamente rápido, como pode ser observado nas curvas características mostradas nas figuras 2.26 e 2.27, em que o tempo de fusão é colocado no eixo vertical e a corrente de pico, no eixo horizontal.

As tabelas 2.8 e 2.9 fornecem as correntes nominais padronizadas dos fusíveis Diazed e NH, e a figura 2.28 traz o catálogo com o código para a escolha do fusível Diazed e das peças que compõem o conjunto.

Figura 2.26
Família de curvas do fusível tipo NH.

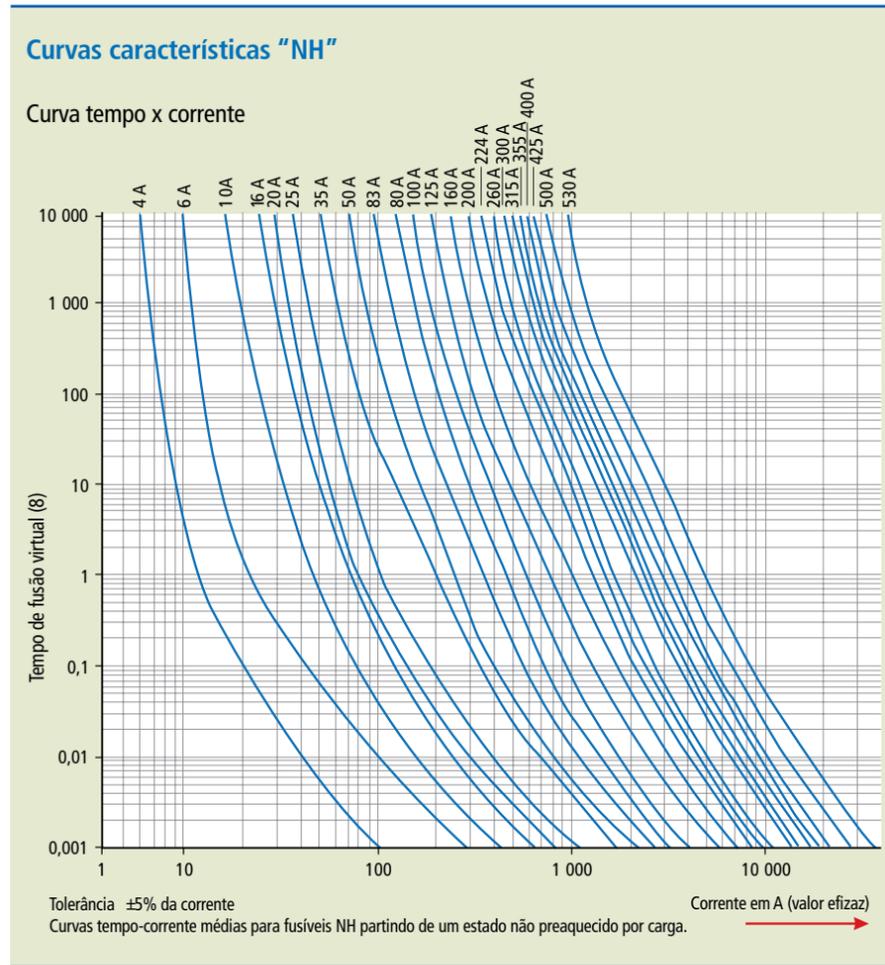
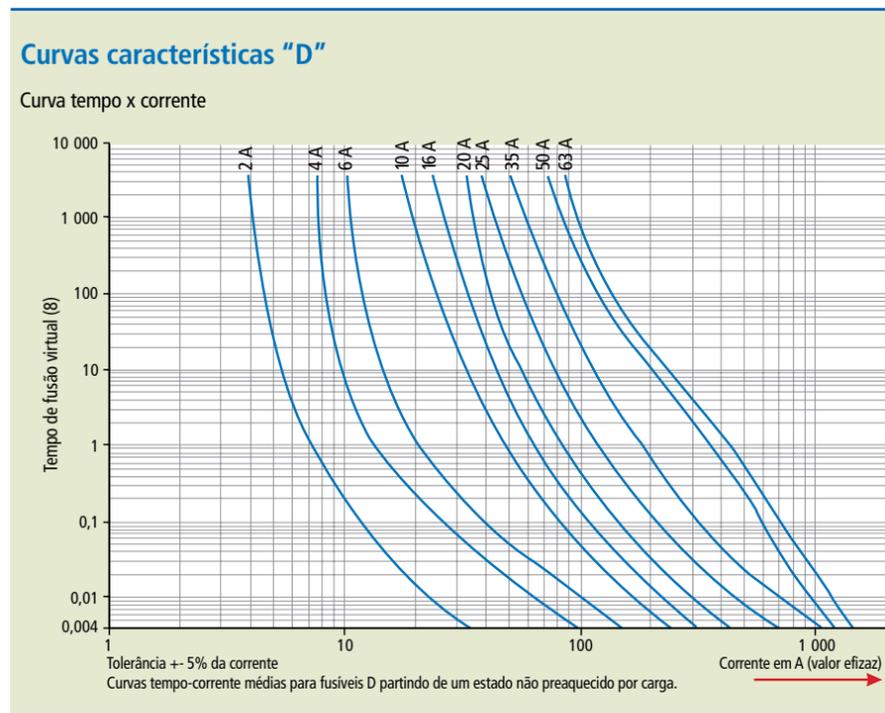


Figura 2.27
Família de curvas do fusível tipo D.



Tamanho	Correntes nominais	Tamanho	Correntes nominais
DII	2	DIII	35
	4		50
	6		63
	10	DIVH	80
	16		100
	20		–
	25		–

Tabela 2.8
Correntes nominais dos fusíveis NH – Siemens.

Tamanho	Correntes nominais	Tamanho	Correntes nominais	
000	6	I	125	
	10		160	
	16		200	
	20		224	
	25	2	250	
	32		224	
	40		250	
	50		315	
63	00	355		
80		400		
00	100	3	400	
	125		500	
	160		630	
	I	40	4	800
		50		1 000
63		1 250		
80		–		
	100		–	

Tabela 2.9
Correntes nominais dos fusíveis Diazed – Siemens.

Figura 2.28

Catálogo para escolha do fusível Diazed – WEG.

	Tamanho	Corrente nominal (A)	Tipo	Peso de 100 peças (kg)
 Tampa	DII	2 a 25	TPW25	5
	DIII	35 a 63	TPW63	8,4
 Fusível	DII	2	FDW-2S	2,7
		4	FDW-4S	
		6	FDW-6S	
		10	FDW-10S	
		16	FDW-16S	
		20	FDW-20S	
	DIII	25	FDW-25S	3,6
		35	FDW-35S	5,6
		50	FDW-50S	6,2
		63	FDW-63S	6,4
 Anel de proteção	DII	2 a 25	APW25	3
	DIII	35 a 63	APW63	3,6
 Parafuso de ajuste	DII	2	PAW2	1,3
		4	PAW4	
		6	PAW6	
		10	PAW10	
		16	PAW16	
		20	PAW20	
	DIII	25	PAW25	1,2
		35	PAW35	2,1
		50	PAW50	1,9
		63	PAW63	1,7
 Base	DII	2 a 25	BAW25 ¹	8,9
			BSW25 ²	8
	DIII	35 a 63	BAW63 ¹	14,5
			BSW63 ²	13

1. BAW - Com base para fixação rápida em trilho DIN 35 mm.

2. BSW - Sem base para fixação rápida em trilho DIN 35 mm.

No caso dos fusíveis retardados, recomenda-se que sejam observados, no mínimo, os seguintes pontos:

- devem suportar, sem fundir, o pico de corrente ou corrente de partida (I_p) dos motores durante o tempo de partida (T_p). Com os valores de I_p e T_p entra-se nas curvas características;

- devem ser dimensionados para uma corrente (I_F) no mínimo 20% superior à nominal (I_n) do motor que protegerá (equação 2.27):

$$I_F \geq 1,2 \cdot I_n \quad (2.27)$$

- os fusíveis de um circuito de alimentação de motores devem também proteger os contatores e relés de sobrecarga.

2.8.2 Contatores

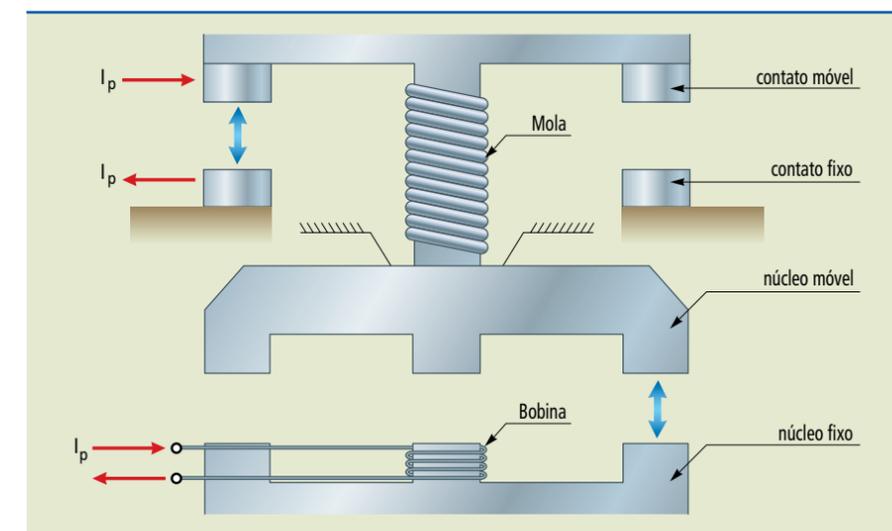
O contator é um dispositivo de manobra (mecânico) de operação não manual, em geral eletromagnética, que tem uma única posição de repouso e é capaz de estabelecer, conduzir e interromper correntes em condições normais de circuito, até mesmo sobrecargas.

Seu princípio de funcionamento baseia-se na força magnética que tem origem na energização de uma bobina e na força mecânica proveniente do conjunto de molas preso à estrutura dos contatos móveis. Quando a bobina é energizada, sua força eletromecânica sobrepõe-se à força mecânica das molas, obrigando os contatos móveis a se fecharem sobre os contatos fixos aos quais estão ligados os terminais dos circuitos.

Os contatores são construídos para suportar elevado número de manobras. São dimensionados em função da corrente nominal do circuito, do número de manobras desejado e da corrente de desligamento no ponto de instalação.

A corrente de partida dos motores não tem praticamente nenhuma influência sobre a vida útil dos contatos dos contatores. Em geral, os contatores pequenos, quando têm seus contatos danificados, tornam-se inutilizáveis; já os contatores de corrente nominal elevada possibilitam, em geral, a reposição dos contatos danificados.

A figura 2.29 apresenta um esquema dos contatos fixos e móveis do contator, e na figura 2.30 são mostrados seus diversos componentes.

**Figura 2.29**

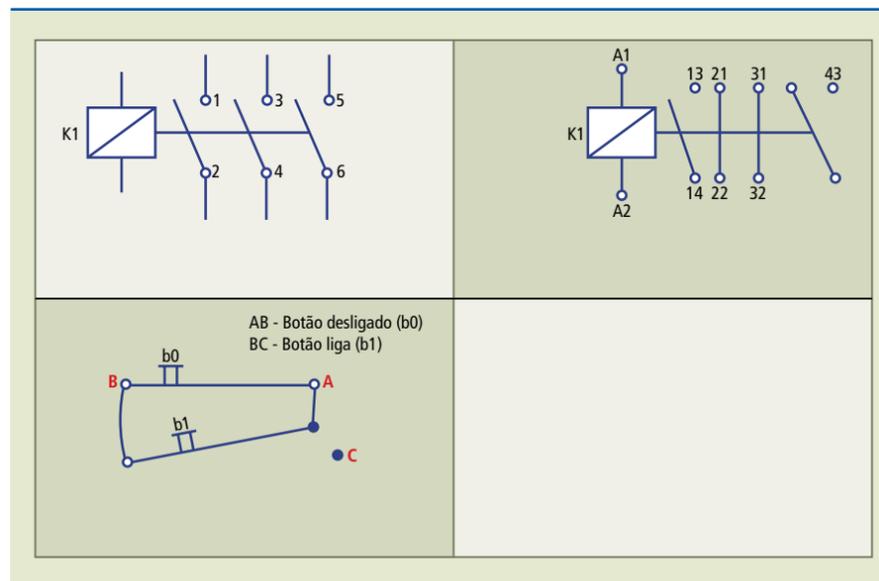
Esquema interno do contator.

Figura 2.30
Contator



No contator, os contatos principais são mais robustos e suportam correntes mais elevadas do que os contatos auxiliares, que são utilizados para sinalização e comandos e possuem contatos NF (normalmente fechado) e NA (normalmente aberto). Na figura 2.31 são mostradas a numeração dos contatos e sua simbologia.

Figura 2.31
Simbologia e numeração dos contatos de um contator.



2.8.3 Botoeira

A botoeira, também chamada botão liga-desliga, é um dispositivo que, quando pressionado, retorna para a posição de repouso por meio de uma mola.

Além de ser um elemento de ligação, a botoeira é também um elemento de sinalização, pois internamente pode conter uma lâmpada sinalizadora que permite sua visualização a distância.

É constituída de duas teclas e executa as funções de liga-desliga para comando a distância de chaves de partida direta para acionamento de motores. Na figura 2.32 é mostrada a estrutura interna de uma botoeira.

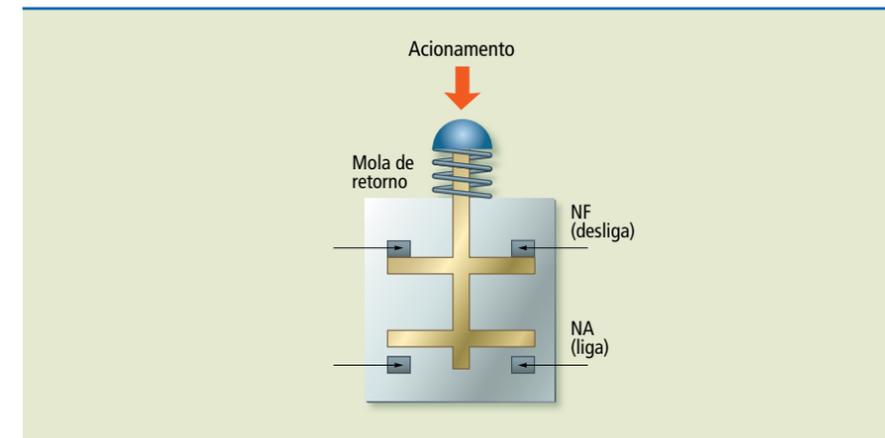


Figura 2.32
Estrutura de uma botoeira comercial.

2.8.4 Relés de sobrecarga ou térmicos

São dispositivos dotados de um par de lâminas construídas com metais de diferentes coeficientes de dilatação linear que, quando sensibilizados pelo efeito térmico produzido por uma corrente de intensidade ajustada aquecendo o bimetal, provocam, pela dilatação térmica de suas lâminas, a operação de um contato móvel.

Normalmente, os relés de sobrecarga são acoplados a contadores, de largo emprego no acionamento de motores elétricos, e podem também manobrar circuitos em geral. Os relés de sobrecarga são constituídos de modo a permitir ajustes de corrente nominal dentro de determinadas faixas, que podem ser escolhidas conforme o valor da corrente e a natureza da carga. Quanto maior o valor da corrente de sobrecarga, menor o tempo decorrido para a atuação do relé térmico. As sobrecargas são aumentos de corrente por um intervalo de tempo prolongado que pode ultrapassar a corrente nominal do motor. Nas figuras 2.33 e 2.34 são apresentados, respectivamente, o detalhe construtivo e as curvas características do relé de sobrecarga.

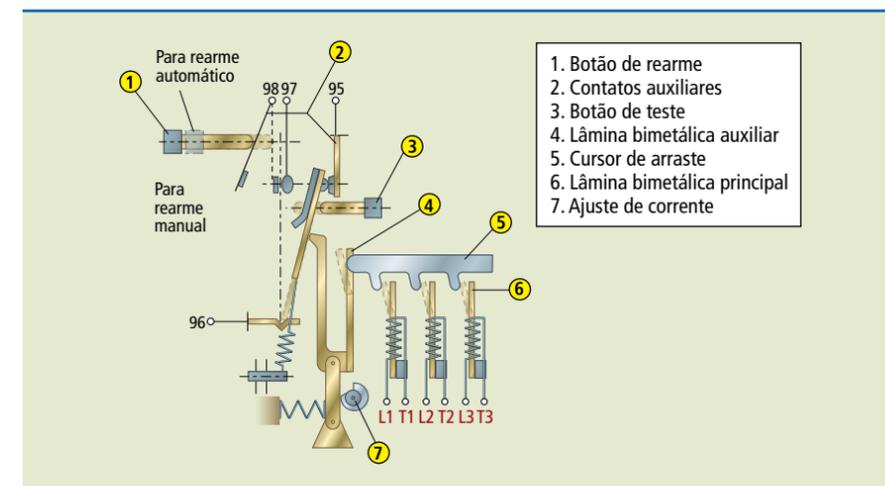
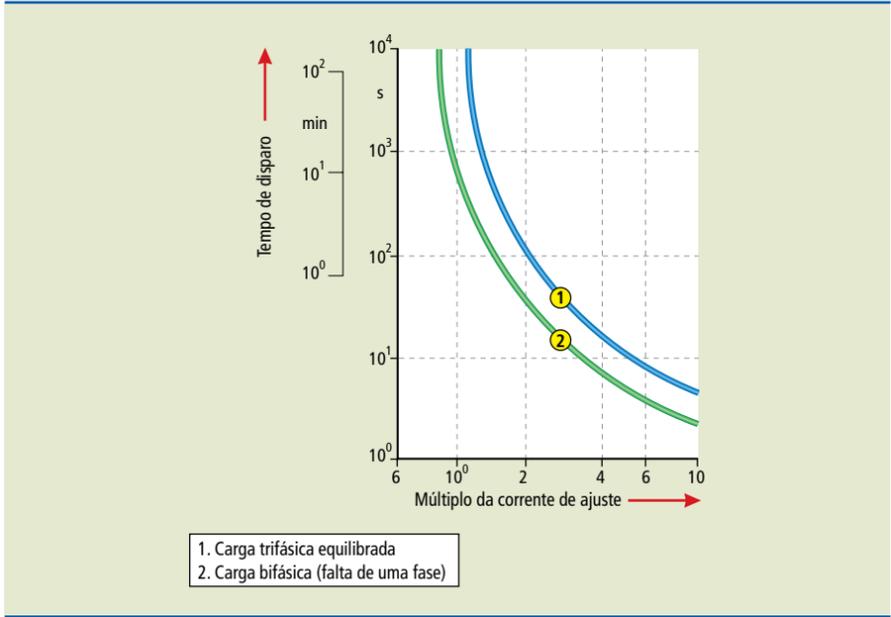


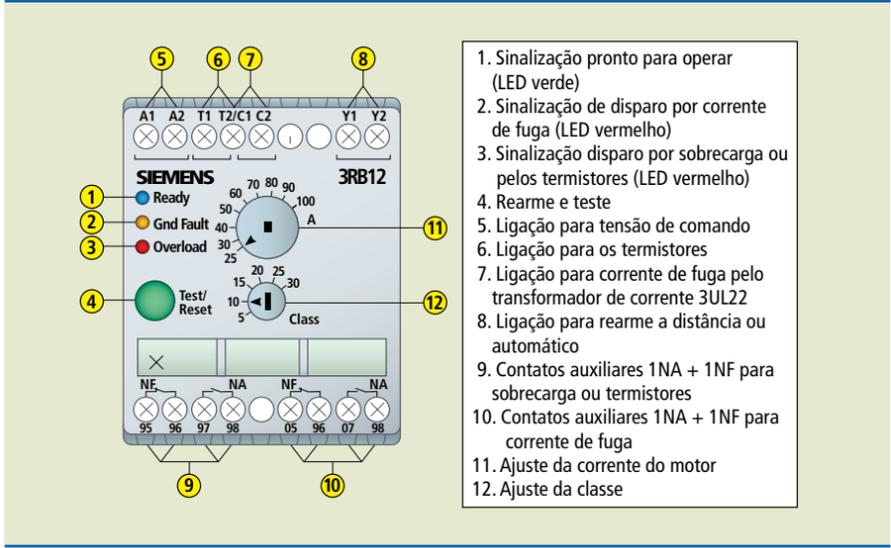
Figura 2.33
Detalhe construtivo do relé de sobrecarga.

Figura 2.34 Curvas características do relé de sobrecarga



Atualmente, os relés de sobrecarga eletrônicos (figura 2.35) têm uma vantagem sobre os tradicionais, que é a possibilidade de acompanhar a temperatura no motor por meio de seus sensores de temperatura.

Figura 2.35 Relé de sobrecarga eletrônico



2.8.5 Disjuntores

O disjuntor é um equipamento de comando e de proteção de circuitos cuja finalidade é conduzir continuamente a corrente de carga sob condições nominais e interromper correntes anormais de sobrecarga e de curto-circuito. Está presente tanto nas instalações residenciais como nas industriais.

Os disjuntores termomagnéticos são dotados de disparadores térmicos de sobrecarga e eletromagnéticos de curto-circuito, detalhados a seguir.

a) Disparador térmico: é constituído de um elemento bimetálico que consiste em duas lâminas de metal soldadas, com diferentes coeficientes de dilatação térmica. Elas se curvam quando a corrente que atravessa o disjuntor produz quantidade de calor superior ao estabelecido para a unidade. O metal de maior dilatação térmica adquire a posição que corresponde ao maior arqueamento da lâmina e provoca o deslocamento da barra de disparo. Esta destrava o mecanismo que mantém a continuidade do circuito. Assim, a alavanca do disjuntor assume a posição disparado, intermediária entre as posições ON (ligado) e OFF (desligado).

Figura 2.36 Simbologia utilizada pelos comandos elétricos no acionamento de motores.

Símbolo	Descrição	Símbolo	Descrição
	Botoeira NA		Botoeira NF
	Botoeira NA com retorno por mola		Botoeira NF com retorno por mola
	Contatos tripolares NA, ex.: contador de potência		Fusível
	Acionamento eletromagnético, ex.: bobina do contator		Contato normalmente aberto (NA)
	Relé térmico		Contato normalmente fechado (NF)
	Disjuntor com elementos térmicos e magnéticos, proteção contra corrente de curto-circuito e sobrecarga		Acionamento temporizado na ligação
	Disjuntor com elemento magnético, proteção contra corrente de curto-circuito		Lâmpada/sinalização
	Transformador trifásico		Motor trifásico

b) Disparador magnético: é constituído de uma bobina que, quando atravessada por uma corrente de valor superior ao estabelecido para a unidade a que o disjuntor está ligado, atrai o induzido e se processa a ação de desengate do mecanismo que mantém a continuidade do circuito, fazendo com que os contatos do disjuntor se separem.

Os disjuntores apresentam uma vantagem sobre os fusíveis, na proteção dos circuitos contra sobrecarga e curto-circuito, porque permitem a religação do sistema após a ocorrência da elevação da corrente, enquanto os fusíveis devem ser substituídos antes de nova operação.

Na figura 2.36 é apresentada a simbologia empregada nos diagramas de comandos elétricos para acionamento de motores.

2.9 Acionamentos de motores

A adoção de um sistema de partida eficiente pode ser considerada uma das regras básicas para obter do motor uma vida útil prolongada, custos operacionais reduzidos, além de dar à equipe de manutenção da indústria tranquilidade no desempenho das tarefas diárias. Os critérios para a seleção do método de partida adequado envolvem considerações quanto à capacidade da instalação, requisitos da carga a ser ligada, além da capacidade do sistema gerador.

2.9.1 Partida direta

É o método de partida mais simples, em que não são empregados dispositivos especiais de acionamento do motor. Apenas são utilizados contatores, disjuntores ou chaves interruptoras. A partida do motor é considerada um momento crítico, visto que, para sair de seu estado de inércia, o motor necessita de um pico de corrente, em geral, de seis a oito vezes o valor da corrente nominal do motor. Se houver carga (peso no eixo), o pico pode chegar a dez vezes o valor nominal. O excesso de corrente pode disparar os disjuntores e sobrecarregar a rede elétrica. Então, por imposição da fornecedora de energia, a partida direta do motor só deve ser executada em motores de até 5 cv (ou 10 cv em instalações industriais).

Na partida direta, as três fases (L1, L2 e L3) são ligadas diretamente ao motor. A partida direta apresenta as seguintes vantagens:

- projeto e montagem mais simples;
- alto conjugado de partida;
- tempo de partida menor;
- menor custo do dispositivo de partida.

Entretanto, possui desvantagens que precisam ser levadas em conta:

- maior corrente de partida e, portanto, maior queda de tensão na rede elétrica, o que causa interferência em outros equipamentos;
- contatores, disjuntores, fusíveis e cabos precisam ser superdimensionados, causando elevação no custo da instalação;

- a máquina acionada pode precisar de um redutor (mecânico) de velocidade na partida.

Na figura 2.37, são mostrados os diagramas de comando (ou controle) e de potência (ou força) do acionamento feito por partida direta. No diagrama de potência, os fusíveis (F1, F2, F3) e o relé térmico (FT1) protegem o motor trifásico contra curto-circuito e sobrecarga. Se a corrente em uma das fases do motor ultrapassa o limite ajustado no relé, seu contato (FT1) no diagrama de controle se abre, desligando o contator K1 e abrindo todos os seus contatos.

Para acionar o motor, o botão pulsador S1 é pressionado, fechando o circuito e energizando K1. O contato NA (normalmente aberto) de K1 em paralelo a S1 se fecha, “selando” o caminho da corrente. Ao mesmo tempo se fecham K1, em série com a lâmpada (indicando motor ligado), e os três contatos K1 em série com o motor, ligando-o. Para desligar, basta pressionar o botão S0 para desenergizar K1. Note que o fio PE (proteção elétrica) deve conectar a carcaça do motor ao aterramento da instalação dos motores.

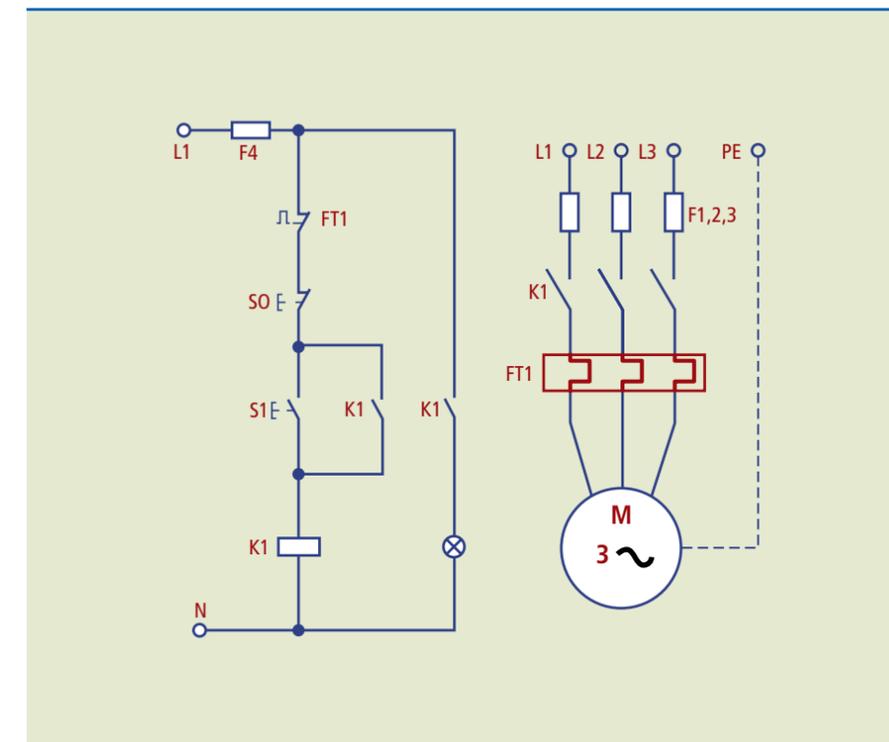


Figura 2.37

Diagramas de controle e de potência da partida direta.

Dimensionamento dos dispositivos para acionamento em partida direta

Exemplo

Especificar o motor e dimensionar o comando de partida direta de um motor trifásico tipo gaiola de esquilo de 20 cv, 6 polos, 380 V/60 Hz, $T_p = 2s$, com comando em 220 V.

Solução:

- Na tabela 2.10, vê-se que o motor WEG – IP55, de 20 cv e carcaça tipo 160 L, atende a essas especificações. Outro dado disponível na tabela 2.10 é o valor da corrente nominal (In):

$$I_n = 56,7A \text{ para } 220V$$

Pela equação 2.28, para 380 V:

$$I_n(380V) = \frac{I_n(220V)}{\sqrt{3}} \cong 32,74A \quad (2.28)$$

Tabela 2.10

Catálogo de motores WEG.

Potência		Carcaça	RPM	Corrente nominal em 220 V (A)	Corrente com rotor bloqueado Ip/In
CV	kW				
6 polos – 60 Hz					
0,16	0,12	63	1140	1,77	3,3
0,25	0,18	71	1110	1,35	3,0
0,33	0,25	71	1100	1,85	3,3
0,50	0,37	80	1150	2,51	4,3
0,75	0,55	80	1150	3,49	4,9
1,0	0,75	90S	1140	3,77	5,3
1,5	1,1	90S	1130	5,48	5,3
2,0	1,5	100L	1150	7,44	5,2
3,0	2,2	100L	1150	10,5	5,5
4,0	3,0	112M	1140	13,0	5,8
5,0	3,7	132S	1160	15,7	6,2
6,0	4,5	132S	1160	18,7	6,7
7,5	5,5	132M	1160	21,9	7,0
10	7,5	132M	1160	30,6	7,5
12,5	9,2	160M	1160	33,6	6,0
15	11	160M	1170	41,6	6,5
20	15	160L	1165	56,7	7,5

Da tabela 2.10: $I_p/I_n = 7,5$, em que I_p é a corrente de partida do motor. Substituindo:

$$I_p = 7,5 \cdot I_n(380V) = 7,5 \cdot 32,74 \cong 246A$$

- Usando o catálogo de contatores da WEG (figura 2.38), é possível dimensionar o contator K1. A corrente nominal do contator (Ie) deve ser maior que a corrente nominal do motor:

$$I_e \geq I_n(380V) \rightarrow I_e \geq 32,74A$$

Figura 2.38

Catálogo parcial de contatores da WEG.

Do catálogo da figura 2.38: em regime AC-3 e 220 V/60 Hz, o contator CWM40 suporta essa corrente (Ie máx. = 40 A).

UL C US	AC-3 Serviço normal de manobras de motores com rotor gaiola com desligamento em regime	I _e máx. (U _e ≤ 440V) (A)	CWM9	CWM12	CWM40	CWM25	CWM32
			Contatos auxiliares(NANF): 3 pólos: -10/-01/-11/-22 4 pólos: -00			Contatos auxiliares(NANF): 3 pólos: -00/-10/-01/-11/-22	
		220V (cv)	3	4	15	8,7	12,5
		380V (cv)	5,4	7,5	25	16,8	20
		440V (cv)	6	8,7	30	16,8	20

- O relé de sobrecarga (FT1), ou relé térmico, deve ser escolhido de acordo com o contator e deve suportar a corrente nominal do motor (In(380) = 32,74 A). No mesmo catálogo usado para a escolha do contator, encontra-se o grupo de relés térmicos que podem ser usados nesse exemplo.

Na figura 2.39 está a parte do catálogo para a especificação. Pode ser escolhido relé RW67.1D(25...40), em que podem se ajustar correntes de 25 A a 40 A. Como explicado no catálogo, esse relé pode ser montado diretamente sobre o contator. Também pode ser fixado em trilho ou por parafuso com auxílio da base modelo BF 67D.

Figura 2.39

Catálogo parcial de relés térmicos (ou de sobrecarga) – WEG.

RW67-1D e RW67-2D			RW117-1D																																			
Montagem direta ao contator Montagem em trilho com adaptado BF67			Montagem direta ao contator Montagem em trilho com adaptador BF117D Versão Tripolar: RW117-2D3																																			
 Versões: Tripolar: RW67-1D3, RW67-2D3 Bipolar: RW67-1D2, RW67-2D2																																						
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Código</th> <th>Faixas de Ajuste (A)</th> <th>Montagem c/ contatores</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>RW67-1D3-U040</td><td>25...40</td><td>CWM32...CWM40</td></tr> <tr><td>RW67-1D3-U050</td><td>32...50</td><td></td></tr> <tr><td>RW67-2D3-U057</td><td>40...57</td><td>CWM50...CWM60</td></tr> </tbody> </table>	Código	Faixas de Ajuste (A)	Montagem c/ contatores	RW67-1D3-U040	25...40	CWM32...CWM40	RW67-1D3-U050	32...50		RW67-2D3-U057	40...57	CWM50...CWM60	<table border="1"> <thead> <tr> <th>Código</th> <th>Faixas de Ajuste (A)</th> <th>Montagem c/ contatores</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>RW67-2D3-U063</td><td>50...63</td><td></td></tr> <tr><td>RW67-2D3-U070</td><td>57...70</td><td>CWM50...CWM60</td></tr> <tr><td>RW67-2D3-U080</td><td>63...80</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Código	Faixas de Ajuste (A)	Montagem c/ contatores	RW67-2D3-U063	50...63		RW67-2D3-U070	57...70	CWM50...CWM60	RW67-2D3-U080	63...80		<table border="1"> <thead> <tr> <th>Código</th> <th>Faixas de Ajuste (A)</th> <th>Fusível máx. (qL/gG) 1)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>RW117-1D3-U080</td><td>63...80</td><td>200</td></tr> <tr><td>RW117-1D3-U097</td><td>75...97</td><td>225</td></tr> <tr><td>RW117-1D3-U112</td><td>90...112</td><td>230</td></tr> </tbody> </table>	Código	Faixas de Ajuste (A)	Fusível máx. (qL/gG) 1)	RW117-1D3-U080	63...80	200	RW117-1D3-U097	75...97	225	RW117-1D3-U112	90...112	230
Código	Faixas de Ajuste (A)	Montagem c/ contatores																																				
RW67-1D3-U040	25...40	CWM32...CWM40																																				
RW67-1D3-U050	32...50																																					
RW67-2D3-U057	40...57	CWM50...CWM60																																				
Código	Faixas de Ajuste (A)	Montagem c/ contatores																																				
RW67-2D3-U063	50...63																																					
RW67-2D3-U070	57...70	CWM50...CWM60																																				
RW67-2D3-U080	63...80																																					
Código	Faixas de Ajuste (A)	Fusível máx. (qL/gG) 1)																																				
RW117-1D3-U080	63...80	200																																				
RW117-1D3-U097	75...97	225																																				
RW117-1D3-U112	90...112	230																																				
50			75																																			
76			98,5																																			
106			99,5																																			
0,310			0,520																																			
 Base de Fixação Individual: BF67-1D BF67-2D			 Base de Fixação Individual: BF117D																																			

- Os fusíveis (F1, F2 e F3) usados no motor devem suportar uma corrente 20% maior que a nominal do motor (In = 32,74 A):

$$I_F \geq 1,2 \cdot 32,74 \rightarrow I_F \geq 39,3A$$

Também devem suportar a corrente de pico na partida ($I_p = 246 \text{ A}$) durante o tempo de partida do motor ($T_p = 2 \text{ s}$).

Com o auxílio do catálogo de fusíveis WEG (figura 2.40) e das curvas tempo *versus* corrente para fusíveis tipo D (figura 2.41), é possível dimensionar os fusíveis como segue.

Na figura 2.41: com os valores 2 s e 246 A, escolhemos a corrente cuja curva está à direita de 39,3 A ($I_F = 50 \text{ A}$).

Na figura 2.40: com o fusível escolhido tipo D retardado para 50 A \rightarrow FDW50, escolhemos as peças para o porta-fusível. É bom lembrar que são precisos três conjuntos desses (um para cada fase do motor).

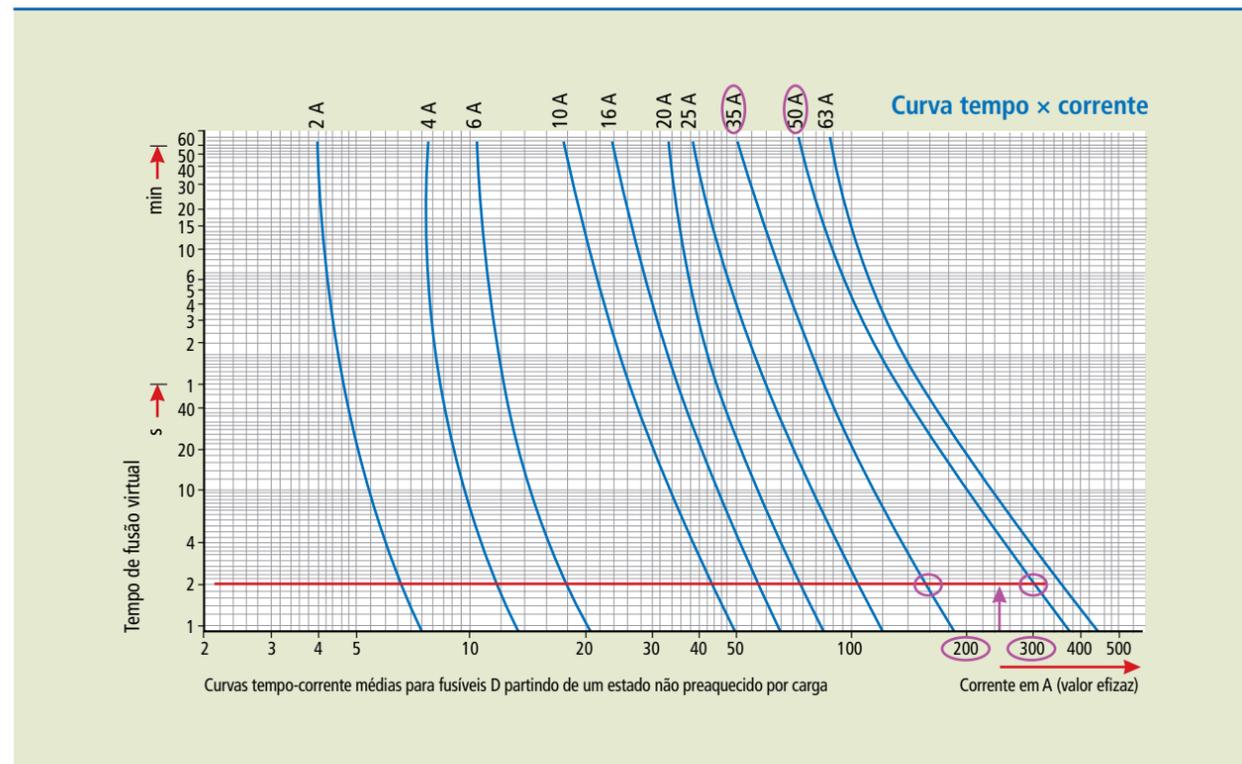
Figura 2.40

Fusível e peças da base.



Figura 2.41

Curva do fusível tipo D.
Fonte: WEG BRASIL.



2.9.2 Partida por meio da chave estrela-triângulo

Em instalações elétricas industriais, principalmente aquelas sobrecarregadas, podem ser usadas chaves estrela-triângulo como forma de suavizar os efeitos de partida dos motores elétricos. O acionamento por meio desse tipo de chave só é possível se o motor possuir seis terminais acessíveis e dispuser de dupla tensão nominal, tal como 220/380 V ou 380/660 V ou 440/760 V.

Esse método reduz picos de corrente de partida em motores de maior potência. Liga-se, por exemplo, um motor 380 V (Δ) inicialmente na configuração estrela. Dessa forma, cada conjunto de enrolamentos recebe apenas 220 V e a corrente de partida é reduzida a aproximadamente 33% de seu valor. Esse tipo de partida deve ser aplicado a uma carga que exija apenas 33% do torque de partida total. É preciso considerar também que, se o motor não atingir 90% de sua velocidade antes da comutação para estrela, o pico de corrente é equivalente ao da partida direta. Na figura 2.42, vemos como são feitas essas conexões às bobinas do motor trifásico.

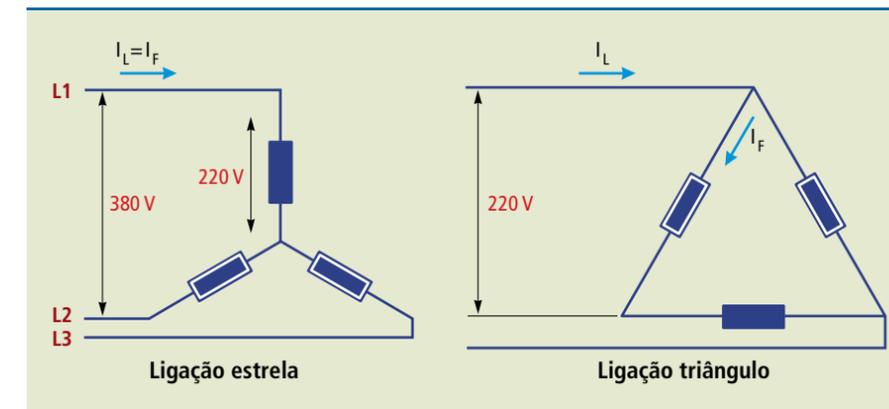


Figura 2.42

Conexões estrela e triângulo no motor trifásico.

Essa chave de partida possui a vantagem de ter custo mais baixo com relação ao de uma chave *soft-starter* (partida suave), por exemplo. Mas é preciso que o motor escolhido tenha tensão de ligação em triângulo coincidente com a tensão de linha (entre duas fases) da rede elétrica.

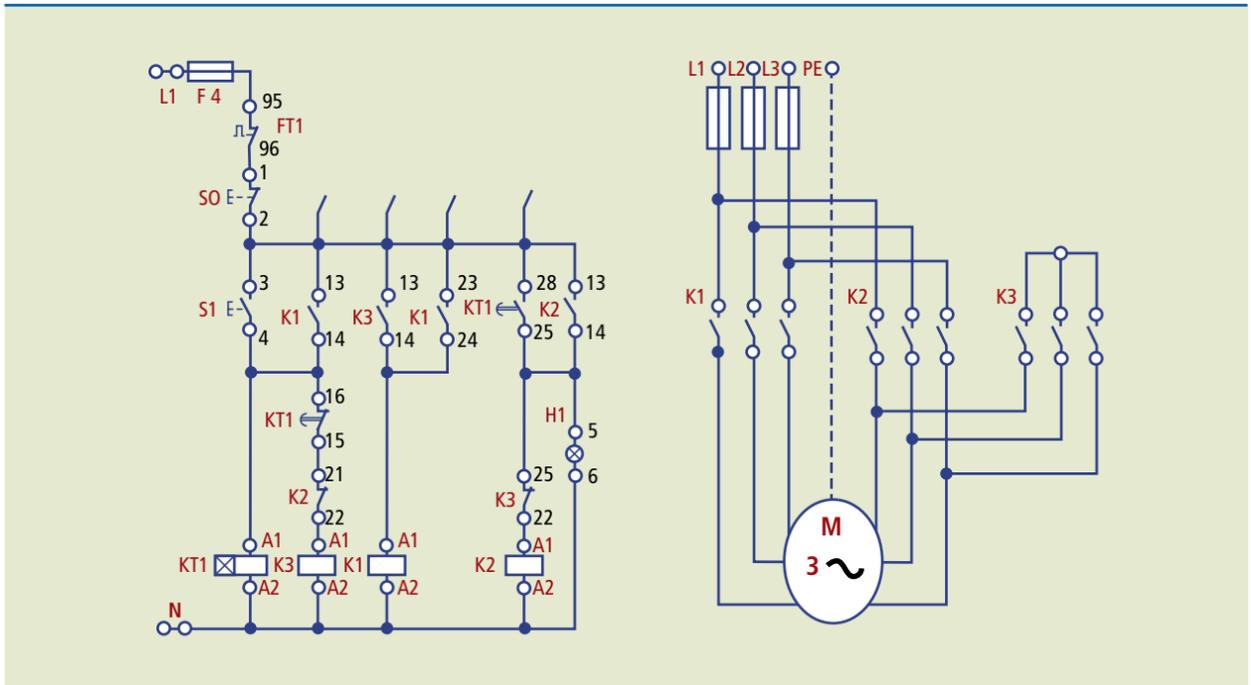
Na figura 2.43, são apresentados os diagramas de comando (ou controle) e de potência da ligação estrela-triângulo. Pressionando o botão S1, as bobinas (A1-A2) do relé de tempo KT1 e do contator K3 são alimentadas. O contato de K3 (13-14) se fecha, alimentando a bobina (A1-A2) de K1. Fecham-se também o selo de K1 (23-24) e o selo de K3 (K1-13-14). Ao soltar o botão S1, o relé de tempo inicia a contagem do valor ajustado (10 s). Ao mesmo tempo, no diagrama de potência, os contatos K1 e K3 (NA) são fechados, e o motor parte em estrela.

Passados os 10 s, o relé de tempo KT1 (15-16) se abre, desligando o contator K3, abrindo K3 (13-14) e fechando K3 (21-22). Passados mais 30 a 100 ms, o relé KT1 fecha KT1 (25-28), acionando K2 (A1-A2) e seu selo K2 (13-14). No diagrama de potência, abre K3 e fecha K2: o motor passa para a conexão triângulo. Acionando o botão S0 (NF), são desligadas as bobinas de K1 e K2 e o motor é

Figura 2.43

Diagrama de controle e de potência da partida estrela-triângulo.

desligado. Note que os contatos K2 (21-22) e K3 (21-22) formam um intertravamento de contatos para evitar curto-circuito (caso sejam ligados simultaneamente K2 e K3).



Dimensionamento dos dispositivos para acionamento em partida tipo estrela-triângulo

Exemplo

Dimensionar o comando de partida estrela-triângulo de um motor trifásico tipo gaiola de esquilho 100 cv, 2 polos, 380 V/660 V – 60 Hz, Tp = 10 s, com comando em 220 V.

Solução:

- Na tabela 2.11, vê-se que o motor WEG – IP55, de 100 cv e carcaça tipo 250 S/M, atende a essas especificações. Outro dado disponível na tabela 2.11 é o valor da corrente nominal (In):

$$I_n = 232 \text{ A para } 220 \text{ V}$$

$$I_n(380 \text{ V}) = \frac{I_n(220 \text{ V})}{\sqrt{3}} \cong 134 \text{ A}$$

Da tabela 2.11: $I_p/I_n = 9,3$, em que I_p é a corrente de partida do motor. Substituindo:

$$I_p = 9,3 \cdot I_n(380 \text{ V}) = 9,3 \cdot 134 \cong 1246 \text{ A}$$

Potência		Carcaça	RPM	Corrente nominal em 220 V (A)	Corrente com rotor bloqueado I_p/I_n
cv	kW				
2 polos – 60 Hz					
0,16	0,12	63	3380	0,77	5,3
0,25	0,18	63	3380	1,02	4,7
0,33	0,25	63	3390	1,34	5,0
0,50	0,37	63	3380	1,71	5,5
0,75	0,55	71	3430	2,39	6,2
1,0	0,75	71	3450	3,18	7,1
1,5	1,1	80	3420	4,38	7,0
2,0	1,5	80	3400	5,49	6,6
3,0	2,2	90S	3465	8,43	7,0
4,0	3,0	90L	3460	10,9	7,5
5,0	3,7	100L	3485	13,1	8,0
6,0	4,5	112M	3480	16,1	7,1
7,5	5,5	112M	3500	19,2	8,0
10	7,5	132S	3510	25,7	7,0
12,5	9,2	132M	3510	31,0	8,6
15	11	132M	3525	36,2	8,5
20	15	160M	3540	50,3	7,5
25	18,5	160M	3525	61,0	8,0
30	22	160L	3530	72,1	8,0
40	30	200M	3560	98,3	7,8
50	37	200L	3560	121	7,6
60	45	225S/M	3560	143	7,5
75	55	225S/M	3555	173	8,1
100	75	250S/M	3560	232	9,3

- Para dimensionar os contadores, é preciso observar que K1 e K2 acionam o motor em triângulo e que K3 é usado na ligação em estrela (figura 2.44).

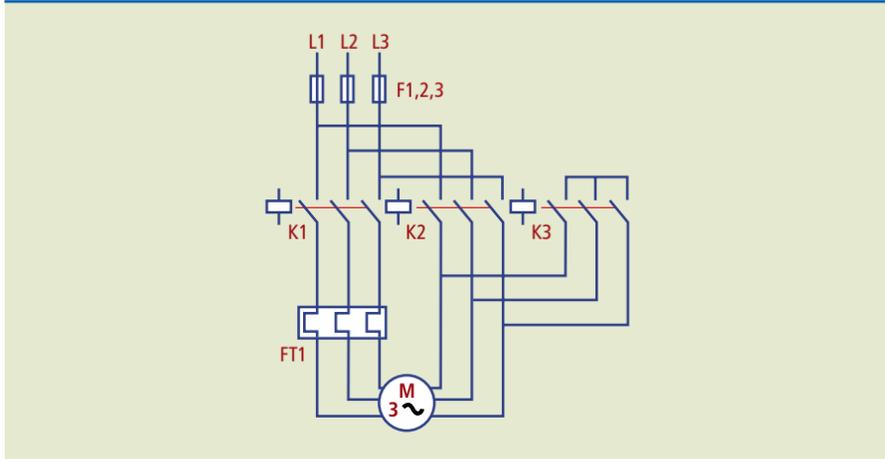


Figura 2.44

Esquema de ligação estrela-triângulo.

Tabela 2.11

Fonte: WEG BRASIL.

Sabendo que a corrente de linha (I_L) é igual à corrente nominal do motor (I_n) e que a corrente em Δ é:

$$I_v = \frac{I_L}{\sqrt{3}}, \text{ e considerando } I_{\Delta} \text{ para os contatores K1 e K2, então:}$$

$$I_e \geq I_n / \sqrt{3} \rightarrow I_e \geq 134 / \sqrt{3} \text{ ou } I_e \geq 77 \text{ A.}$$

Assim, pode ser escolhido o modelo CWM80 para os contatores K1 e K2. O contator K3 será usado na ligação estrela e, nesse caso, a corrente em estrela será:

$$I_Y = I_n / 3 = 134 / 3 \cong 45 \text{ A}$$

Dessa forma, $I_e \geq 45 \text{ A}$.

Portanto, escolhe-se, no catálogo, o contator CWM50 para K3.

- Quanto ao relé de sobrecarga, deverá suportar a mesma corrente que o contator K1: $I_e \geq 77 \text{ A}$. Assim, escolhe-se o relé RW67.2D(63...80).
- Os fusíveis (F1, F2 e F3) usados devem suportar uma corrente 20% maior que a nominal do motor em triângulo (I_{Δ}), ou seja:

$$I_F \geq 1,2 I_{\Delta} \rightarrow I_F = 1,2 \cdot 77 \rightarrow I_F \geq 92,4 \text{ A}$$

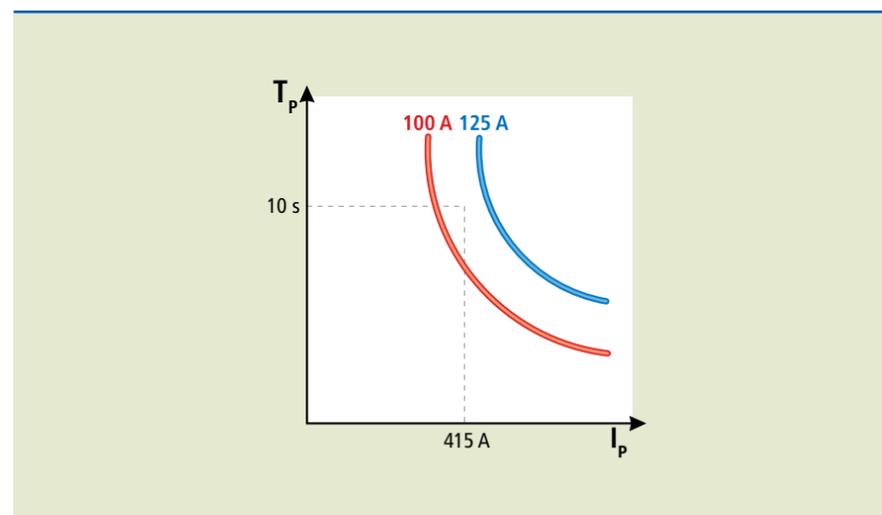
Também devem suportar a corrente de pico na partida. Mas, na partida estrela-triângulo, o pico é $1/3$ da corrente de pico nominal:

$$I_p = 1246 / 3 = 415 \text{ A}$$

Então, os fusíveis devem suportar 415 A durante $T_p = 10 \text{ s}$. Na figura 2.45, curva do fusível NH, entramos com os valores 10 s e 415 A.

Figura 2.45

Curva do fusível NH.



Selecionando a corrente cuja curva está à direita de 92,4 A ($I_F = 125 \text{ A}$), temos o fusível F00NH125. Para a base do fusível, é usada B00NH.

- Quanto ao relé de tempo, utilizando o catálogo da WEG, escolhe-se o modelo RTW.03.220.YD.

É importante observar que a utilização desse tipo de chave estrela-triângulo pode ser melhorada com o emprego de dispositivos mais modernos, tais como os disjuntores, que possuem a proteção eletromagnética contra curto-circuito e a proteção térmica do relé bimetálico no mesmo dispositivo, simplificando a montagem.

2.9.3 Partida por meio de chave compensadora

A chave compensadora é composta, basicamente, de um autotransformador com várias derivações, destinadas a regular o processo de partida. Esse tipo de partida costuma ser empregado em motores de potência elevada, para acionar cargas com alto índice de atrito, por exemplo, britadores, máquinas acionadas por correias transportadoras e calandras. As desvantagens que essa chave apresenta são:

- custo superior ao da chave estrela-triângulo;
- dimensões normalmente superiores às chaves estrela-triângulo.

A figura 2.46 representa de modo esquemático uma chave compensadora construída a partir de três autotransformadores monofásicos.

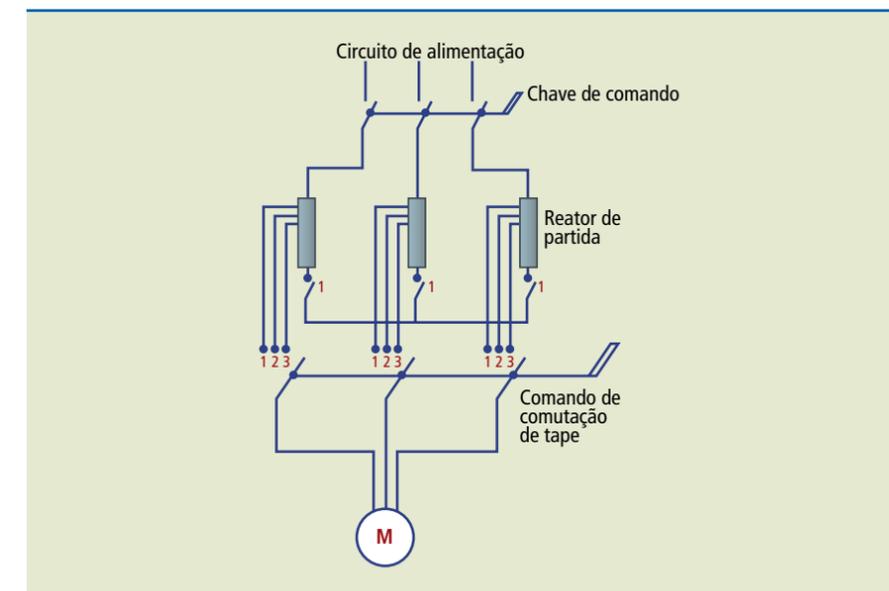


Figura 2.46

Ligação da chave compensadora.

2.9.4 Outros tipos de ligações ou partidas

Podem ocorrer outros tipos de ligações, ou de partidas, que são a seguir descritos.

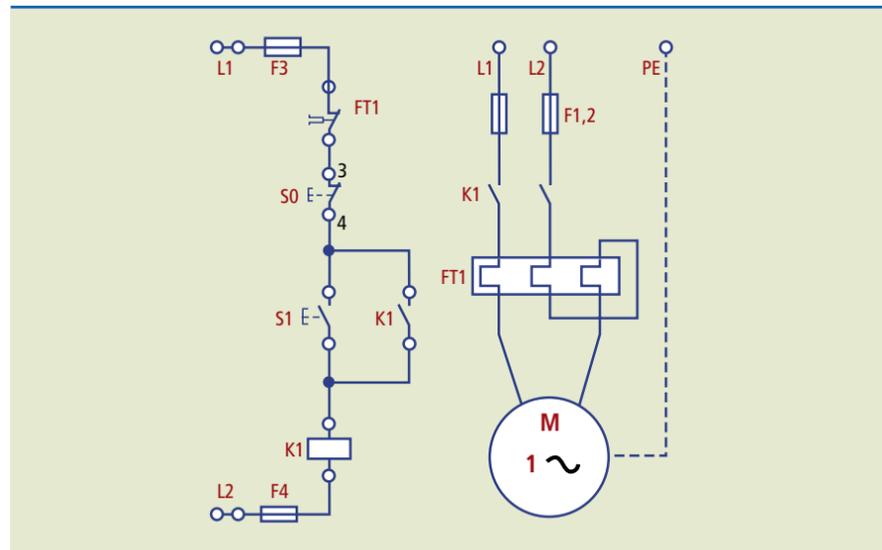
a) Partida de motor monofásico usando contator (figura 2.47).

Observa-se que, pelo fato de o motor ser ligado a duas fases, uma das fases é passada por dois contatos do relé térmico (para usar os três contatos desse relé).

Outro detalhe é o fato de que, como o contator está ligado entre as duas fases, são usados dois fusíveis para o controle. A parte de comando é igual à da partida direta do motor trifásico.

Figura 2.47

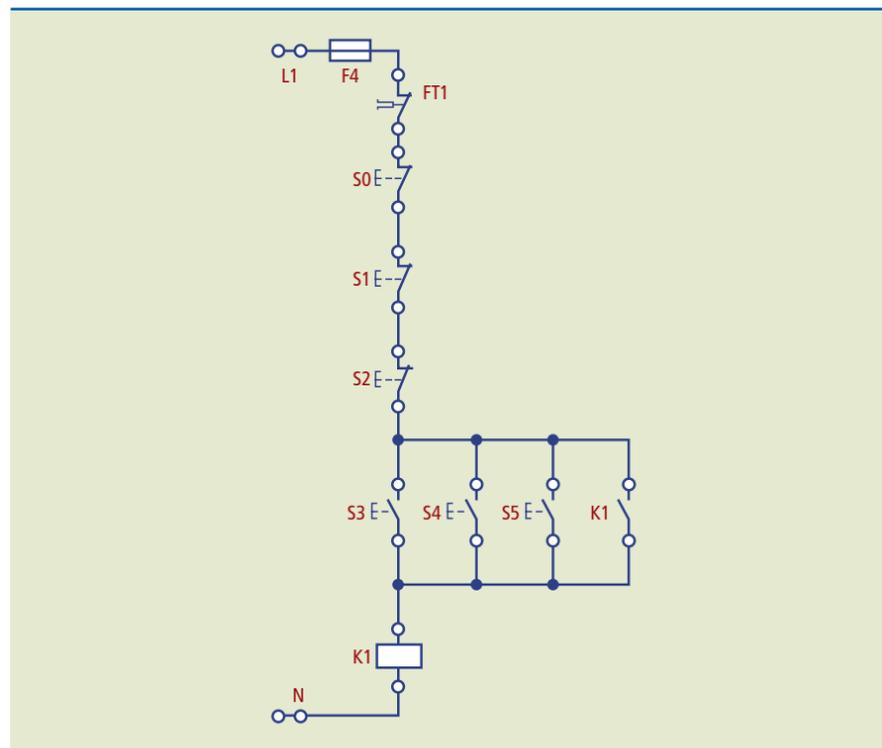
Diagrama de controle e potência da partida de motor monofásico usando contator.



b) Acionamento de motor de vários pontos (figura 2.48).

Figura 2.48

Diagrama de controle para acionamento do motor de vários pontos.



No diagrama da figura 2.48 foi mostrada a parte de controle. O diagrama da parte de potência é igual ao da partida direta de motor. As chaves em paralelo (S3, S4 e S5) ligam o motor de três pontos diferentes (basta levar um par de fios

até cada chave). As chaves em série (NF) desligam o motor de três pontos diferentes. O contato K1 em paralelo com as chaves é o selo que mantém a ligação após o toque no botão pulsador.

c) Acionamento de motor com proteção contra falta de fase (figura 2.49).

No diagrama de potência, vemos o dispositivo KFF, que protege o motor contra falta de fase.

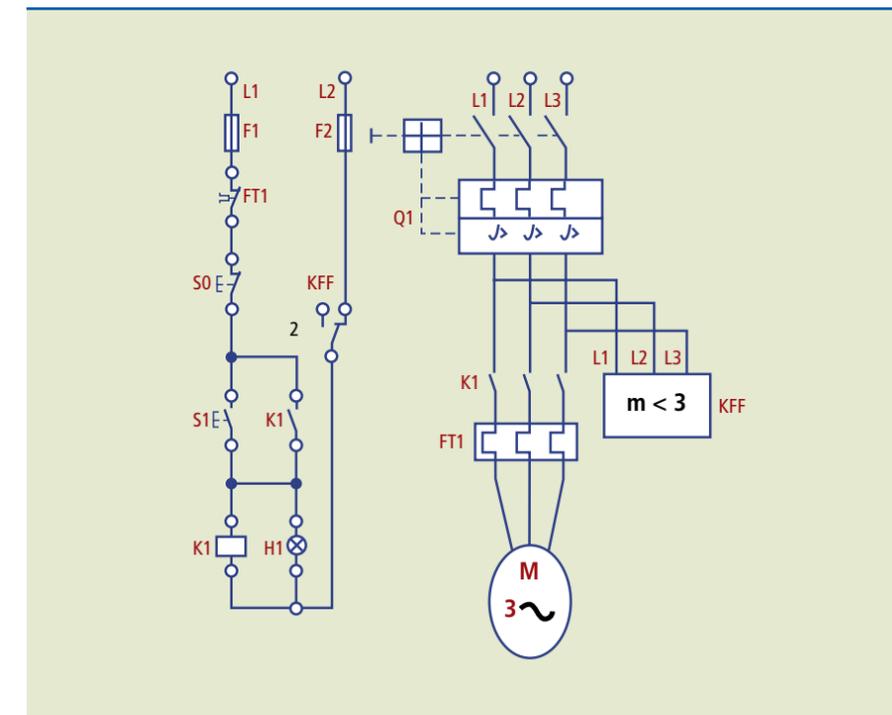


Figura 2.49

Diagramas para acionamento contra falta de fase.

Se ocorrer a falta de fase, o contato NF de KFF, no diagrama de controle, se abrirá e desligará todo o circuito. No diagrama de potência há também o disjuntor Q1 termomagnético para proteção da instalação contra curto-circuito e sobrecarga.

d) Acionamento de motor com proteção contra sequência de fase invertida.

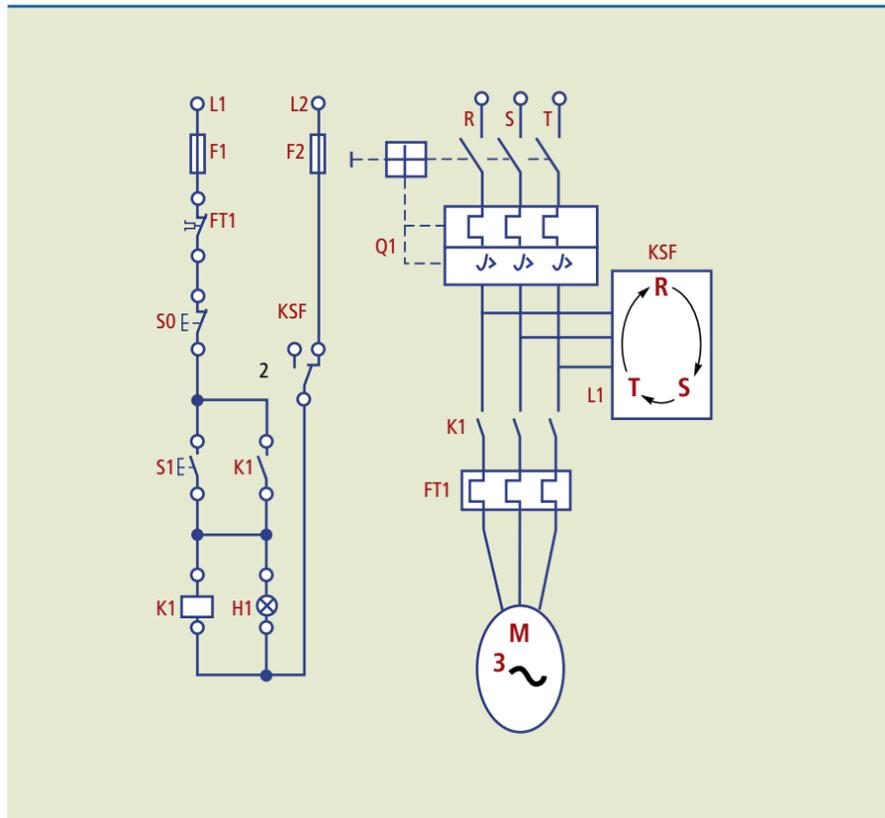
A figura 2.50 mostra, no diagrama de potência, o dispositivo KSF, que protege o motor contra sequência de fase invertida.

Se, ao acionar o motor, ocorre a inversão de fase, o contato de KSF no circuito de controle se abre, desativando todo o circuito e protegendo o motor. Se as fases estiverem na sequência correta, ao acionar o botão S1, o motor liga e a lâmpada H1 fica acesa. O botão S0 desliga o circuito.

Convém ainda lembrar que os motores trifásicos podem ser acionados em ligações diferentes, dependendo do número de terminais. A seguir são mostrados os principais tipos de ligações para funcionamento de motores em mais de uma tensão, ou seja, em redes elétricas com mais de uma tensão.

Figura 2.50

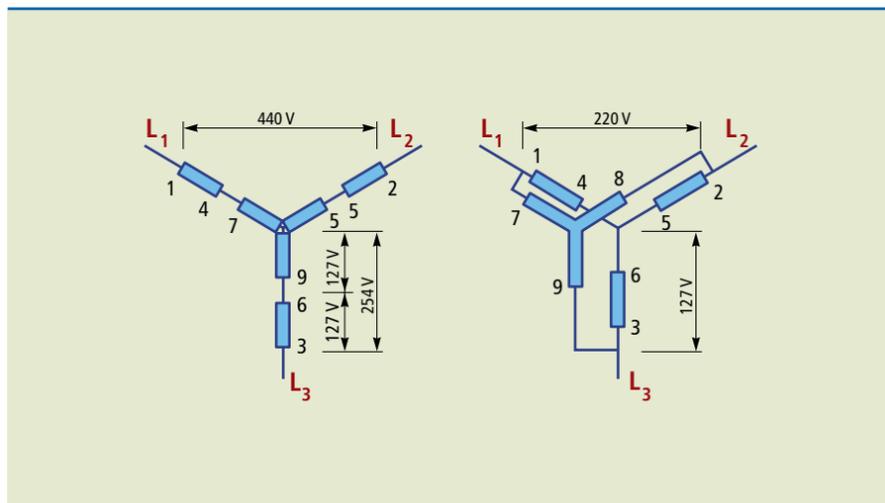
Diagramas para acionamento de motor com proteção contra sequência de fase invertida.



e) Ligação série-paralela estrela (figura 2.51): o enrolamento de cada fase é dividido em duas partes. Ligando as duas metades em série, cada bobina ficará com a metade da tensão de fase nominal do motor. Se as duas metades estiverem ligadas em paralelo, é possível alimentar o motor com metade da tensão.

Figura 2.51

Conexão das bobinas do motor na ligação série-paralela estrela.



f) Ligação série-paralela triângulo: o motor precisa ter nove terminais, e a tensão nominal mais comum é 220/440 V. A figura 2.52 mostra como conectar os terminais do motor nesse caso.

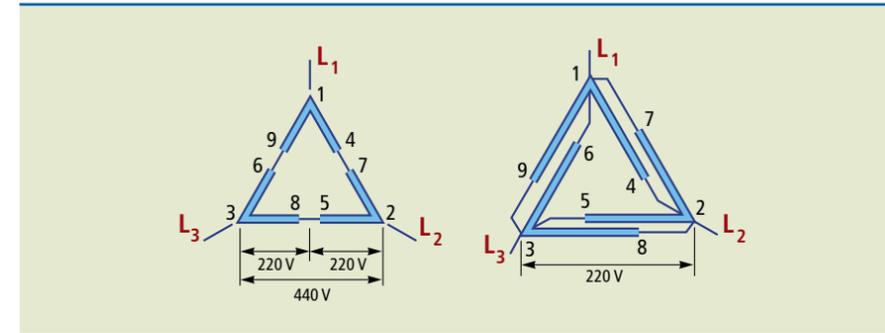


Figura 2.52

Conexões na ligação série-paralela triângulo.

g) Tripla tensão nominal (figura 2.53): combina os casos anteriores.

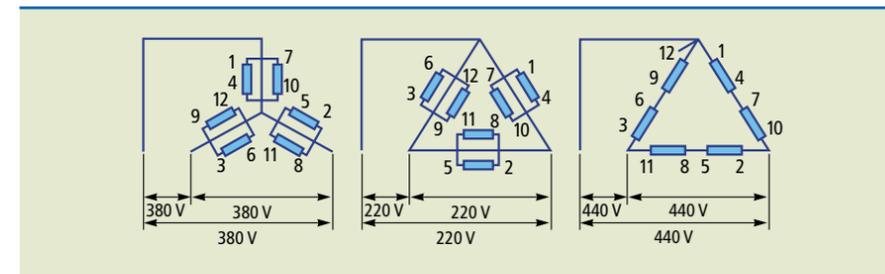


Figura 2.53

Conexões nas ligações para tripla tensão nominal.

Assim, há quatro combinações de tensão nominal:

- 1) ligação triângulo paralelo;
- 2) ligação estrela paralela, sendo igual a $\sqrt{3}$ vezes a primeira;
- 3) ligação triângulo série, valendo o dobro da primeira;
- 4) ligação estrela série, valendo $\sqrt{3}$ vezes a terceira. Essa tensão seria maior que 600 V. Assim, é indicada apenas como referência de ligação estrela-triângulo. Exemplo: 220/380/440(760) V.

2.9.5 Comandos de partida e reversão de giro

A reversão de giro em motores trifásicos é usada quando há a necessidade de inverter o sentido de rotação do eixo do motor, por exemplo, em uma esteira ou em uma escada rolante.

Partida direta com reversão de giro utilizando contatores

A inversão de giro com contatores utiliza outros elementos, como botões e chaves de fim de curso. Para reverter o giro de um motor trifásico, basta trocar duas de suas fases de alimentação entre si. Para fazer isso automaticamente são necessários dois contatores, cada um acionado por um botão e duas chaves de fim de curso. Essas chaves podem ser acionadas de modo mecânico por lâminas (figura 2.54), podem ser eletromagnéticas ou, ainda, podem ser usados sensores eletrônicos.

Figura 2.54

Chave tipo fim de curso acionadas mecanicamente.



Essas chaves são usadas em controle:

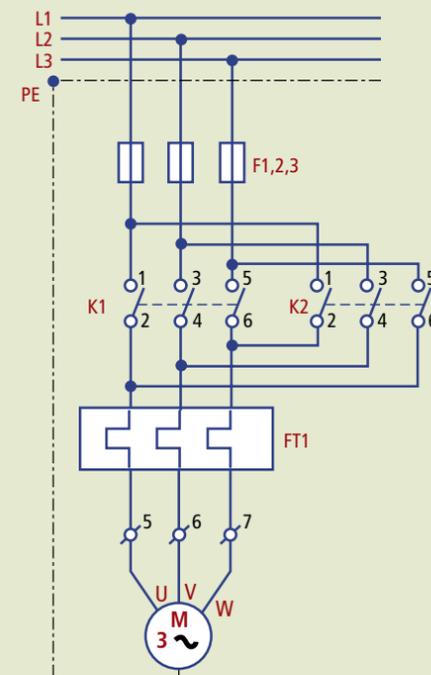
- quando se deseja parar o motor em determinado ponto;
- quando se necessita fazer a inversão do sentido de rotação;
- para segurança (paradas de emergência, ao atingir o limite de uma peça, alarme etc.).

Nas chaves de fim de curso eletromagnéticas, a variação do campo magnético em uma bobina aciona os contatos da chave.

Na figura 2.55 é apresentado o diagrama de potência para a reversão de giro de um motor trifásico usando contadores.

Figura 2.55

Diagrama de potência para reversão de giro de motor trifásico.



Como se vê no diagrama, se, ao acionar o contator K1, o motor gira em um sentido de rotação, então, ao ser acionado o contator K2, o eixo desse motor deve girar no sentido contrário. O importante, nesse caso, é que se deve evitar que sejam acionados os dois contadores simultaneamente, pois isso causaria um curto-circuito entre duas fases da rede elétrica.

No diagrama da figura 2.56, é mostrada a parte de controle para a reversão de giro do motor na partida direta.

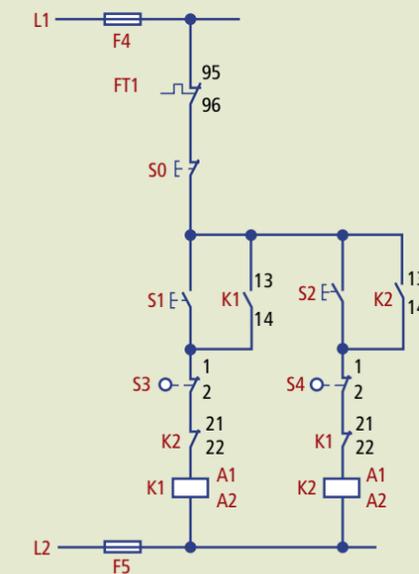
**Figura 2.56**

Diagrama de controle para a reversão de giro de motor trifásico.

Ao ser acionado o botão S1, a bobina do contator K1 (A1-A2) é energizada e seu contato NF (21-22) se abre, evitando que o contator K2 seja acionado (os contatos 21-22 são usados para o intertravamento de contadores, permitindo que apenas um dos contadores, K1 ou K2, seja ligado). Em seguida (em questão de 100 ms), os contatos principais de K1 (1, 2, 3, 4, 5, 6) se fecham, acionando o motor, que vai girar seu eixo no sentido horário, e fecha-se também o contato NA de K1 (13-14), mantendo o contator K1 “selado” (acionado).

Ao ser acionado o botão S0, a passagem de corrente elétrica é interrompida, K1 é desligado e o motor para. Ao acionar o botão S2, o contator K2 (1, 2, 3, 4, 5, 6) aciona o motor no sentido anti-horário, invertendo duas de suas fases.

É importante perceber que, ao acionar a chave de fim de curso S3, o contator K1 é desligado e o motor para. Nesse caso, deve ser acionado o botão S2 para ligar o motor no sentido contrário ao que estava girando. Ao ser acionada a chave S4, o contator K2 é desligado e o motor para novamente até ser acionado o botão S1.

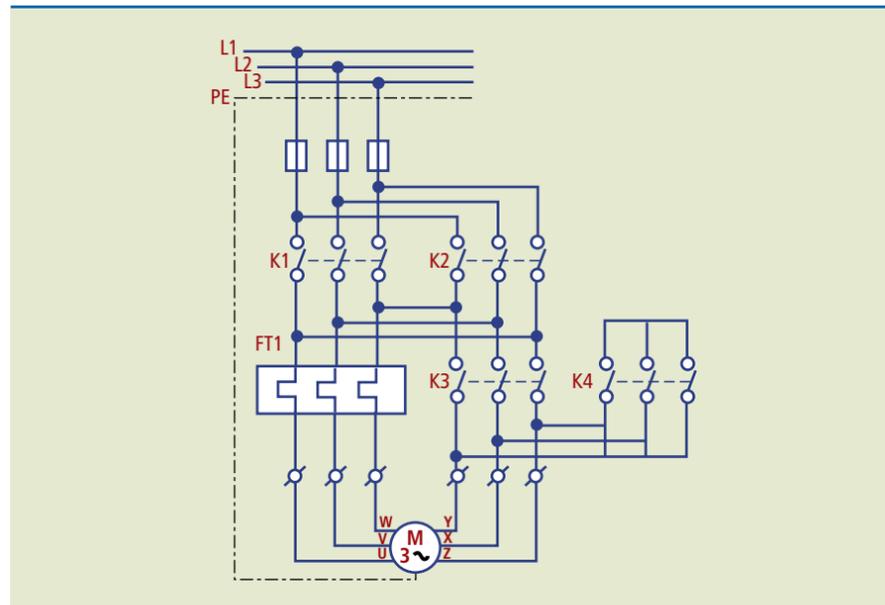
Partida estrela-triângulo com reversão de giro utilizando contatores

A partida estrela-triângulo é usada para motores de maior potência. Nesse caso, são precisos quatro contatores (dois para a reversão de giro e mais dois para a ligação estrela-triângulo) e um relé de tempo (que conta o tempo da passagem de estrela para triângulo).

Na figura 2.57, é mostrado o diagrama de potência da partida estrela-triângulo com reversão de giro. Ao acionar os contatores K1 e K4, o motor parte em estrela (sentido horário, por exemplo). Após um tempo (ajustado no relé de tempo), K4 se abre e K3 se fecha. Assim, o motor passa para a ligação triângulo. Acionando inicialmente K2 e K4, o motor parte em estrela no sentido inverso (anti-horário). Após certo tempo, K4 se abre e K3 se fecha. Novamente o motor passa para a ligação triângulo.

Figura 2.57

Diagrama de potência da partida estrela-triângulo com reversão de giro.



Para controlar o acionamento do motor nesse caso, é usado o diagrama da figura 2.58. Ao pressionar o botão S1, as bobinas do relé de tempo KT1 e do contator K4 são energizadas. O contato NF de K4 se abre impedindo K3 de ser acionado. Em seguida, o contato NA de K4 se fecha energizando a bobina de K1, e outro contato aberto de K1 se fecha fazendo selo de K1. O motor parte em estrela no sentido horário, por exemplo.

Ao pressionar o botão S1 (botão do tipo pulsador ou sem trava) e após certo tempo (contado pelo relé de tempo KT1), o contato NF de KT1 se abre desligando K4. Logo em seguida, o contato NF de K4 (que estava aberto) se fecha acionando o contator K3. O motor passa para a ligação triângulo.

Ao pressionar o botão S0, todo o circuito se desliga. Se S2 for pressionado, então os contatores K4 e K2 são ligados, e ocorre a partida estrela do motor em sentido anti-horário. Após algum tempo, o motor passa para a ligação triângulo.

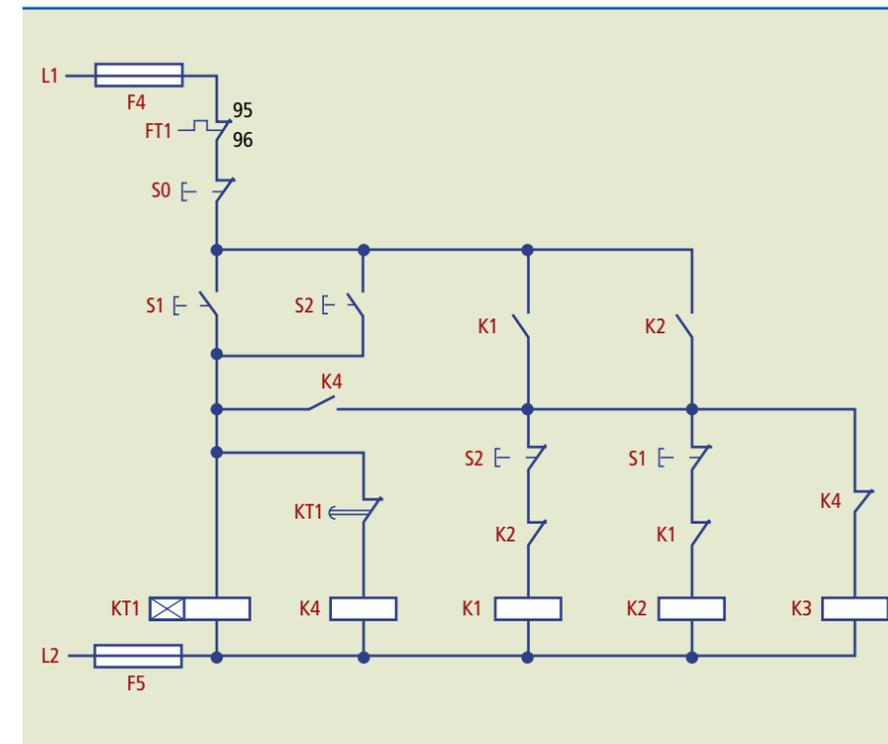


Figura 2.58

Comando para partida estrela-triângulo com reversão de giro.

Notar que K1 NF e K2 NF fazem um intertravamento de contatos, evitando que os contatores K1 e K2 liguem simultaneamente. Os contatos NF dos botões S1 e S2 fazem um intertravamento de botões pelo mesmo motivo.

É importante lembrar que na partida direta temos um alto pico de corrente no motor (sete a nove vezes o valor da corrente nominal). Na partida estrela-triângulo, o motor deve partir em vazio (sem carga no eixo). Ainda assim, há um grande pico de corrente no motor (1/3 do pico de corrente quando em partida direta). Problemas desse tipo podem ser resolvidos com o uso das chaves *soft-starters* ou inversores de frequência no controle do motor.

2.9.6 Uso da chave *soft-starter* para comando de partida e reversão

As chaves estáticas, conhecidas como *soft-starters*, são constituídas de um circuito eletrônico acoplado a um microprocessador, que controla um conjunto de tiristores responsáveis pelo ajuste da tensão aplicada aos terminais do motor. Por meio de ajustes, pode-se controlar o torque do motor e a corrente de partida com os valores desejados, em função da exigência da carga.

Como visto anteriormente, as partidas realizadas por contatores e relés (ou a combinação deles) tendem a danificar os motores por picos de correntes na partida e a provocar vibrações no motor e na carga. Tais problemas geram desgaste, vibração, aquecimento do motor e impacto na rede elétrica. Além dos problemas de partida em si, muitos processos na indústria trabalham com variação de velocidade do motor como os que se encontram na tabela 2.12.

Tabela 2.12

Varição de velocidade em alguns tipos de acionamento.

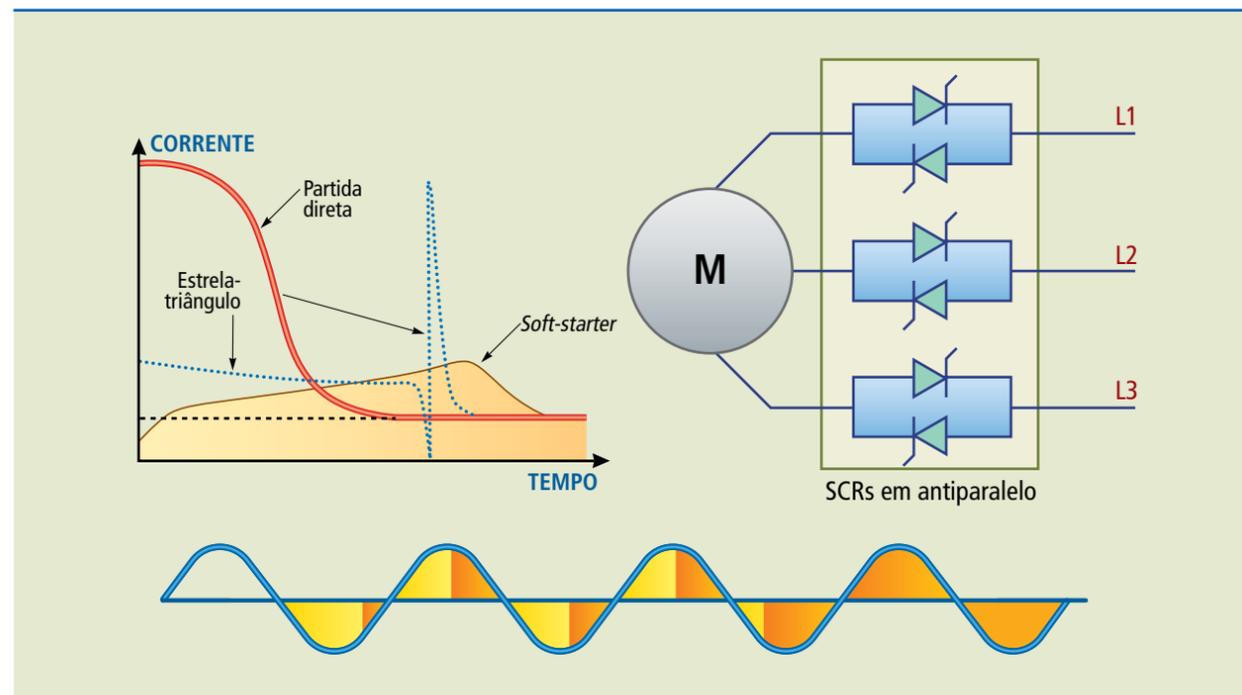
Tipos de acionamento	Motivo da variação de velocidade
Bombas	Varição de vazão de líquidos
Ventiladores	Varição de vazão de ar
Sistemas de transportes	Varição da velocidade de transporte
Tornos	Varição da velocidade de corte
Bobinadeiras	Compensação da variação de diâmetro da bobina

Até algum tempo atrás, essa variação de velocidade era realizada por motores de corrente contínua, ou ainda componentes mecânicos, hidráulicos e eletromagnéticos. O maior desenvolvimento de semicondutores de potência (SCRs, IGBTs etc.) e dos microprocessadores nas últimas décadas tornou viável a produção de sistemas de variação de velocidade eletrônicos. No método de partida estrela-triângulo, conseguimos uma redução na tensão, no torque e na corrente de partida, mas a partida é feita em degraus de tensão, o que causa muitos danos ao motor e à instalação elétrica. No *soft-starter*, a alimentação do motor é realizada por um aumento progressivo de tensão.

Figura 2.59

Comparativo de correntes, SCRs em antiparalelo e forma de onda da tensão fornecida a cada fase do motor.

Esse dispositivo cria uma “rampa” de tensão (ou uma curva) que leva a uma partida sem golpes e sem picos de corrente (figura 2.59). Esse controle da tensão é feito por um par de SCRs ligados em antiparalelo a cada fase de alimentação do motor. Controlando o ângulo de disparo dos SCRs, controla-se a parcela de tensão fornecida a cada fase do motor.



Na chave *soft-starter*, um circuito eletrônico microprocessado ajusta o ângulo de disparo dos SCRs controlando a tensão a ser enviada ao motor. À medida que a tensão no motor aumenta, a corrente também aumenta e o motor é acelerado de maneira suave, sem degraus e sem choques mecânicos para a carga. Na figura 2.60, é mostrado o diagrama de blocos de um *soft-starter* da série SSW-04 da WEG. Essa série possui modelos de 16 A a 85 A que podem ser alimentados em redes trifásicas de 220 V, 230 V, 240 V, 380 V, 400 V, 415 V, 440 V, 460 V, 480 V ou 575 V. Os modelos de corrente de 16 A, 30 A e 45 A têm ventilação natural, enquanto os de 60 A e 85 A possuem ventilação forçada.

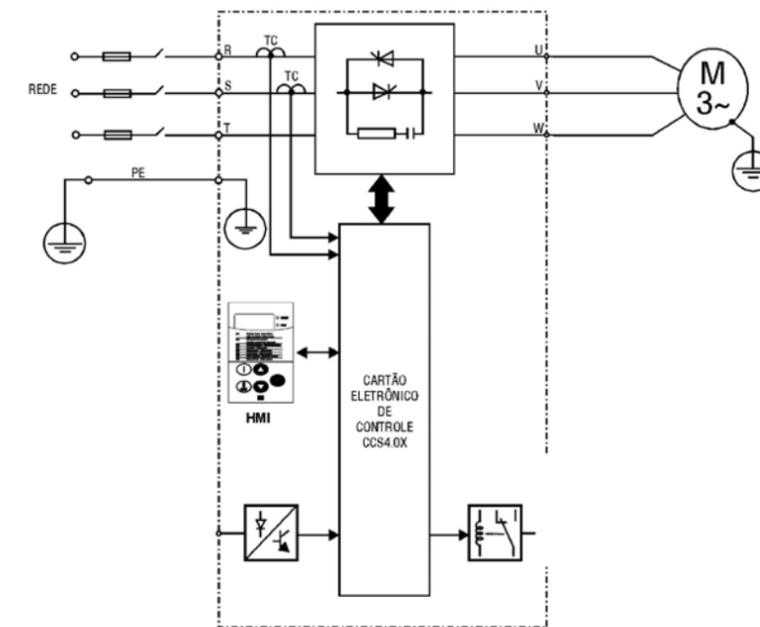
**Figura 2.60**

Diagrama de blocos simplificado do *soft-starter*, linha SSW-04 da WEG.

Para a alimentação do controle eletrônico interno, usa-se uma fonte chaveada. O cartão de controle monitora a corrente e controla o circuito. É dotado também de um circuito de comando e sinalização como relés de saída. Os parâmetros do dispositivo podem ser visualizados ou alterados em uma interface homem-máquina (IHM). A corrente da alimentação é monitorada por transformadores de corrente (TCs). Saídas a relé controlam dispositivos externos auxiliares, como contadores e lâmpadas.

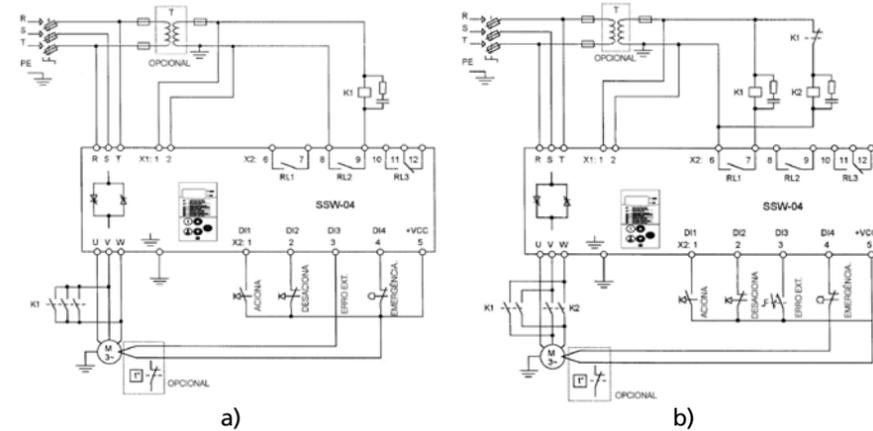
Para proteger a instalação, é necessário o uso de fusíveis ou disjuntores no circuito de entrada, e para a proteção dos SCRs recomenda-se que esses fusíveis sejam do tipo ultrarrápido.

Há ainda entradas digitais nas quais podem ser ligados botões de partida, de parada, de emergência, ou ainda sensores de temperatura conectados ao motor. Na parte de potência, a chave possui *snubbers* (circuitos R/C) para a proteção dos SCRs contra rápidas variações de tensão e disparos acidentais.

Na figura 2.61, são mostrados os modos de ligação do *soft-starter* a um motor para partida direta e com reversão de giro.

Figura 2.61

Ligação direta do motor (a) e com reversão de giro (b) usando *soft-starter* SSW-04 da WEG.



Em ambas as ligações, o transformador T é utilizado apenas se houver diferença entre a tensão de alimentação do motor e da eletrônica interna do aparelho e dos ventiladores. O uso do termostato (termopar) é recomendado para a proteção do motor. Caso ele não seja utilizado, deve-se ligar a entrada de erro DI3 ao Vcc da fonte.

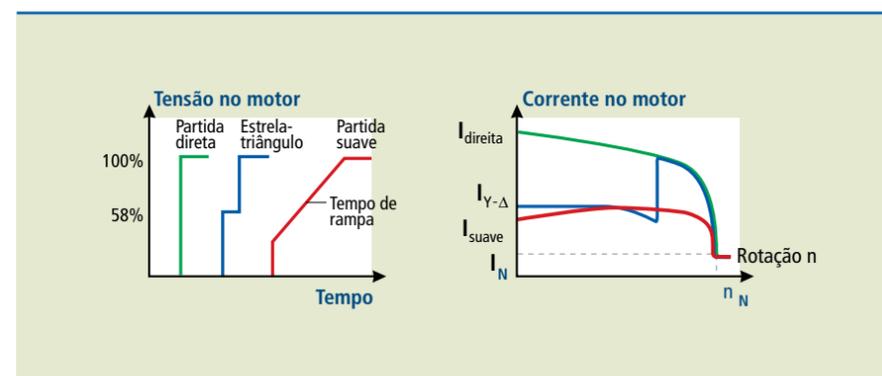
Para que a proteção térmica do motor atue durante o *by-pass* do contator K1 (figura 2.61a), é necessário que se coloquem os TCs de medição de corrente após os contatos principais de K1. Na figura 2.61b, os contatos principais de K1 e K2 auxiliam o *soft-starter* na reversão de giro do motor. Nota-se que o contato NF de K1 funciona como intertravamento para impedir curto-circuito entre as fases.

Também é recomendado um contator na entrada do *soft-starter*, caso se queira proteger o motor contra falta de fase por causa de danos no circuito de potência do SSW-04. Também não se deve esquecer a parametrização por *software* do SSW-04 antes de seu acionamento em cada caso.

Na figura 2.62, é mostrada a comparação entre a partida direta, a estrela-triângulo e a partida suave.

Figura 2.62

Tensão e corrente no motor para cada tipo de partida.



Entre as vantagens no uso do dispositivo *soft-starter* podem ser destacadas sua longa vida útil (sem peças eletromecânicas), o torque de partida próximo ao nominal e a possibilidade de ser utilizado na desaceleração do motor.

As desvantagens e cuidados ao usar esse tipo de chave são:

- por causa do aquecimento nos SCRs, por efeito Joule, é preciso colocar ventilação forçada. O emprego de contator de *by-pass* também auxilia;
- os SCRs são sensíveis a surtos de tensão;
- o dispositivo sofre interferência eletromagnética dos equipamentos próximos;
- o dispositivo produz harmônicas sujando a rede elétrica, o que pode exigir o emprego de filtros;
- fusíveis ultrarrápidos e contadores auxiliares devem ser utilizados;
- o dispositivo possui pouca resistência a curto-circuito da carga;
- o custo de uso desses dispositivos é maior no caso de pequenos motores.

Um novo algoritmo criado em lógica Fuzzy para a tecnologia TCS (*torque control system*) foi desenvolvido para fazer com que o conjugado de aceleração (e o de desaceleração) do *soft-starter* seja linear. Com essa nova tecnologia TCS, podemos obter respostas mais rápidas e precisas para o controle do conjugado do motor.

2.9.7 Uso de inversores de frequência para comandos de partida e reversão

Até pouco tempo atrás, o controle da velocidade dos processos de manufatura de diversos tipos de indústria, como já mostrado na tabela 2.12, era conseguido com a utilização de motores de corrente contínua. As pesquisas na área da eletrônica de potência desenvolveram equipamentos, denominados inversores de frequência, que associados à microeletrônica permitem o uso de motores de indução em substituição aos motores de corrente contínua. Os motores de indução, quando comparados aos motores de corrente contínua, são de fácil manutenção e de custo bem mais reduzido. Com a equação 2.29 é possível realizar o cálculo da rotação de um motor trifásico de indução, em rpm.

$$n = \frac{120 \cdot f \cdot (1 - s)}{p} \quad (2.29)$$

em que:

- n = rotação do motor em rpm;
- f = frequência da rede elétrica;
- s = escorregamento do motor;
- p = número de polos do motor.

Pela equação 2.29, podemos fazer algumas considerações para identificar a melhor forma de alterar a velocidade do motor:

- mudar o número de polos não é vantajoso, pois o motor trifásico possui a carcaça muito maior que o normal, e a variação de velocidade é discreta, feita em degraus, o que causa solavancos na carga;
- a variação do escorregamento também não é interessante, pois gera perdas no rotor e causa pouca variação na velocidade;
- a variação da frequência aparece como a forma mais eficaz de alterar a velocidade do motor.

Como exemplos, são apresentados os cálculos da rotação n para um motor de $p = 4$ polos e escorregamento $s = 0,03$, com a respectiva variação da frequência f .

$$\text{Se } f = 60\text{Hz} \rightarrow n = \frac{120 \cdot 60 \cdot (1 - 0,03)}{4} = 1746 \text{ rpm}$$

$$\text{Se } f = 30\text{Hz} \rightarrow n = \frac{120 \cdot 30 \cdot (1 - 0,03)}{4} = 873 \text{ rpm}$$

$$\text{Se } f = 90\text{Hz} \rightarrow n = \frac{120 \cdot 90 \cdot (1 - 0,03)}{4} = 2619 \text{ rpm}$$

A conclusão dessa comparação é que o ideal é obter a variação de frequência da tensão aplicada ao estator do motor mantendo o torque (ou conjugado C) constante.

O conjugado do motor pode ser calculado pela equação 2.30:

$$C \cong \Phi_m \cdot I_2 = \frac{U}{f} \cdot I_2 \quad (2.30)$$

em que:

Φ_m = fluxo magnético;

I_2 = corrente no estator do motor;

U = tensão no estator.

Mas, para que o conjugado C seja constante, é preciso que a parcela $\frac{U}{f}$ também seja.

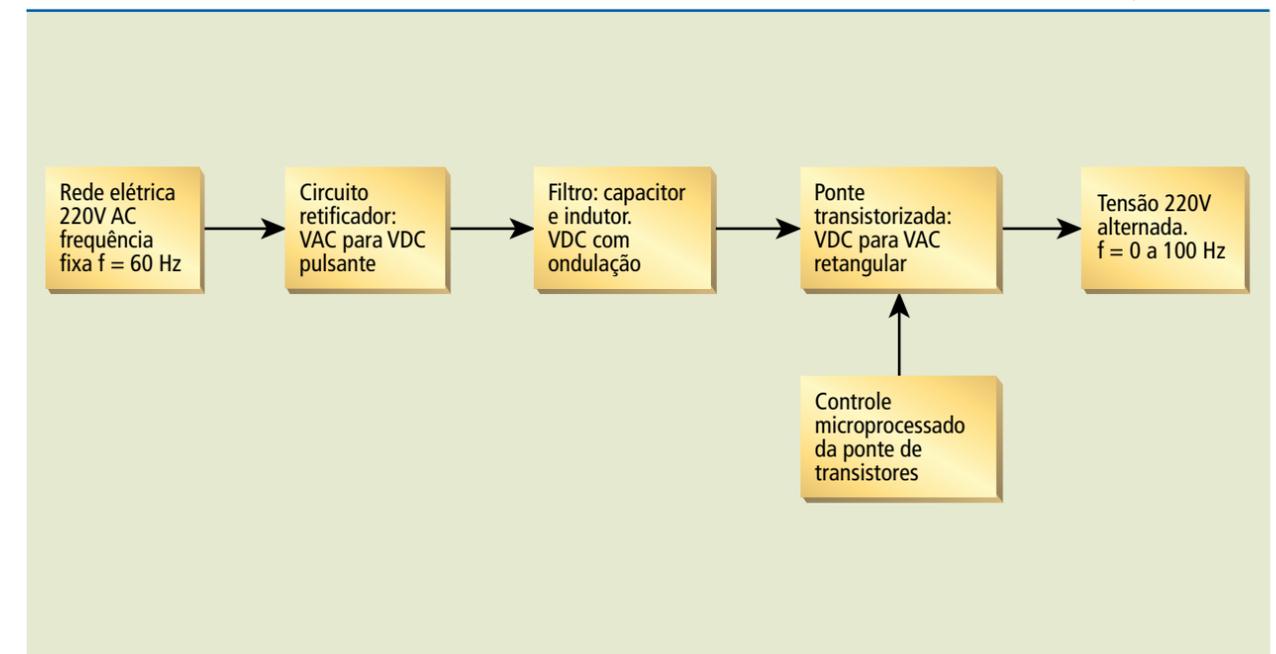
Funcionamento do inversor de frequência

O funcionamento do inversor de frequência pode ser melhor compreendido através das figuras 2.63 a 2.69. Na figura 2.63 vemos um diagrama de blocos que nos mostra de modo simplificado a sequência de operações e circuitos que fazem parte de um sistema inversor de frequência básico. Como se vê no exemplo da

figura 2.63 o inversor promove a variação da velocidade do eixo do um motor (trifásico, principalmente) gerando uma rede trifásica de frequência variável.

Figura 2.63

Princípio básico de funcionamento do inversor de frequência.



O conversor, formado por um circuito retificador, é ligado à rede trifásica com a função de transformar a tensão alternada em tensão contínua pulsada numa operação chamada retificação de onda completa. Um capacitor (filtro) é usado para limpar o sinal que se converte em tensão contínua pura. Através dos circuitos de comando formados por dispositivos semicondutores, o inversor transforma a tensão contínua novamente em tensão pulsada. A tensão de saída é escolhida de forma que a relação tensão/frequência seja constante.

Na figura 2.64, temos um circuito chamado ponte H com carga resistiva e o gráfico com suas formas de onda.

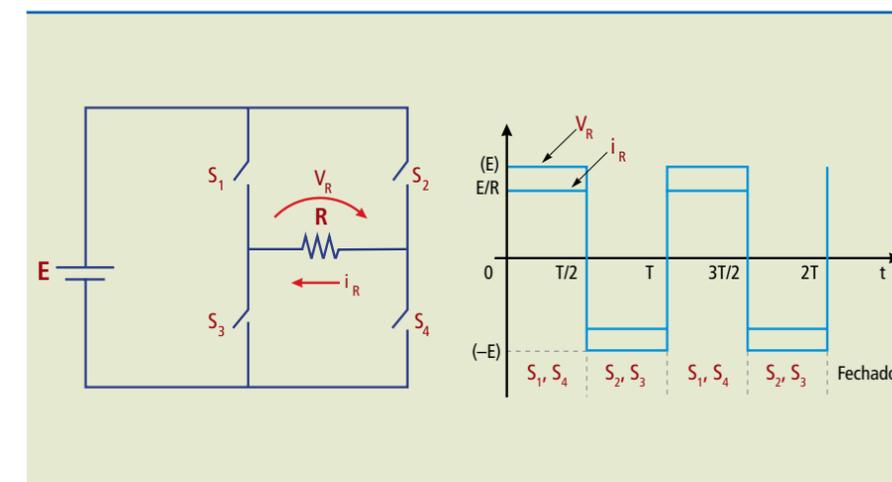


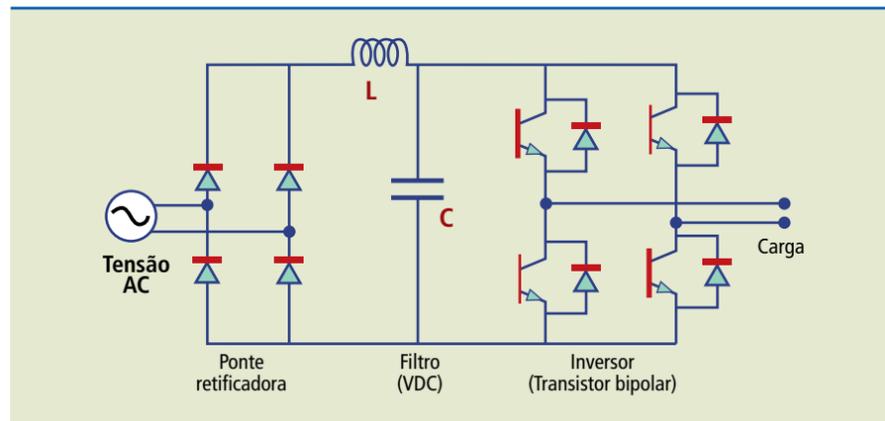
Figura 2.64

Ponte H e forma da tensão e da corrente no resistor (carga).

Fechando alternadamente as chaves S1/S4 e S2/S3, obtemos uma forma da tensão alternada a partir de tensão contínua. Para chegar a essa forma de onda, podem ser usados os princípios mostrados na figura 2.65: primeiro, a onda de tensão alternada da rede elétrica é retificada pela ponte de diodos e, a seguir, é filtrada pelo circuito L e C, tornando-a contínua. Depois, uma ponte de transistores é chaveada fornecendo à carga uma tensão alternada com a frequência usada no próprio chaveamento dos transistores.

Figura 2.65

Conversor de frequência usando ponte H transistorizada.



Na figura 2.66, é mostrada a mesma técnica aplicada a um circuito trifásico, sendo utilizada, nesse caso, uma ponte de IGBTs (*insulated gate bipolar transistors*). Na figura 2.67, pode ser vista uma ponte de IGBTs.

O controle dos IGBTs, feito por microprocessador, não está evidenciado na figura. Os diodos ligados reversamente, em “paralelo” aos IGBTs, atenuam a descarga de energia magnética armazenada pela carga indutiva (motor) no momento em que cada IGBT é desligado, protegendo-os. O uso de IGBTs leva a benefícios como menor ruído e menor aquecimento do motor. Também propicia melhor controle do chaveamento, redução no tamanho do inversor, entrada de alta impedância e redução do consumo de energia do inversor.

Figura 2.66

Inversor trifásico usando IGBT.

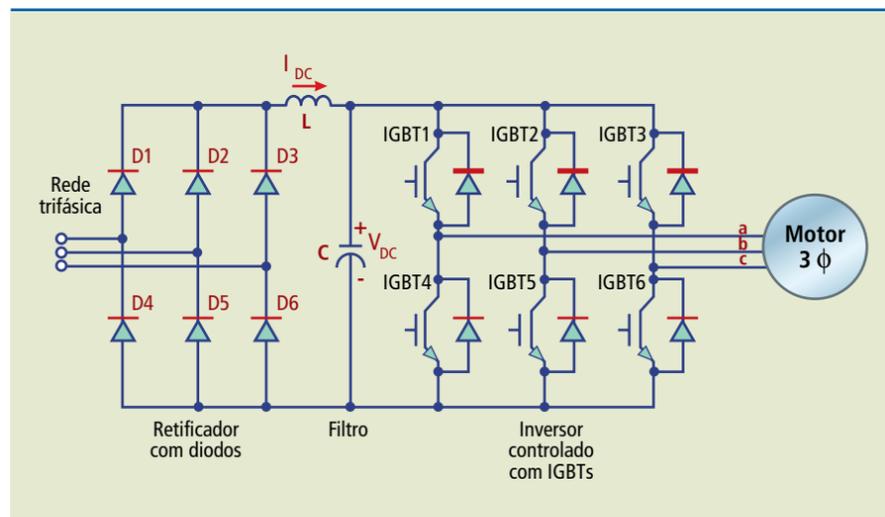


Figura 2.67

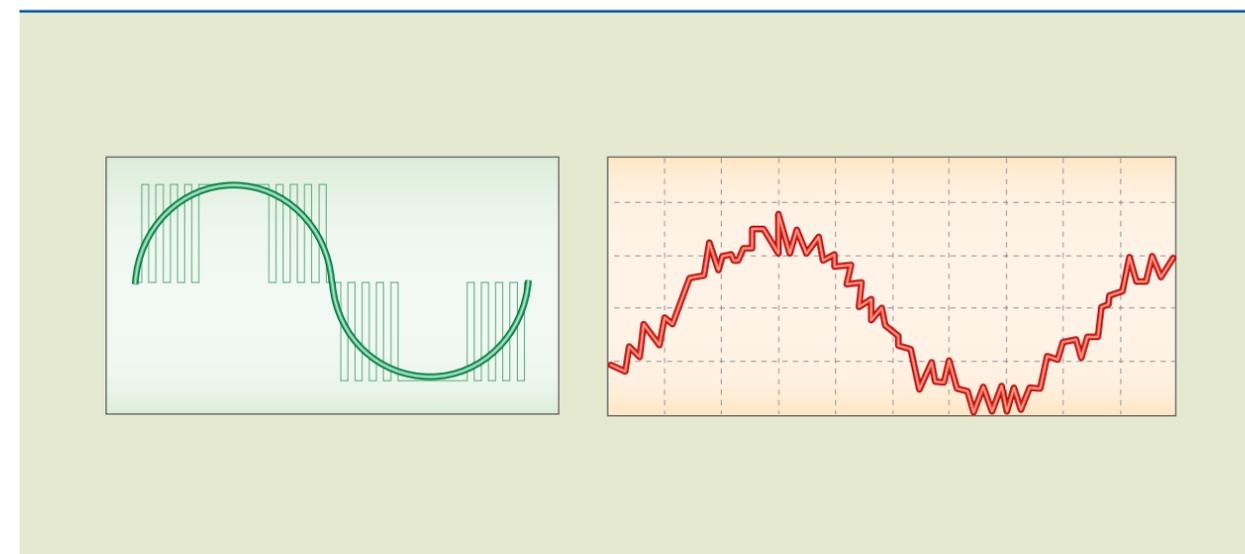
Ponte de IGBTs e diodos e símbolo de esquema elétrico do IGBT e diodo.

Os IGBTs reúnem as características de comutação dos transistores bipolares de potência e a elevada impedância de entrada dos transistores de efeito de campo metal-óxido-semicondutor (MOSFET, das iniciais de *metal oxide semiconductor field effect transistor*). São utilizados para a comutação de carga de alta corrente em regime de alta velocidade (1 200 V/400 A, com frequências de comutação superiores a 15 kHz).

Na etapa de potência, os IGBTs são chaveados com o uso de modulação PWM (*pulse width modulation*, ou modulação por largura de pulso) e reproduzem o equivalente à onda senoidal da rede elétrica com uma frequência diferente. Na figura 2.68, são mostradas as formas de onda da tensão senoidal (obtida por PWM) e da corrente (aproximada) no motor.

Figura 2.68

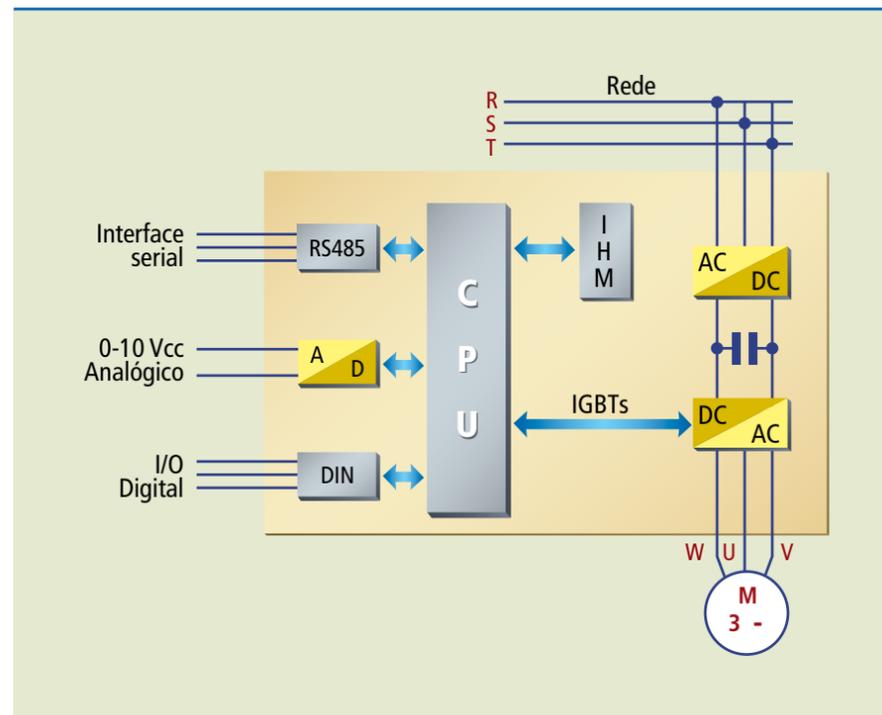
Formas de onda da tensão e da corrente no motor com o uso de inversor.



Na figura 2.69, é mostrado o diagrama de blocos do inversor de frequência.

Figura 2.69

Diagrama de blocos simplificado de um inversor:



Tipos básicos de inversores de frequência

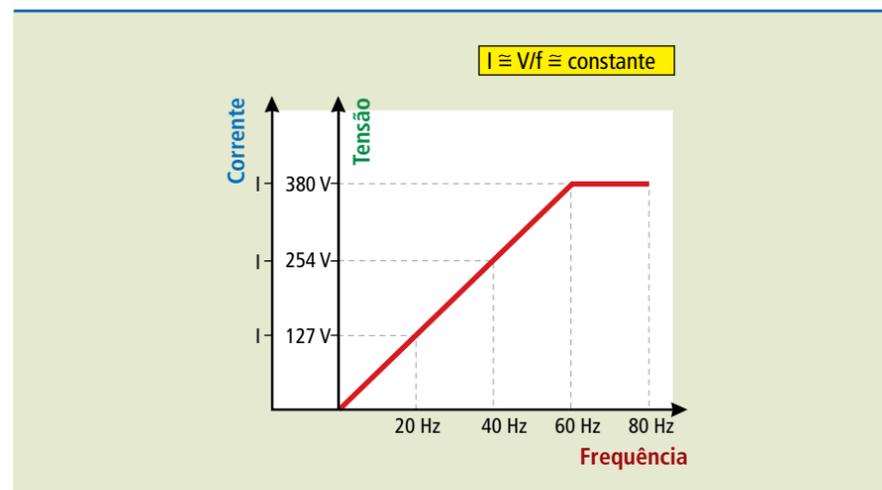
Há dois tipos básicos de inversores de frequência: escalar e de controle vetorial.

Inversor escalar

A tensão varia proporcionalmente com a frequência ($U/f = \text{constante}$) até a frequência nominal, por exemplo, 60 Hz. Acima de 60 Hz, como mostrado na figura 2.70, a tensão permanece constante, o que enfraquece a corrente, o fluxo e o torque do motor.

Figura 2.70

Tensão versus frequência em um inversor escalar:



A potência de saída desse tipo de conversor segue o mesmo gráfico de tensão *versus* frequência. A saída também apresenta distorções harmônicas, pois a tensão de saída não é perfeitamente senoidal, o que acrescenta harmônicas de ordem superior e aumenta as perdas no motor. Os inversores escalares são mais baratos e usados em aplicações que não requerem grandes acelerações, frenagens e controle de torque.

Inversor de controle vetorial

O inversor de controle vetorial é usado em aplicações que precisam de resposta rápida, alta precisão de regulação de velocidade e controle preciso do torque. Possui malha de controle que permite a monitoração da velocidade e do torque de modo independente. No inversor vetorial existe a facilidade de controle de um motor de corrente contínua aliada às vantagens de um motor de corrente alternada.

Figura 2.71

Inversores de frequência.



Os inversores de controle vetorial são fabricados em duas versões:

a) Inversores de frequência sem sensor (*sensorless*), nos quais a realimentação da velocidade é feita sem a utilização de um gerador de pulsos, conhecido como *encoder*. Esses inversores são mais simples, não apresentam regulação de conjugado e possuem desempenho inferior à operação com realimentação.

b) Inversores de frequência com realimentação controlada pelo campo magnético (*encoders*), nos quais é possível o controle da velocidade e do conjugado do motor tomando como referência a corrente do próprio motor.

A tabela 2.13 mostra dados comparativos dos dois tipos de inversores vetoriais.

Tabela 2.13

Comparativo de inversores vetoriais

Inversor com <i>encoder</i>	Inversor <i>sensorless</i>
Regulação de velocidade de 0,01%	Regulação de velocidade de 0,1%
Regulação de torque de 5%	Regulação de torque: não tem
Faixa de variação de velocidade de 1:1 000	Faixa de variação de velocidade de 1:1 000
Torque de partida: 400% no máximo	Torque de partida: 250% no máximo
Torque máximo: 400%	Torque máximo: 250%

As principais vantagens e desvantagens no uso dos inversores são descritas a seguir.

Principais vantagens:

- usam motores de indução comuns: mais baratos e de simples manutenção;
- possuem alta precisão de velocidade e geram movimentos suaves;
- podemos controlar o torque e a variação (larga) da velocidade do motor;
- possuem fator de potência $\cong 1$;
- possuem freio regenerativo;
- é mais barato o uso do inversor de maior potência aliado a um motor em lugar de um motor maior.

Principais desvantagens:

- causam distorção harmônica;
- causam ruídos na rede;
- a produção de harmônicas em grande quantidade pode aumentar as perdas e diminuir o rendimento.

Técnicas para a melhoria do uso de inversores

Com a finalidade de reduzir os efeitos negativos do uso dos inversores, é preciso conhecer suas características técnicas e instalar corretamente esse dispositivo.

Como foi citado, os inversores utilizam IGBTs para chavear uma tensão contínua e torná-la alternada. Esse chaveamento junto à carga indutiva, que é o motor, produz picos de tensão (figura 2.72).



Figura 2.72

Ruído produzido na rede elétrica pelo chaveamento dos IGBTs.

A seguir são listadas algumas recomendações para a correta utilização dos inversores de frequência:

- a fim de reduzir o efeito do ruído, fazer um bom aterramento, eliminando *loops* de terra e melhorando a disposição dos equipamentos no painel do inversor;
- escolher um inversor que venha equipado com toroides ou adicioná-los na saída do inversor e no cabo coaxial. Isso atenua os picos de tensão;
- colocar os cabos do inversor longe de equipamentos sensíveis a esses ruídos;
- utilizar frequência de chaveamento mais baixa. Isso reduz a corrente de fuga dos inversores;
- usar quatro condutores em cabos “shieldados” (blindados) colocados em eletrodutos metálicos. Os cabos de ligação ao inversor devem ter o menor comprimento possível, e o motor também deve ser mantido o mais próximo possível do inversor;
- empregar reator de linha de saída ajuda a reduzir a corrente de fuga dos inversores.

Quanto à melhoria da rede de entrada:

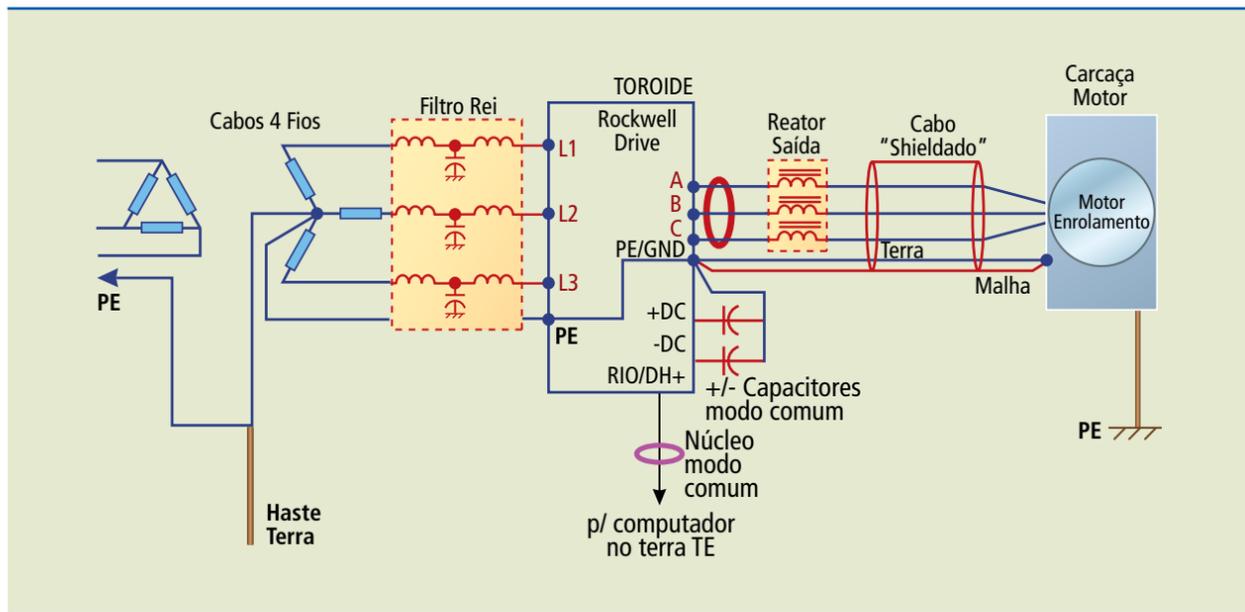
- se, em razão do uso do inversor (ou outros), a rede tiver chaveamentos frequentes de capacitores para correção de fator de potência, altos picos e estreitamentos de tensão ou afundamentos frequentes de tensão (acima de 200 V), é recomendável o uso de um reator de entrada para melhorar o fator de potência total e aumentar a vida útil do equipamento;
- por causa do chaveamento de frequência alta do inversor, se a impedância do cabo (inversor/motor) não estiver casada, ocorrerá a reflexão de onda, que pode gerar picos de duas a três vezes a tensão do barramento de tensão contínua ($675 \text{ Vcc} \cdot 2 = 1350 \text{ V}$). Geralmente, motores menores têm pouca isolamento. Um reator de saída (ou mesmo um terminador) pode atenuar essa forma de onda destrutiva. O reator, no entanto, pode causar redução de torque, o que desaconselha seu uso sem necessidade.

O inversor, assim como todo dispositivo de chaveamento (retificadores, reatores de lâmpadas fluorescentes, fontes chaveadas etc.), causa o aparecimento de harmônicas na tensão e na corrente elétrica e elas (tensão e corrente) deixam de ser proporcionais. Essas harmônicas são correntes parasitárias que se somam à corrente fundamental do sistema de potência.

Alguns dos efeitos que as harmônicas causam são: sobreaquecimento de componentes (motores, transformadores etc.), falhas em sistemas telefônicos, falhas em relés de proteção e medidas incorretas. Esse excesso de corrente aumenta o consumo de energia, mas não produz potência útil. Assim, os transformadores e os condutores têm de ser superdimensionados para suportá-lo.

A fim de reduzir os efeitos das harmônicas, podem ser usados filtros passivos, filtros ativos, PWM na entrada do inversor, inversores com retificadores de 12 ou 18 pulsos, e pode-se aumentar o número de cargas lineares (não chaveadas) em relação às cargas não lineares (dispositivos chaveados). A Norma IEEE 519 recomenda que a distorção harmônica de tensão não ultrapasse 5%.

Figura 2.73
Itens recomendados para a instalação de um inversor de frequência.



A potência consumida pela carga e o tipo de torque (conjugado) são outros fatores importantes para a escolha dos inversores. A título de recordação:

- conjugado nominal: exigido para manter a carga na velocidade nominal;
- conjugado de partida: usado para vencer a inércia da máquina parada. Para tirar a carga da inércia, é preciso que o conjugado do motor seja maior que o da carga;

- conjugado de aceleração: empregado para acelerar a carga até a velocidade nominal. O conjugado do motor é superior ao da carga acelerando o motor até chegar à velocidade nominal, quando os dois conjugados se igualam.

Na figura 2.74, é mostrado o modo correto de escolher o motor de acordo com o conjugado resistente da carga.

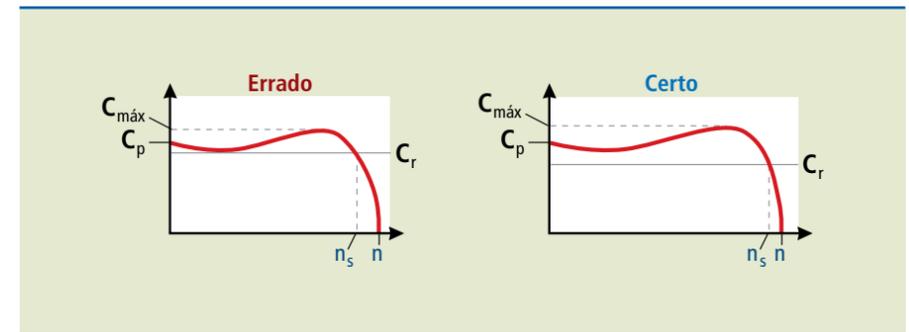


Figura 2.74
Escolha correta do motor com conjugado resistente da carga.

Na figura:

- $C_{m\text{máx}}$ = conjugado máximo;
- C_p = conjugado de partida;
- C_r = conjugado resistente;
- n = rotação nominal;
- n_s = rotação síncrona.

Escolha do motor a ser usado com o inversor de frequência

Para determinar o tipo de motor a ser utilizado com um inversor de frequência, é preciso realizar um estudo da curva torque versus frequência (figura 2.75). Essa curva ajuda no cálculo da carcaça do motor, levando em consideração o torque necessário para a carga em função da faixa de frequência de trabalho do motor.

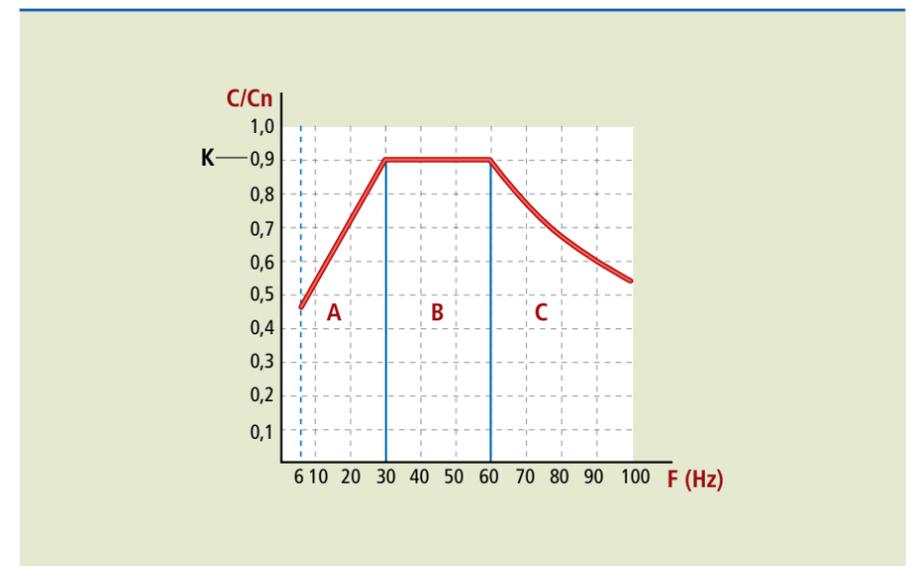


Figura 2.75
Curva característica torque (conjugado disponível) versus frequência (rotação) para uso de motores autoventilados com inversor.

É importante notar que K é o fator de redução de torque (*derating factor*), está entre 0,7 e 1,0 e depende do conteúdo de harmônicas do inversor (valores típicos são de 0,8 a 0,9).

Tabela 2.14

Eficiência energética e acionamento de motores.

Trecho	Curva <i>derating</i>	
	Limites	<i>Derating</i>
A	$0 \leq f/f_n < 0,5$	$K = (0,45/0,4) \cdot [(f/f_n) - 0,5] + 0,9$
B	$0,5 \leq f/f_n \leq 1$	Torque constante ($K=0,9$)
C	$f/f_n > 1,0$	$K = 0,9 / (f/f_n)$

A análise da tabela 2.14 resulta em melhor entendimento da figura 2.75:

- Trecho A: utilizado para determinar a carcaça do motor sem sistema de ventilação. Na região abaixo de 50% da rotação nominal, é necessário usar um motor de carcaça maior para garantir a refrigeração do motor.
- Trecho B: região ótima de utilização. Operando na faixa entre 50% e 100% da rotação nominal, o ventilador acoplado ao eixo do motor ainda é eficiente na refrigeração do motor.
- Trecho C: região de enfraquecimento do campo. Determina a perda efetiva de torque do motor.

Exemplo I

Primeiro exemplo prático para a escolha do motor a ser usado com o inversor de frequência:

Uma esteira transportadora deve operar entre 180 e 900 rpm. Considerando o conjugado resistente na rotação nominal igual a $2 \text{ kgf} \cdot \text{m}$, rede de 380 V, 60 Hz, escolher o motor para operação com inversor de frequência.

Solução:

$$1. \quad p = \frac{120 \cdot f}{n_2} = \frac{120 \cdot 60}{900} = 8 \text{ polos}$$

$$P \text{ (kW)} = \frac{C \text{ (kgf} \cdot \text{m)} \cdot n \text{ (rpm)}}{974}$$

$$P \text{ (kW)} = \frac{2 \cdot 900}{974} = 1,84 \text{ kW}$$

em que:

p = número de polos do motor;
 n_2 = rotação máxima;
 C = conjugado do motor;
 P = potência do motor;
 f = frequência da rede.

2. Cálculo das frequências mínima e máxima do motor:

$$f_1 = \frac{n_1 \cdot p}{120} = \frac{180 \cdot 8}{120} \cong 12 \text{ Hz}$$

$$f_2 = \frac{n_2 \cdot p}{120} = \frac{900 \cdot 8}{120} = 60 \text{ Hz}$$

3. Com os valores das frequências na curva torque *versus* frequência (figura 2.75), obtemos:

$$f_1 \Rightarrow K_1 = 0,56$$

$$f_2 \Rightarrow K_2 = 0,9$$

4. Cálculo do torque nominal do motor (maior torque a baixa velocidade):

$$C_n \text{ (motor)} = \frac{C \text{ (carga)}}{K_1} = \frac{2 \text{ kgf} \cdot \text{m}}{0,56} = 3,6 \text{ kgf} \cdot \text{m}$$

5. No catálogo de motores trifásicos WEG encontra-se o motor trifásico IP55, com as seguintes características, e que pode ser utilizado para a movimentação da esteira transportadora:

- motor de carcaça 132 M, 380 V, 60 Hz e 8 polos (900 rpm);
- potência $P = 5 \text{ cv}$ (3,7 kW);
- conjugado $C_n = 4,17 \text{ kgf} \cdot \text{m}$ [o qual deve ser maior que o C_n (motor) calculado de $3,6 \text{ kgf} \cdot \text{m}$].

(Como resposta, pode ser usado um motor com características superiores a esse.)

Em resumo, ao se utilizar o motor de 5 cv e 8 polos ($I_{nom} = 10 \text{ A}$ em 380 V), carcaça 132 M, que desenvolve uma rotação de 900 rpm, conjugado nominal no eixo de $4,17 \text{ kgf} \cdot \text{m}$ (conjugado resistente = $3,6 \text{ kgf} \cdot \text{m}$) e pode ser alimentado diretamente a uma rede de 60 Hz, será necessário aplicar um inversor de frequência operando de 0 a 60 Hz. Com isso, pode-se ter um controle de partida e operação estabelecendo o tempo de aceleração (ou rampa de aceleração), que consequentemente limita a corrente de partida do motor.

Entretanto, o motor de 8 polos tem um custo elevado quando comparado ao de 4 polos, que é *standard* de mercado.

Comparativamente, um motor de 5 cv e 8 polos com carcaça 132 M corresponde a um motor de 10 cv e 4 polos ($I_{nom} = 15,2 \text{ A}$ em 380 V) com o mesmo padrão de carcaça.

Assim, para ter o mesmo desempenho de aplicação usando um motor de 4 polos, será necessário efetuar novo cálculo, considerando um motor de 10 cv e 4 polos

(60 Hz) operando em 30 Hz, de forma que venha a desenvolver, nessa frequência menor, uma potência máxima de 5 cv, equivalente ao motor de 8 polos.

Entretanto, ao utilizarmos um motor projetado para operar com 1 800 rpm operando em 900 rpm, podemos ter deficiência de refrigeração natural. Tal problema poderá ser resolvido adicionando uma refrigeração forçada, por meio de ventilador externo funcionando como exaustor, ou ainda reprojetoando a carcaça do motor em forma de aletas para haver maior área de dissipação de calor.

O inversor, por sua vez, deverá ser dimensionado pela corrente nominal de aplicação e de partida, considerando que a corrente de sobrecarga do inversor normalmente é de 150% em relação a seu valor nominal.

Para isso, com a rampa de aceleração projetada, define-se qual a corrente calculada de partida. Supondo que a rampa de aceleração seja acentuada (menor tempo de aceleração ou constante de tempo pequena), a corrente de partida poderá aproximar-se 200% em relação ao valor nominal (bem inferior ao valor considerado no caso de partida direta, que se aproxima em 700% do valor nominal).

Portanto, é necessário efetuar um *derating* no inversor, ou seja, sobredimensionar o inversor aplicando um fator de 2/1,5 (ou 200% para 150%) sobre a corrente nominal do motor para obter o inversor.

Nesse exemplo, a corrente nominal de um motor de 10 cv e 4 polos em 380 V é 15,2 A e, portanto, a mínima corrente nominal do inversor deverá ser $15,2 \cdot 2/1,5 = 20,3$ A.

Pesquisando no catálogo de fabricantes de inversores, o modelo que opera em 400 V é o de 11 kW (15 cv), cuja corrente nominal é de 27 A.

Exemplo 2

Segundo exemplo para a escolha de um inversor de acordo com um motor em uma situação prática:

Escolher um inversor de frequência para uso em uma cancela de estacionamento. As vantagens dessa escolha são: a eliminação do freio hidráulico, o atendimento a altas velocidades, o uso em temperatura ambiente (o inversor do tipo a ser escolhido trabalha em temperaturas de -10 °C a $+50$ °C), o controle da oscilação do braço da cancela e a facilidade de instalação do dispositivo. Nesse caso, o braço deve levar 3 s no ciclo de subida e 1 s no ciclo de descida. O motor usado possui as seguintes características: é 220 V trifásico, 50 Hz, potência de 0,18 kW (\cong 0,25 HP), corrente nominal de 1,4 A e fator de potência 0,64.

Solução:

Para o inversor, basta alimentação monofásica de 220 V. Sabe-se que suporta 150% de sobrecarga durante 60 s (suficiente para os poucos segundos do fun-

cionamento intermitente do braço). Assim, a corrente máxima fornecida pelo inversor ao motor pode chegar a:

$$I_{\text{máx.}} = 1,4 \text{ A} \cdot 1,50 = 2,2 \text{ A}$$

Com base na tabela do inversor Altivar 11 da Telemecanique/Schneider Electric (tabela 2.15), foi escolhido o inversor ATV 11HU05M2A, que suporta a corrente de 2,2 A, tem potência de 0,18 kW e trabalha com alimentação monofásica de 220 V.

Tabela 2.15

Tabela para escolha do inversor:

Inversores com dissipador (gama de frequência de 0 a 200 Hz)								
Motor		Rede	Altivar 11				Referência	Peso
Potência indicada na placa		Corrente de linha máxima (1)	Corrente de saída permanente (2)	Corrente transitória máxima (3)	Potência dissipada com carga nominal			kg
kW	HP	A	A	A	W			
Tensão de alimentação monofásica: 200...240 V 50/60 Hz (4)								
0,18	0,25	3,3	1,4	2,1	14	ATV 11HU05M2A	0,900	
0,37	0,5	6	2,4	3,6	25	ATV 11HU09M2A	1,000	
(1) O valor de corrente de linha é dado para as condições de medição indicadas na tabela abaixo.								
Calibre do inversor		Icc presumida		Tensão de linha				
ATV 11 · UF1A		1 kA		100 V				
ATV 11 · UM2A		1 kA		200 V				
ATV 11 · UM3A		5 kA		200 V				
(2) O valor da corrente é dado por uma frequência de chaveamento de 4 kHz.								
(3) Para 60 segundos.								
(4) Saída trifásica para o motor.								

Programação dos inversores de frequência

A programação dos inversores é feita por meio de um pequeno conjunto de teclado e *display*, usando códigos fornecidos pelo fabricante nos manuais. Cada fabricante tem o próprio conjunto de códigos. O conjunto teclado/*display* pode ser retirado da frente do inversor, para evitar alterações da programação por pessoas não autorizadas, e novamente recolocado quando for necessário alterar a programação. A programação também está ligada às conexões externas ao inversor. A seguir apresentamos alguns exemplos de programação para diferentes marcas/modelos de inversores.

- **Inversor Altivar 18 da Telemecanique** (inversor para motores assíncronos da Schneider Electric):

a) **Esquema de ligações externas:** é necessário conhecer a ligação do inversor antes de executar sua programação. Na figura 2.76, é mostrado o esquema de ligações para a regulagem de fábrica (a) e a aparência frontal do inversor (b). Em **a** (lado esquerdo da figura), é mostrado o esquema de ligações rede/inversor/motor, e, em **b** (lado direito), o teclado/*display* do inversor. Outras informações são detalhadas a seguir.

No esquema de ligações rede/inversor/motor (a):

- (1): ligação à rede monofásica ou trifásica;
- (2): contatos do relé para sinalizar estado do inversor;
- (3): entrada para relé ou CLP (24 V_{DC});
- (4): ligação à fonte de 24 V_{DC} interna (se externa, ligar o 0 V da fonte ao borne COM e não usar o borne 24 V do inversor).

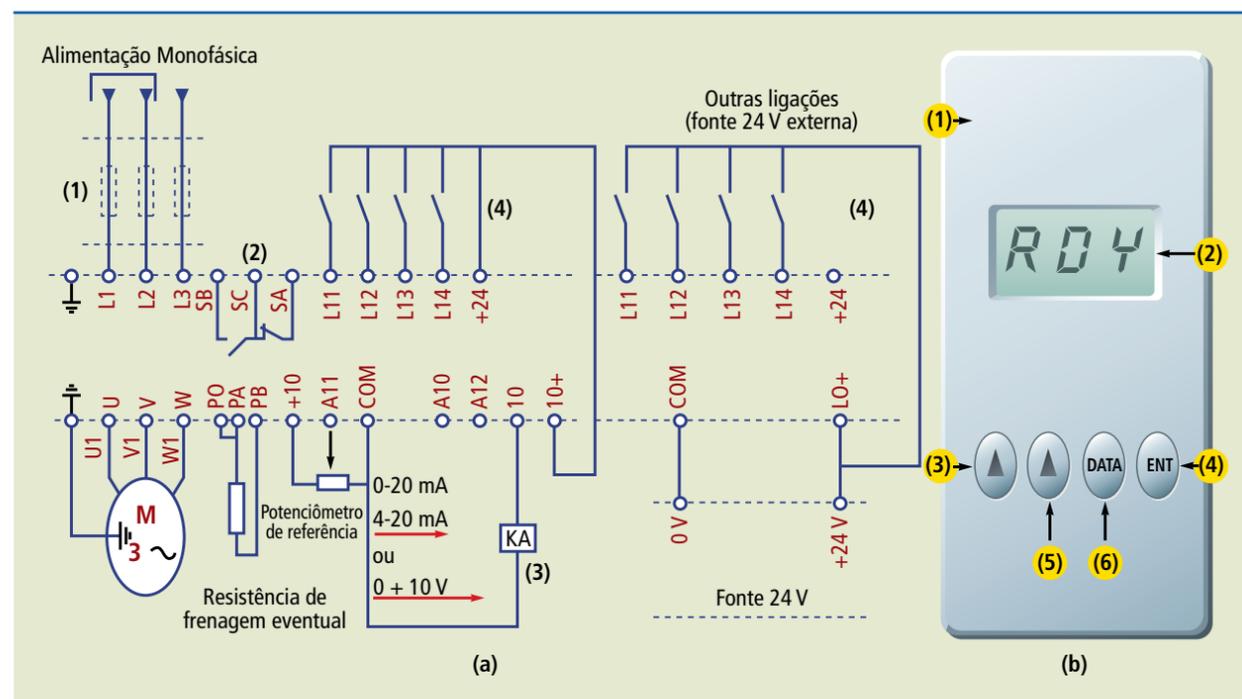
No teclado/*display* do inversor (b):

- (1): led que indica tensão no bus DC;
- (2): *displays* de sete segmentos;
- (3) e (5): setas para trocar de parâmetro ou aumentar/diminuir um valor;
- (4): <enter> (memoriza parâmetro ou valor do *display*);
- (6): troca parâmetro por seu valor numérico.

Nessas ligações devem ser seguidas as recomendações de instalação dos itens anteriores e do manual do fabricante.

Figura 2.76

a) Esquema de ligações;
b) aparência frontal do Altivar 18 – Telemecanique.



b) Exemplos de programação

1. Para alterar o valor de fábrica da rampa de aceleração linear (ACC) de 3 s para 5,8 s, deve ser digitada a seguinte sequência no teclado:

bFr ▽ ACC DATA 3. 0 Δ 5. 8 ENT (1 piscada) 5. 8 DATA ACC ▽ dEC

Resultado: Ao se acionar a chave LI1, o motor dá partida no sentido direto e leva 5,8 s até alcançar a rotação máxima para a frequência de 50 Hz, desde que se tenha deixado o potenciômetro da entrada analógica no valor máximo.

2. Para alterar o valor de fábrica da rampa de desaceleração linear (dEC) de 3 s para 4 s, deve ser digitada a seguinte sequência no teclado:

ACC ▽ dEC DATA 3. 0 Δ 4. 0 ENT (1 piscada) 4. 0 DATA dEC ▽ LSP

Resultado: Ao se desligar a chave LI1, o motor leva 4 s para chegar à rotação mínima (parado) na frequência de 0 Hz. Ao se fechar a chave LI1, o motor parte no sentido direto, ao passo que, fechando a chave LI2, o motor parte em sentido reverso. Se as duas chaves são acionadas, é dada prioridade à chave acionada primeiro. É possível também usar o inversor como escravo de um CLP (controlador lógico programável): ao se acionar, por exemplo, o contato de LI1 (ou de LI2) usando um relé de saída do CLP e, assim, controlar seu sentido de giro pelo CLP.

3. Alguns parâmetros do inversor pertencem a um segundo nível. Por exemplo, a rotação máxima do motor está associada à frequência máxima de 50 Hz (regulagem de fábrica). Para alterar essa frequência máxima, é preciso primeiro entrar no segundo nível. Para tanto, é necessário digitar:

FLt ▽ L2A DATA no ▽ yes ENT (1 piscada) yes DATA L2A ▽

Com isso, é possível entrar no segundo nível de parâmetros e alterar a frequência máxima:

LSP ▽ HSP DATA 60. 0 ENT.

Se agora for acionada novamente a chave LI1, o motor chegará à rotação máxima correspondente à frequência de 60 Hz após 5,8 s. Importante notar que antes de usar a frequência máxima deve-se assegurar que o motor e a carga estejam preparados para isso. Com um motor especial, a frequência máxima desse inversor pode ser regulada até 320 Hz.

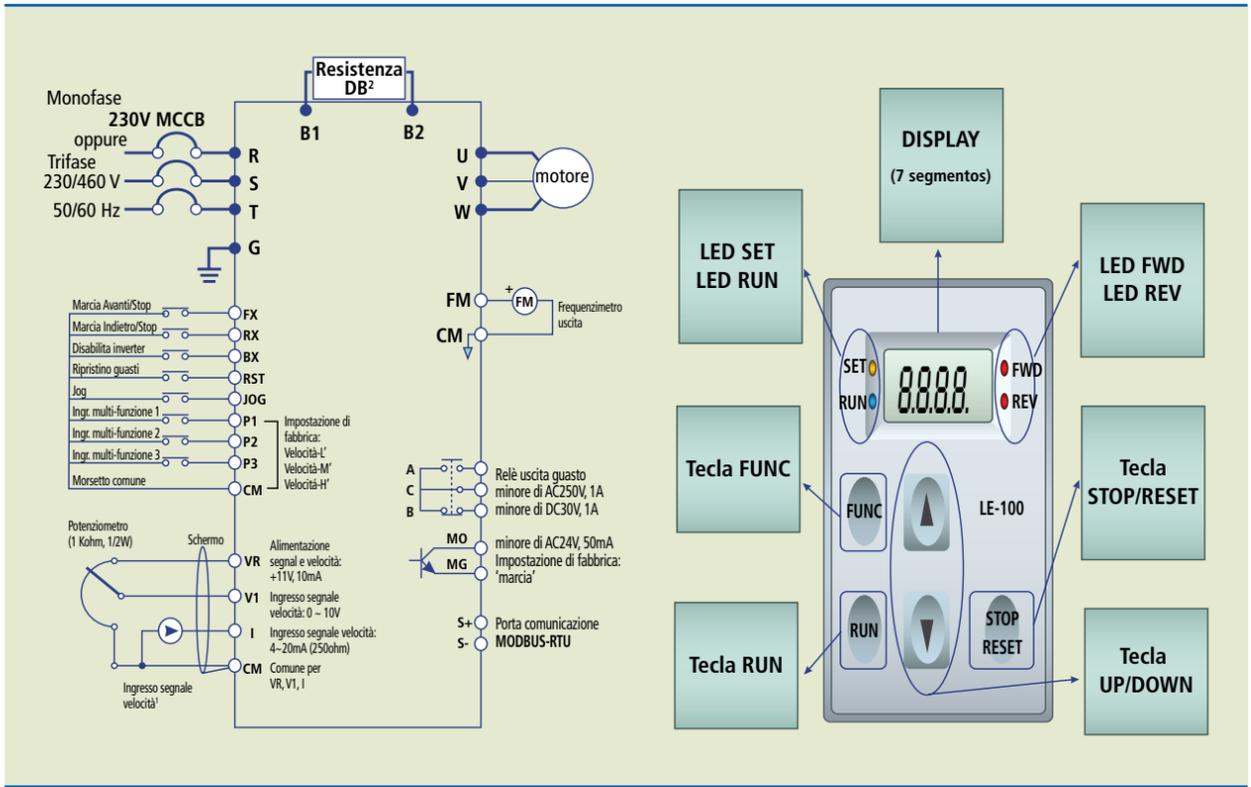
- **Inversor VEGA LE-100 da Santerno**

a) Esquema de ligações externas: na figura 2.77, é mostrado o esquema básico de ligações para o inversor da Santerno e seu conjunto teclado/*display* frontal, em que os LEDs Set, Run, Fwd e Rev indicam respectivamente seleção, funcionamento, giro à frente e giro reverso do motor.

A tecla FUNC é usada para escolher o parâmetro (função);
 RUN para acionar o inversor;
 STOP/RESET para parada/recuperação de defeito;
 Δ / ▽ (UP/DOWN) para mudar de parâmetro ou aumentar/diminuir o valor do parâmetro.

- No esquema de ligações, os círculos cheios e vazios (• / o) indicam conexões do circuito principal/de controle. O potenciômetro conectado às entradas analógicas (V_R, V_I, C_M e I) controla a velocidade de rotação do motor. Como no inversor anterior, basta entrar com tensão monofásica. O inversor produz a tensão trifásica para o motor.

Figura 2.77
 Esquema básico de ligações do inversor VEGA e aparência frontal.



b) Exemplos de programação

Figura 2.78
 Mudança de parâmetro de aceleração.

- Para alterar o valor do tempo de aceleração (ACC) de 60 s para 40 s, digita-se no teclado e observa-se no *display* a sequência da figura 2.78.

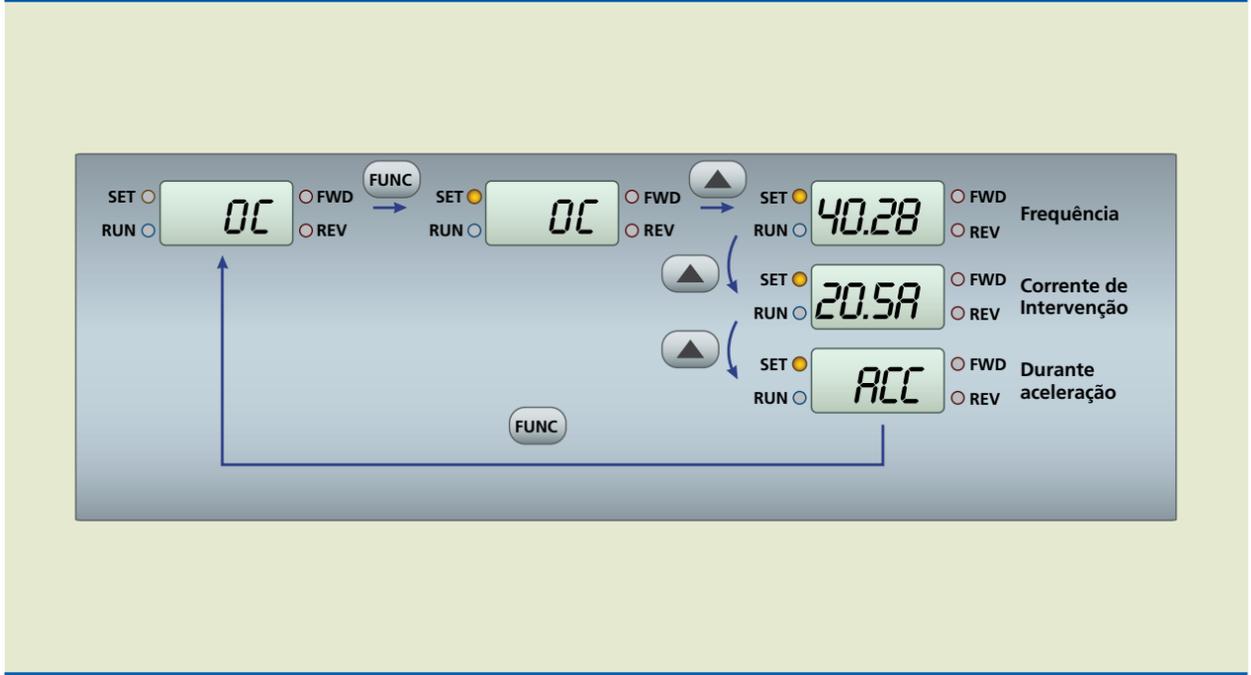


- Para medir a corrente de saída do inversor (corrente fornecida ao motor), digita-se no teclado e o *display* mostra o seguinte:

▽ (SET o) CUR FUNC (SET(•) 5. 0A FUNC (SET (0) CUR

- Para visualizar e controlar um defeito em andamento, usa-se a sequência da figura 2.79.

Figura 2.79
 Visualização de defeito em andamento.



Nesse caso, trata-se de um defeito de sobrecorrente (OC = *over current*). Após visualizar o tipo de defeito e os valores envolvidos (corrente de intervenção de 20,5 A ocorrida na frequência de 40,28 Hz durante uma aceleração), podemos ressetar (restabelecer) o funcionamento do inversor de três modos:

- 1) reset pela tecla STOP/RESET;
- 2) reset com curto-circuito entre os terminais RST e CM;
- 3) desligando e religando o inversor.

Se o defeito é no *hardware* (circuito) e não no *software* (programa), apenas o modo 3 restabelece o funcionamento do inversor.

Exemplos de aplicações dos inversores

Na figura 2.80, temos o esquema elétrico de controle de um elevador com duas portas. Nesse esquema, uma placa de computador controla dois inversores e cada inversor controla um motor trifásico que abre e fecha uma porta do elevador. Percebe-se também a aplicação dos toroides (enrolamentos toroidais) nos inversores, como citado anteriormente.

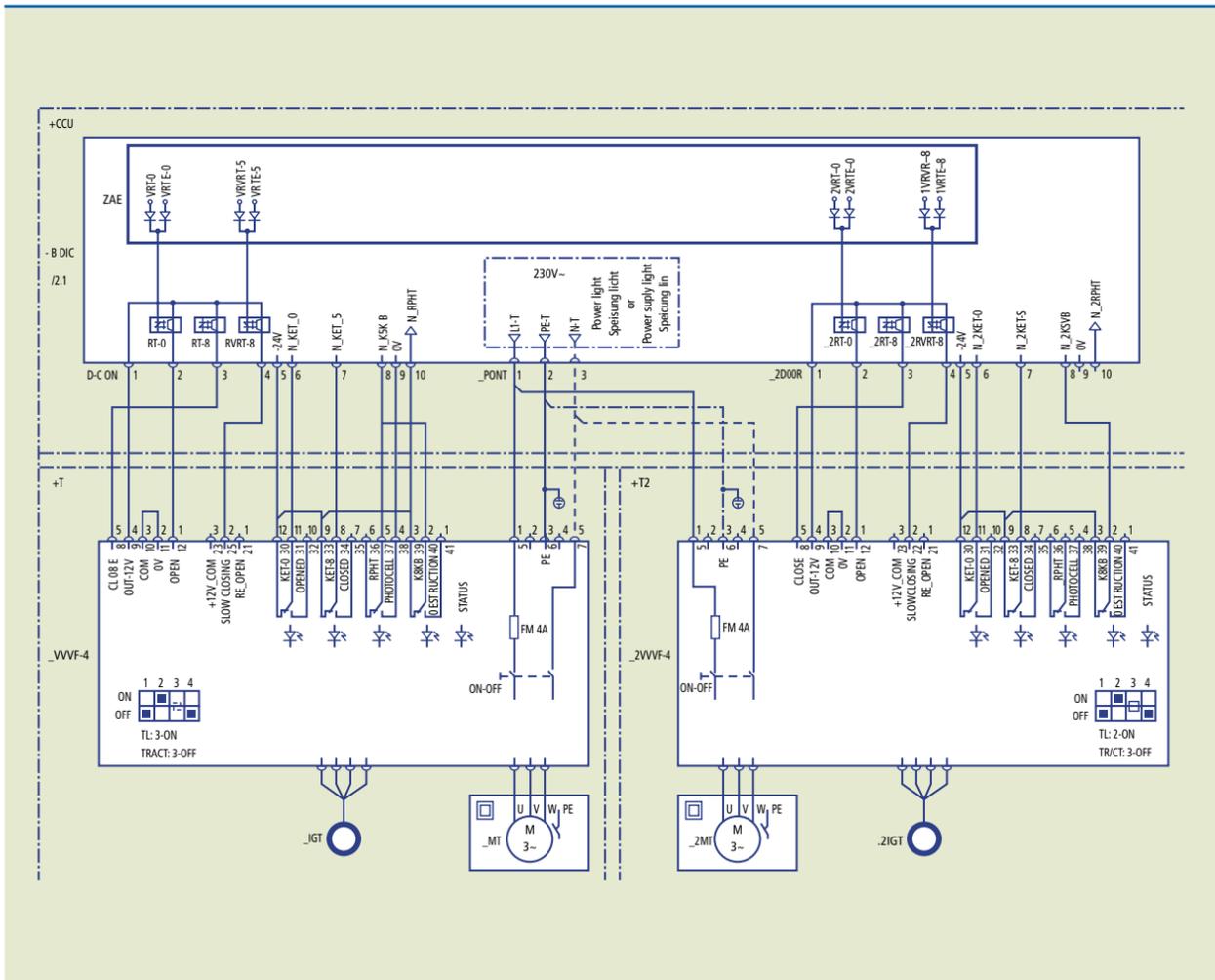


Figura 2.80
 Controle duplo de portas de elevador por inversor.

Na figura 2.81, vemos o esquema elétrico do controle de velocidade do elevador, também controlado por uma placa de computador ligada a um inversor que aciona um motor trifásico. No esquema, nota-se que:

- além do motor trifásico que movimenta o elevador, o inversor controla mais três motores de corrente contínua;
- são usados cabos blindados nos cabos de controle;
- uso de reator no barramento de entrada (para melhorar o fator de potência e diminuir picos e afundamentos de tensão);
- proteção por relé térmico externo;
- outros itens que podem ser discutidos.

Na figura 2.82, temos o esquema de ligação de um inversor Toshiba, modelo VF-P7, usado no controle de volume de ar (e temperatura) em estufas, ventiladores etc. No esquema, o ajuste de temperatura é feito de modo manual ou automaticamente. Podemos observar também a ligação de frequencímetro e amperímetro para verificar a velocidade de rotação e carga no ventilador. Uma das importantes funções dessa montagem é a economia de energia na operação.

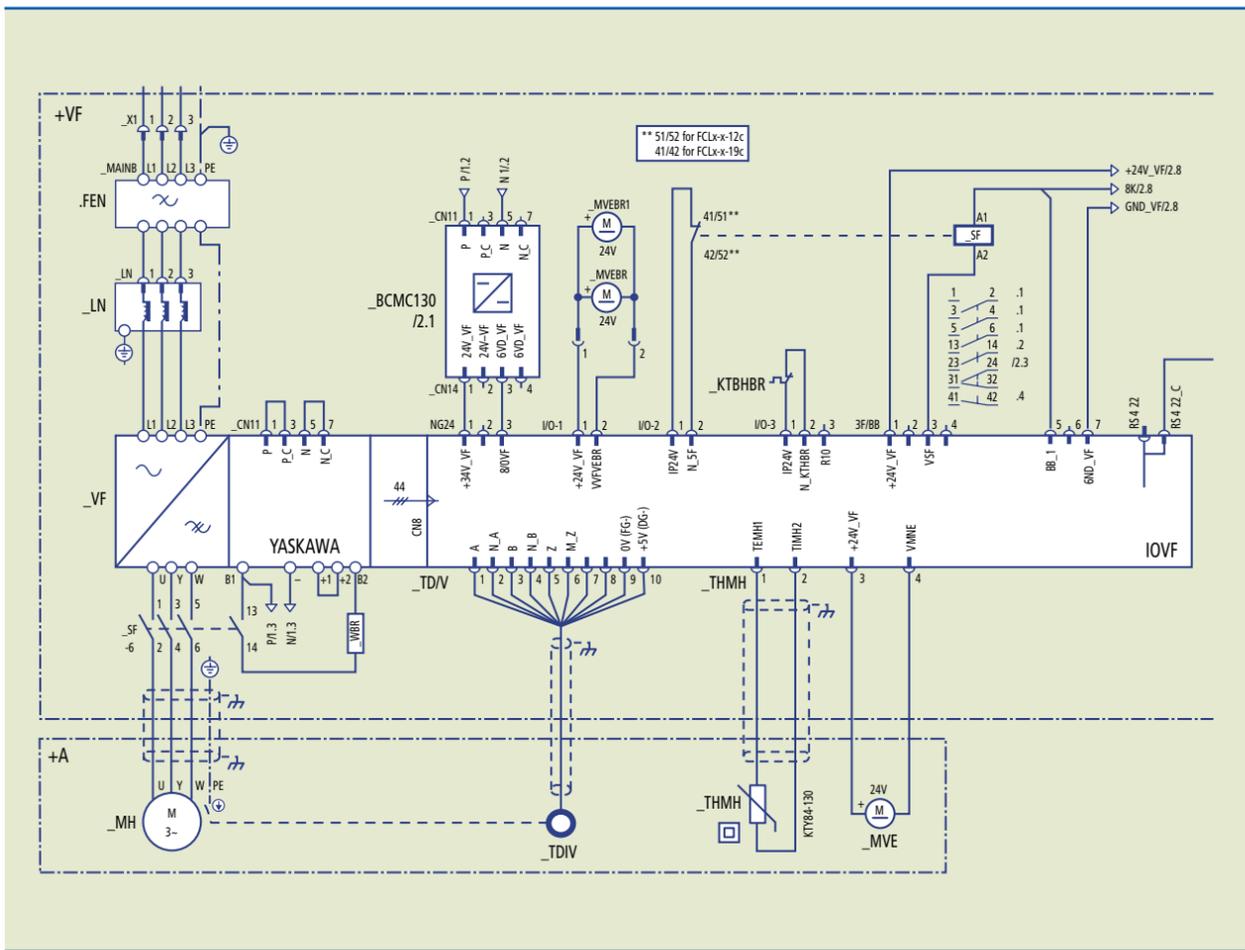


Figura 2.81
 Esquema parcial de controle de velocidade de um elevador por inversor de frequência.

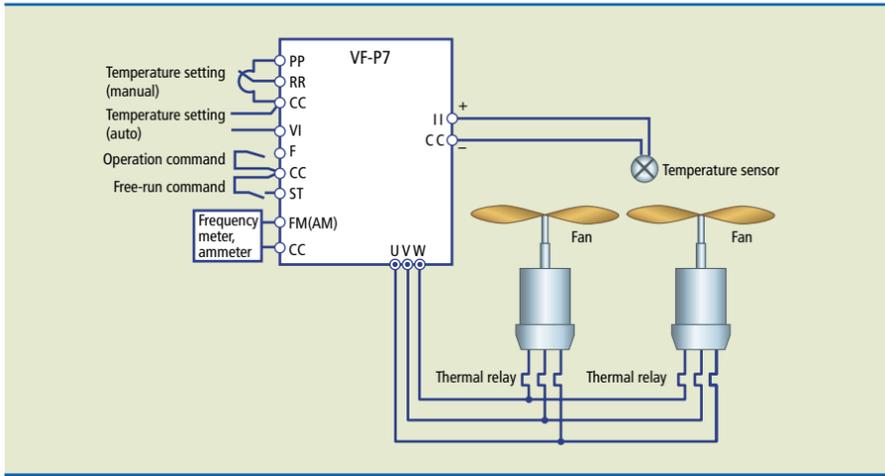


Figura 2.82
 Controle de temperatura e volume de ar por inversor.

Na figura 2.83, é mostrado um inversor usado para controle de temperatura da água fria em uma torre de resfriamento. O controle é feito por PID (controlador proporcional-integral-derivativo) pela programação do inversor, que mantém a temperatura da água constante. À noite, o inversor reduz a velocidade de rotação da hélice para diminuir o ruído.

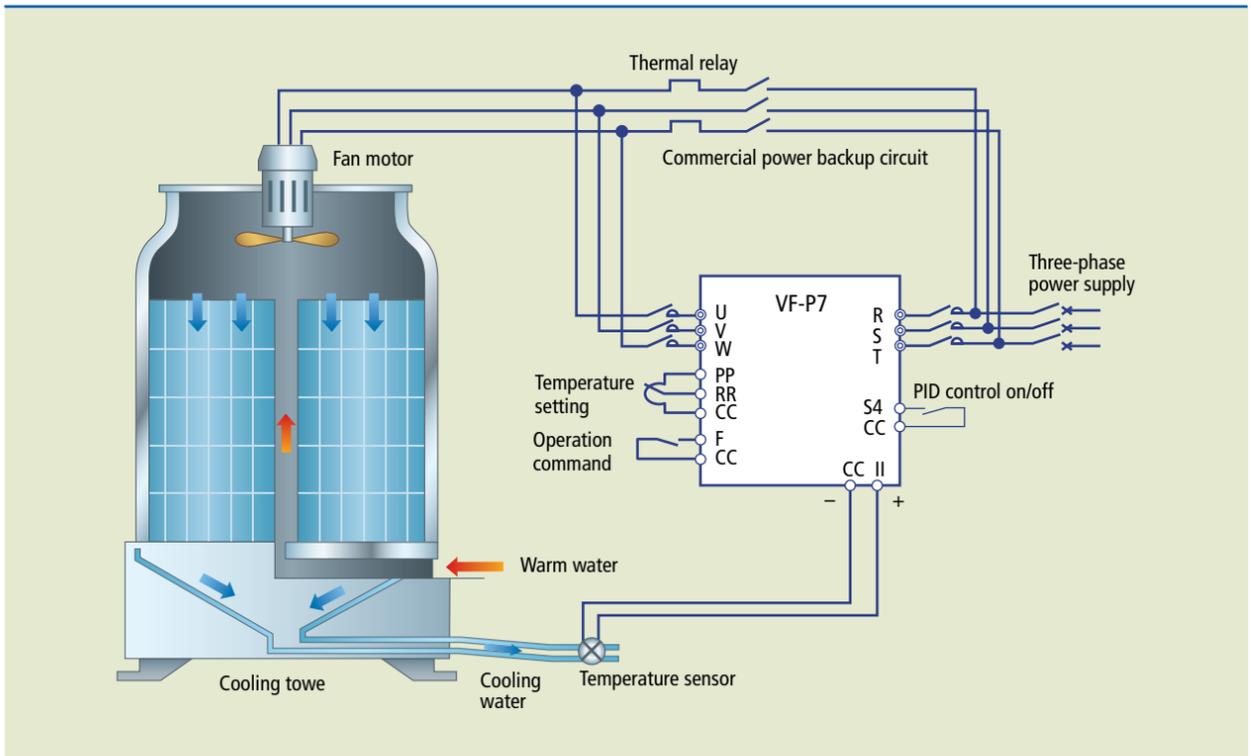


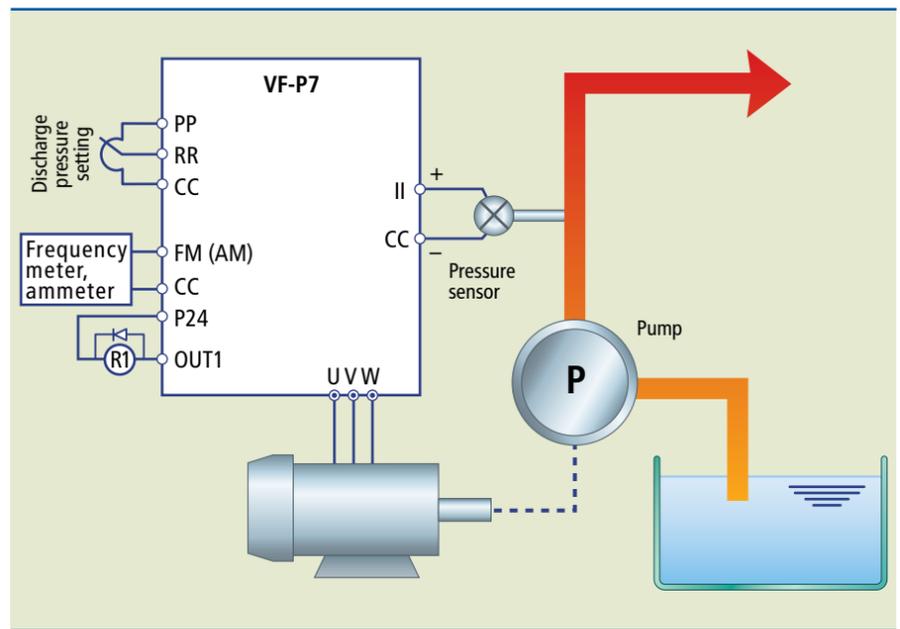
Figura 2.83

Controle de temperatura de água em uma torre de resfriamento.

Na figura 2.84, observamos o uso de um inversor para o controle de nível de água e pressão também por meio de PID. O inversor sinaliza para o motor da bomba em caso de sobrecarga. Além disso, controla o limite mais baixo de rotação para evitar o fluxo do líquido na direção reversa. Também assegura o funcionamento estável, se ocorrer flutuação na tensão na fonte de alimentação, e permite economia de energia. Todas as funções citadas fazem parte da programação desse modelo de inversor.

Figura 2.84

Controle de nível de água e pressão por inversor.



Para finalizar o assunto sobre variação de velocidade de motores, a tabela 2.16 faz uma análise comparativa mostrando as vantagens e desvantagens dos diversos tipos de acionamentos (inclusive vários não discutidos neste texto).

Tabela 2.16

Comparativo entre os sistemas de variação de velocidade.

Tipo	Vantagens	Desvantagens
Variadores mecânicos	<ul style="list-style-type: none"> • Baixo custo de aquisição 	<ul style="list-style-type: none"> • Apenas controle manual e local • Peças sujeitas a desgastes e quebras • Fator de potência menor que 1 • Utilização em baixas potências
Variadores hidráulicos	<ul style="list-style-type: none"> • Alto torque em baixas rotações 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixo rendimento • Pequena faixa de variação • Manutenção
Variadores eletromagnéticos	<ul style="list-style-type: none"> • Baixo custo de aquisição • Operação automática • Permite sincronismo 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixo rendimento • Dimensões e peso elevados • Fator de potência menor que 1 • Lubrificação frequente • Difícil manutenção • Velocidade máxima = velocidade motor
Motores de anéis	<ul style="list-style-type: none"> • Alto torque de partida • Controle simples 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixo rendimento • Perdas proporcionais ao escorregamento • Fator de potência menor que 0,8 • Existência de anéis e escovas • Pequena faixa de variação
Variadores de tensão	<ul style="list-style-type: none"> • Utilização de motores de indução padrão • Sistema eletrônico simples 	<ul style="list-style-type: none"> • Baixo rendimento • Maior escorregamento • Fator de potência variável e menor que 0,8 • Pequena faixa de variação
Conversores CA/CC	<ul style="list-style-type: none"> • Alta precisão de velocidade: 0,01% digital; 0,1% analógico • Sincronismo com alta precisão • Torque controlável • Ampla faixa de variação de velocidade • Frenagem regenerativa 	<ul style="list-style-type: none"> • Limitação de velocidade devido a comutação (4000 rpm) • Preço do motor • Manutenção • Dimensões e peso do motor • Impossibilidade de operação em áreas de risco • Fator de potência variável com a rotação
Conversores de frequência	<ul style="list-style-type: none"> • Utilização de motor de indução padrão • Peso e dimensões reduzidos • Ampla faixa de variação de velocidade • Operação em áreas de risco • Disponibilidade de <i>by-pass</i> $\cos \phi$ (fator de deslocamento) próximo de 1 	<ul style="list-style-type: none"> • Preço elevado para aplicações que requerem sincronismo de alta precisão • Frenagem regenerativa somente com alto custo

Capítulo 3

Lógica digital para aplicação em eletropneumática

O termo “digital” tornou-se parte do vocabulário geral em razão do fato de circuitos e técnicas digitais serem amplamente utilizados em quase todas as áreas: computadores, automação, robôs, tecnologia e ciência médicas, transportes, entretenimento, exploração espacial, e assim por diante.

Quando se manipulam quantidades diversas, é importante saber representar seus valores de modo eficiente e preciso. Existem basicamente duas formas de representação: a analógica e a digital. Na representação analógica, uma quantidade é representada por uma tensão, uma corrente ou uma velocidade de movimento que seja proporcional ao valor da quantidade em questão. Essas quantidades têm a característica de poder variar ao longo de uma faixa contínua de valores. Já na representação digital, as quantidades não são representadas por quantidades proporcionais, mas sim por símbolos denominados dígitos. Assim, a maior diferença entre quantidades analógicas e digitais pode ser determinada da seguinte forma:

analógica \equiv contínua

digital \equiv discreta (passo a passo)

Por causa dessa natureza discreta das representações digitais, não há ambiguidade quando se faz a leitura de uma quantidade digital, ao passo que o valor de uma quantidade analógica apresenta, muitas vezes, interpretação livre.

Sistema digital é uma combinação de dispositivos projetados para manipular informação lógica ou quantidades físicas representadas no formato digital, ou seja, as quantidades podem assumir apenas valores discretos. Esses dispositivos são, na maioria das vezes, eletrônicos, mas podem, também, ser mecânicos, magnéticos ou pneumáticos.

Nos sistemas digitais, a informação é normalmente apresentada na forma binária, nas representações 0 ou 1. As quantidades binárias podem ser reproduzidas por qualquer dispositivo que tenha apenas dois estados de operação ou duas condições possíveis, sendo o 1 usado para o dispositivo em funcionamento e o 0 para o dispositivo desligado. Exemplo: lâmpada (acesa ou apagada), diodo (em condução ou em corte), relé (energizado ou não), transistor (em corte ou em saturação), fotocélula (iluminada ou no escuro), termostato (aberto ou fechado), engate mecânico (engatado ou desengatado), chave de circuito (aberta ou fechada).

Em sistemas eletrônicos digitais, a informação binária é representada por tensões presentes nas entradas e saídas de diversos circuitos. Tipicamente, os números binários 0 e 1 são traduzidos por dois níveis de tensões nominais:

- nível lógico zero (0): que em termos analógicos significa potencial de terra (0 volt);
- nível lógico um (1): que em termos analógicos significa potencial de alimentação (+5 V) V_{CC} .

3.1 Constantes e variáveis booleanas

Essas características dos circuitos lógicos permitem o uso da **álgebra booleana** como ferramenta de análise e projeto de sistemas digitais, que permite descrever as relações entre as saídas dos circuitos lógicos e suas entradas como uma equação algébrica.

A principal diferença entre a álgebra booleana e a álgebra convencional é o fato de que, na álgebra booleana, as constantes e variáveis podem ter apenas dois valores possíveis, 0 ou 1. As variáveis booleanas são muitas vezes usadas para representar o nível de tensão presente em uma conexão ou em terminais de entrada/saída de um circuito. Por exemplo, em determinado sistema digital, o valor booleano 0 pode representar qualquer tensão dentro da faixa de 0 a 0,8 V, enquanto o valor booleano 1 pode representar qualquer tensão dentro da faixa de 2 a 5 V. Tensões entre 0,8 e 2 V são indefinidas (nem 0 nem 1) e não devem ocorrer em circunstâncias normais. Desse modo, as variáveis booleanas 0 e 1 não representam efetivamente números, mas sim o estado do nível de tensão de uma variável, denominado nível lógico.

Como os valores possíveis de uma variável são apenas dois, a álgebra booleana é mais fácil de ser manipulada se comparada com a álgebra convencional. A álgebra booleana tem, de fato, três operações básicas: OR (OU), AND (E) e NOT (NÃO). Essas operações básicas são denominadas operações lógicas, e os circuitos digitais, chamados portas lógicas, podem ser construídos com diodos, transistores e resistores interconectados, de modo que a saída do circuito seja o resultado de uma operação lógica (OR, AND ou NOT) realizada sobre as entradas.

3.2 Tabela verdade

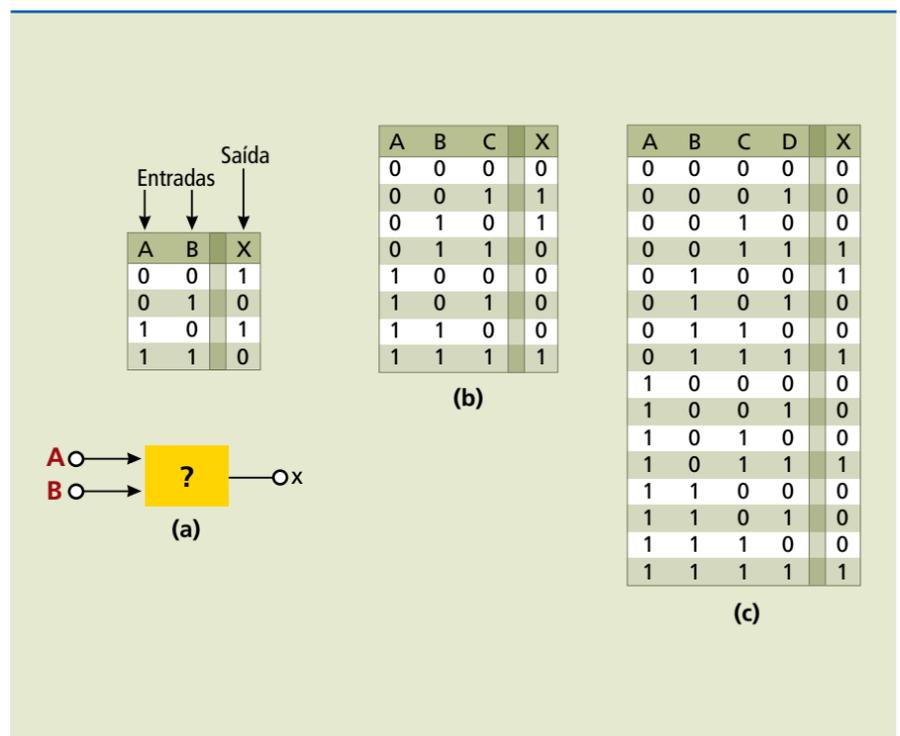
Tabela verdade é uma técnica empregada para determinar como a saída de um circuito lógico depende dos níveis lógicos presentes nas entradas do circuito. A figura 3.1, item *a*, ilustra uma tabela verdade para um tipo de circuito lógico de duas entradas. Essa tabela relaciona todas as combinações possíveis para os níveis lógicos presentes nas entradas **A** e **B**, com o correspondente nível lógico na saída **X**. A primeira linha da tabela mostra que, quando **A** e **B** são nível 0, a saída **X** é nível 1, o que equivale a dizer estado 1. A segunda linha mostra que, quando a entrada **B** passa para o estado 1, de modo que **A** = 0 e **B** = 1, a saída **X** torna-se 0. Da mesma forma, a tabela mostra o que acontece com o estado lógico da saída para qualquer conjunto de condições de entrada. Os itens *b* e

Proposta por George Boole (1815-1864), manipula dois valores: 0 e 1. É uma ferramenta essencial para construção de sistemas lógicos e serve como base para a operação de circuitos computacionais.

c da figura 3.1 mostram exemplos de tabela verdade para circuitos lógicos de três e quatro entradas.

Convém observar que há quatro linhas para uma tabela verdade de duas entradas, oito linhas para uma de três entradas e 16 linhas para uma de quatro entradas. O número de combinações de entrada é 2^N para uma tabela verdade de N entradas.

Figura 3.1
Exemplos de tabela verdade para circuitos de:
a) duas entradas;
b) três entradas;
c) quatro entradas.



Na figura 3.3 estão representadas a tabela verdade, a função e os símbolos

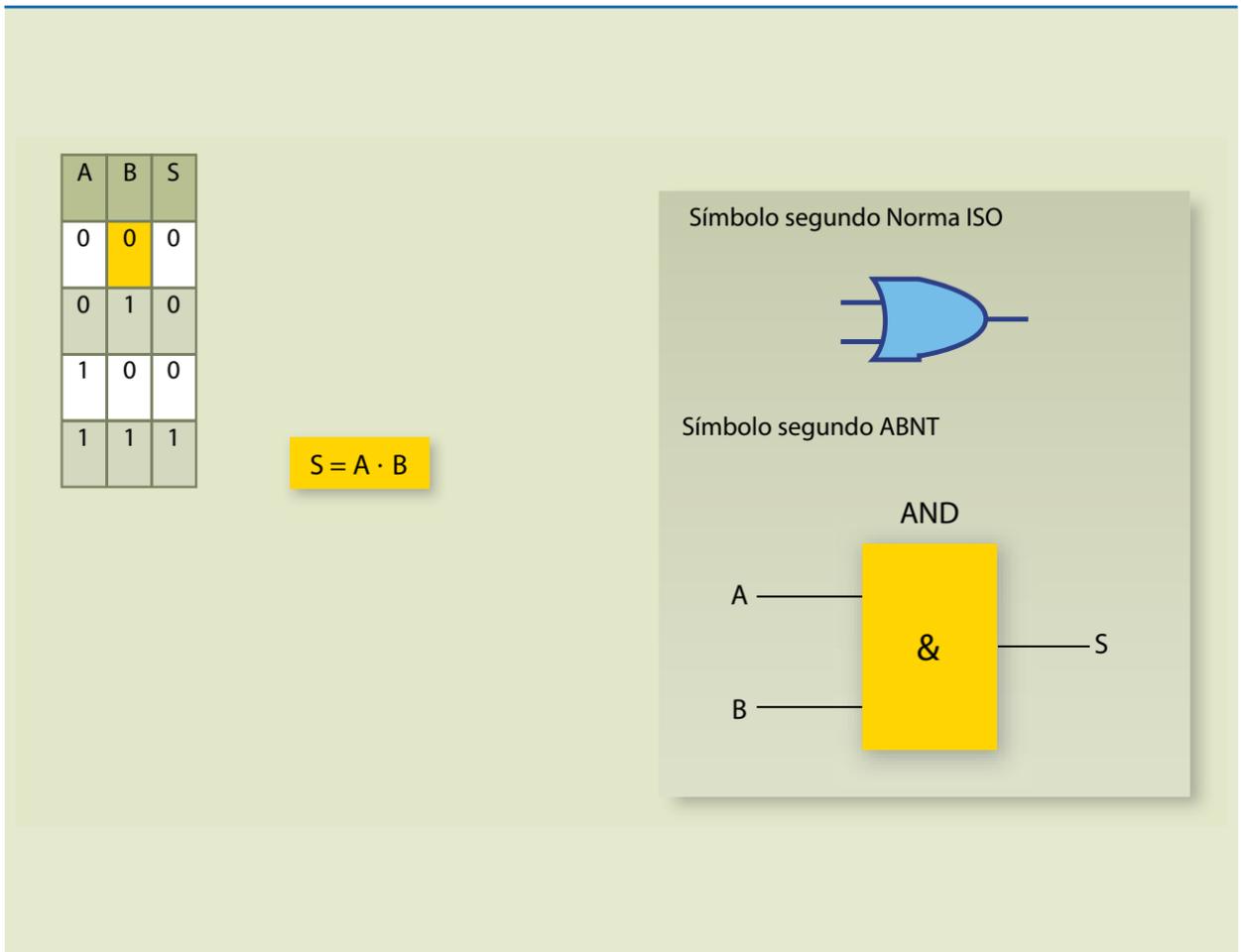
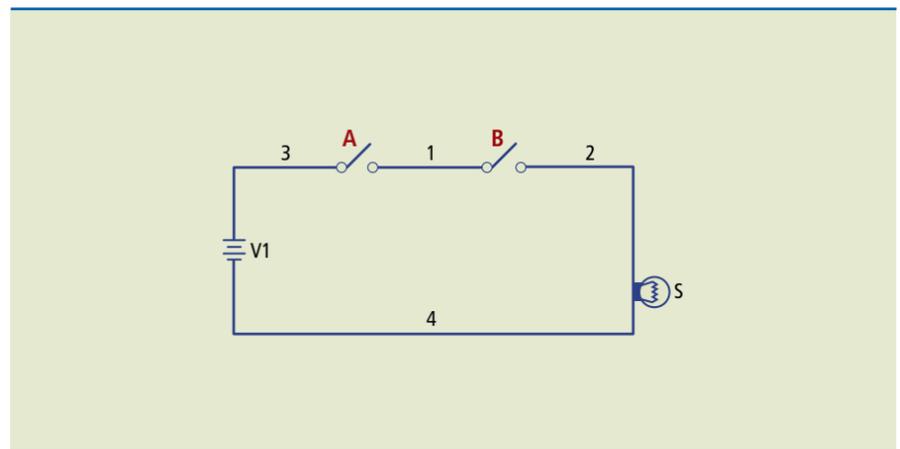


Figura 3.3
Tabela verdade, função e símbolos para a porta E.

3.3 Porta E (ou AND)

Considerando o circuito da figura 3.2, para que a lâmpada acenda, é necessário que a chave A e a chave B estejam fechadas. Para qualquer outra condição, a lâmpada permanece apagada.

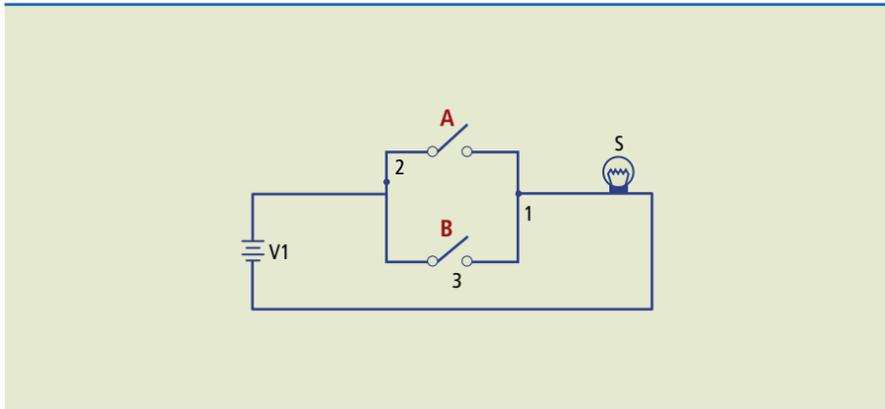
Figura 3.2
Circuito para exemplificar a porta E (ou AND).



3.4 Porta OU (ou OR)

No circuito esquematizado na figura 3.4, para que a lâmpada acenda, é necessário que a chave A ou a chave B esteja fechada.

Figura 3.4
Circuito para exemplificar a porta OU (ou OR).



A lâmpada S acende se pelo menos uma das chaves está fechada; logo, na figura 3.5, a tabela verdade será:

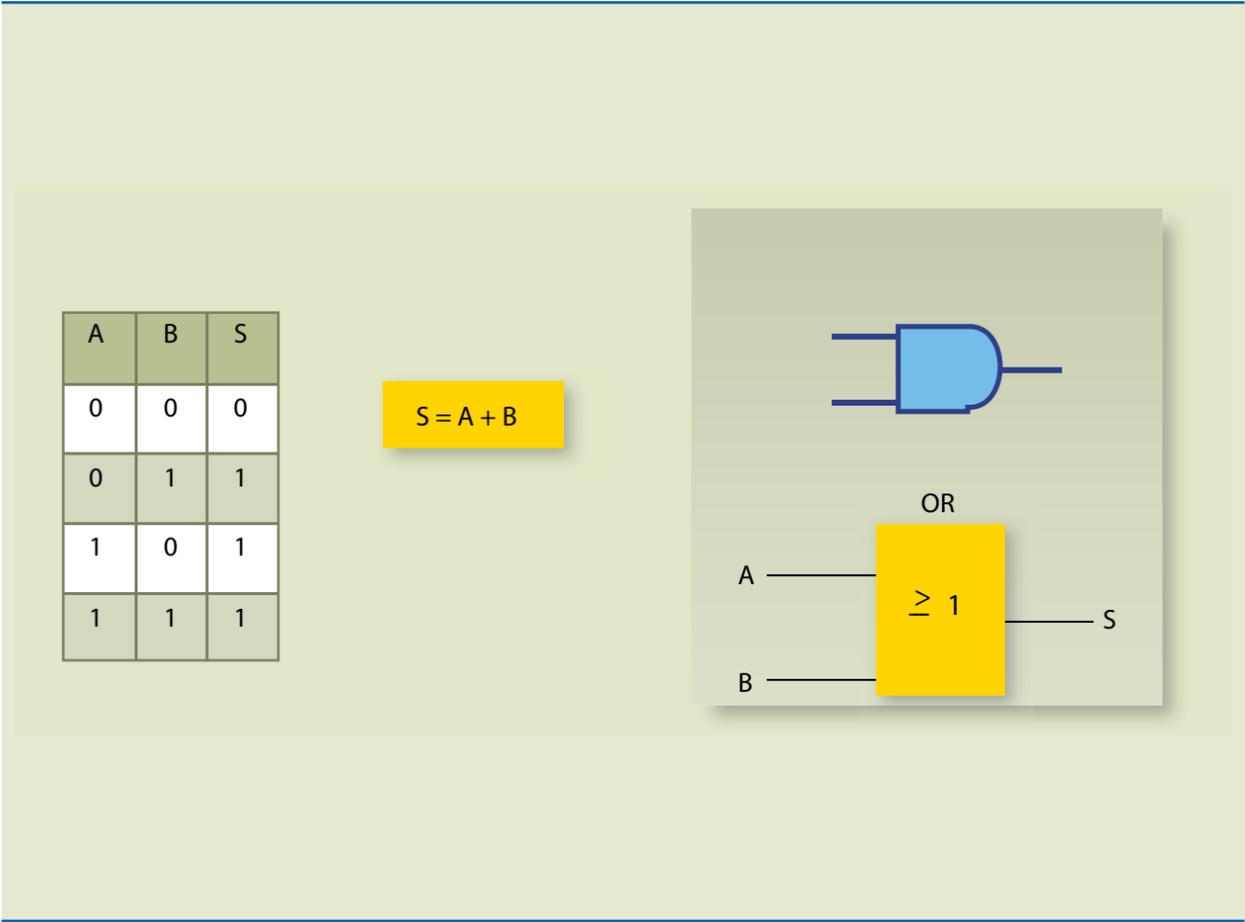


Figura 3.5
Tabela verdade, função e símbolos para a porta OU (ou OR).

3.5 Inversor ou operação NÃO (ou NOT)

A operação NOT, também denominada INVERSOR, é diferente das operações OR e AND pelo fato de ser possível realizá-la sobre uma única variável de entrada.

Para o circuito mostrado na figura 3.6, temos o seguinte funcionamento: quando a chave A está aberta, a lâmpada permanece acesa e, quando a chave A é fechada, a lâmpada apaga. Desse modo, a tabela verdade será a representada na figura 3.7.

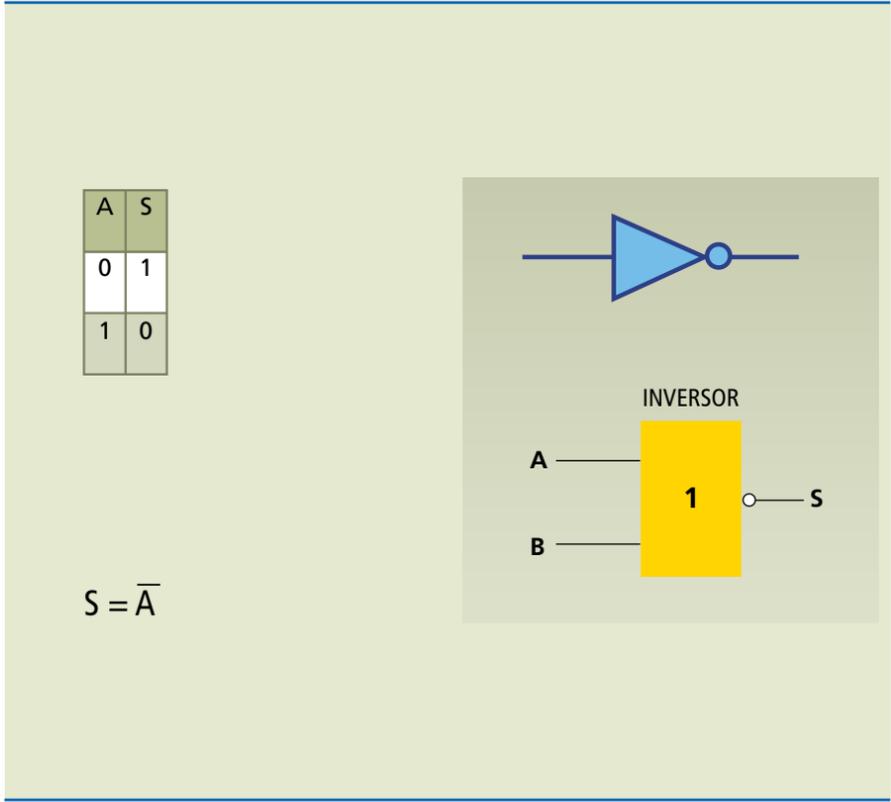


Figura 3.7
Tabela verdade, função e símbolos do inversor.

3.6 Porta NAND (NÃO E ou NE)

A operação da porta NAND é semelhante à da porta AND seguida de um INVERSOR (figura 3.8). A tabela verdade (figura 3.9) mostra que a saída da porta NAND é exatamente o inverso da porta AND para todas as condições possíveis de entrada.

Figura 3.6
Circuito para exemplificar o inversor.

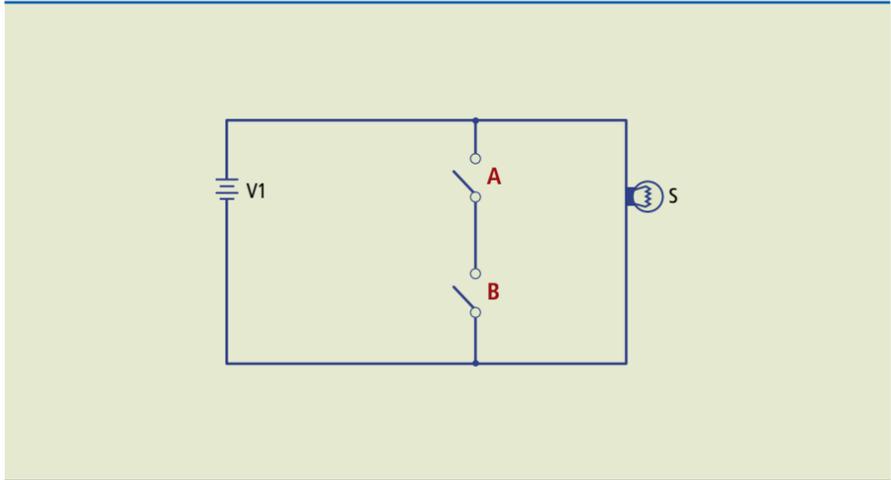
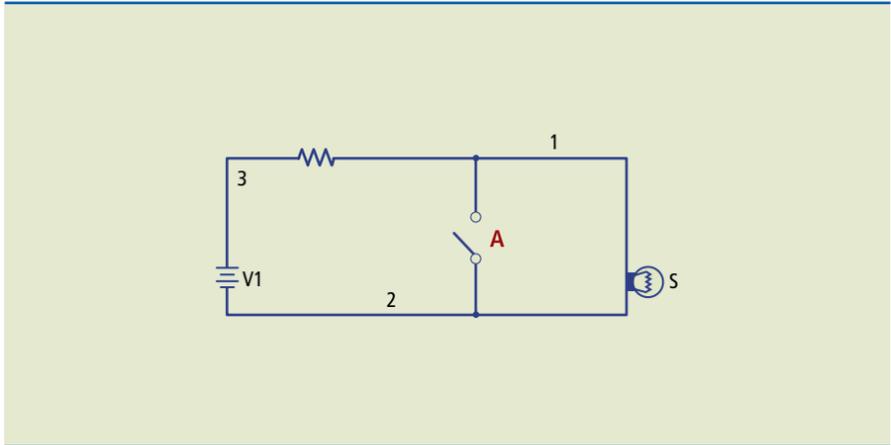


Figura 3.8
Circuito para exemplificar a porta NAND.

Figura 3.9

Tabela verdade, função, símbolo e alternativa para a porta NAND.

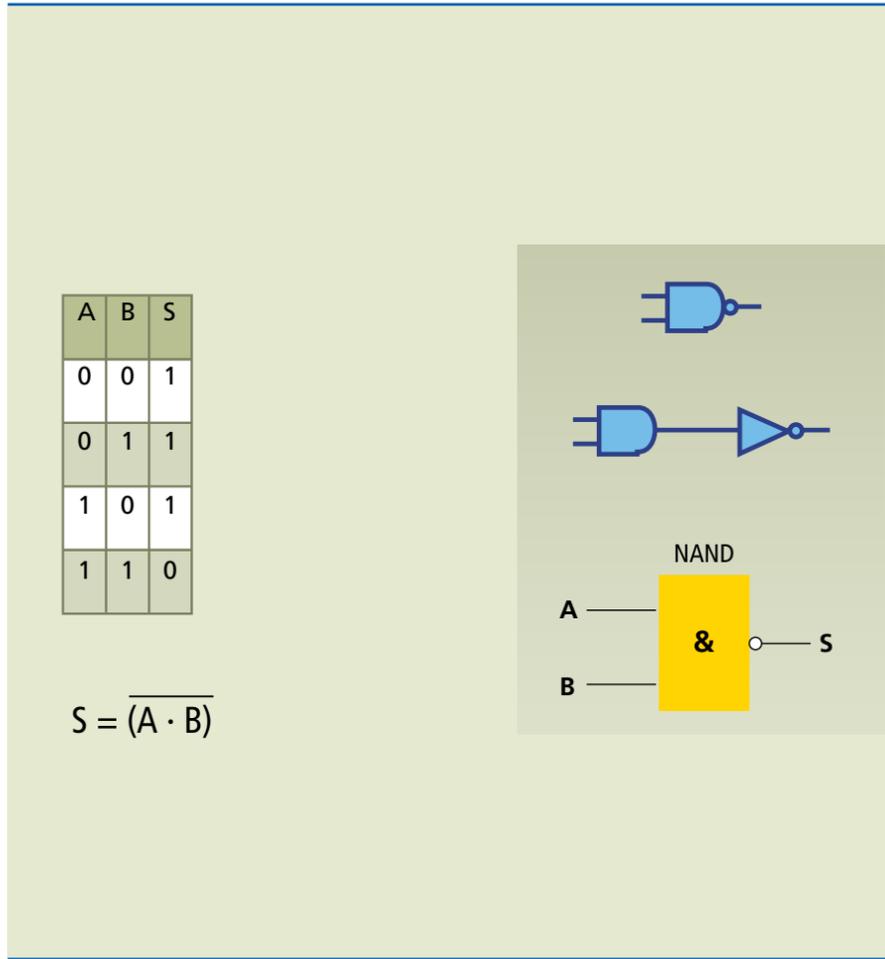
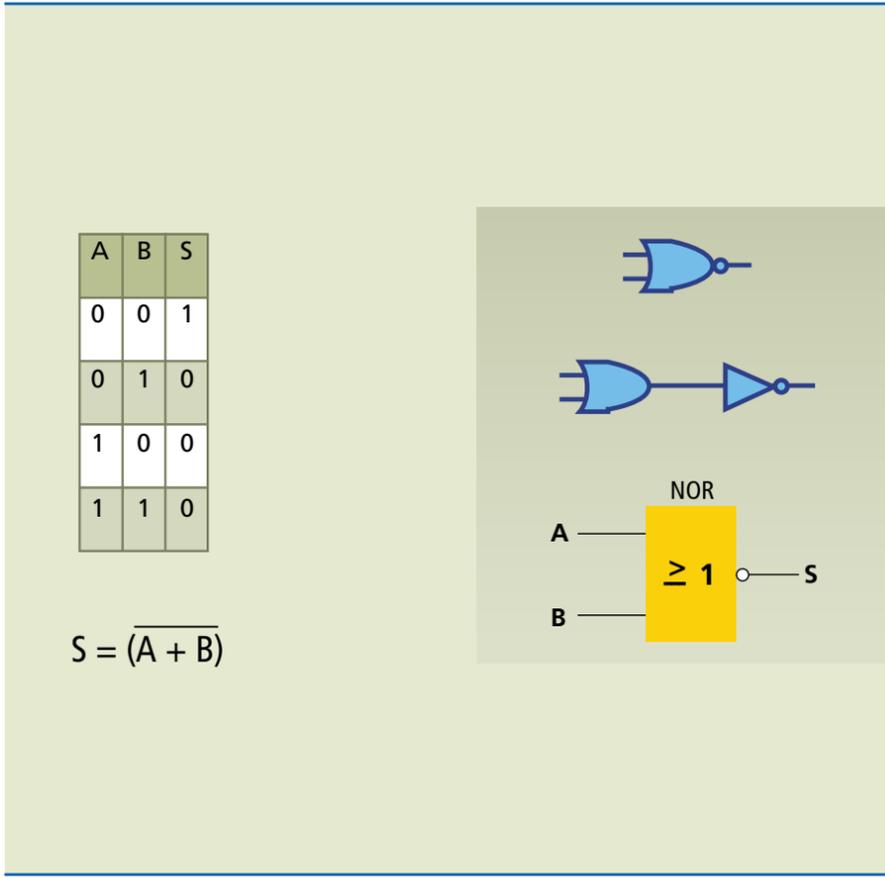


Figura 3.11

Tabela verdade, função, símbolo e alternativa para a porta NOR.

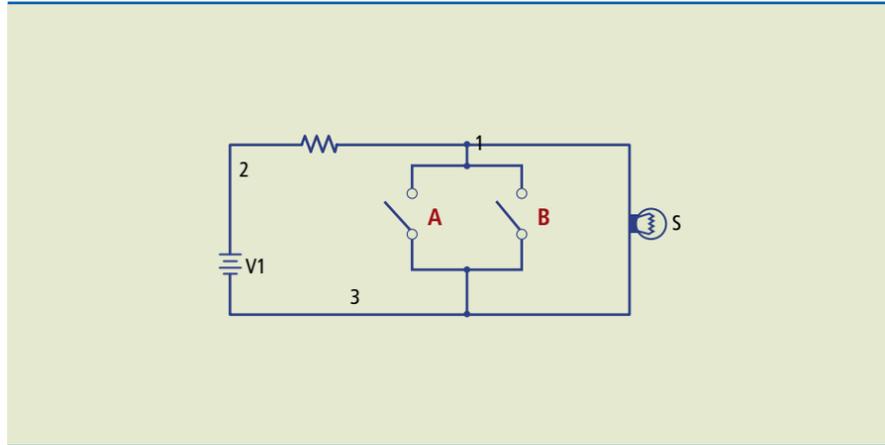


3.7 Porta NOR (NÃO-OU ou NOU)

A operação da porta NOR é semelhante à da porta OR seguida de um INVERSOR (figura 3.10). A tabela verdade (figura 3.11) mostra que a saída da porta NOR é exatamente o inverso da saída da porta OR, para todas as condições possíveis de entrada.

Figura 3.10

Circuito para exemplificar a porta NOR.



3.8 Implementando circuitos e tabela-resumo

Com o conhecimento desses blocos, ou portas lógicas, é possível implementar circuitos lógicos e obter a expressão booleana da saída, como no exemplo da figura 3.12.

$S = A \cdot B + A \cdot C$ (expressão booleana da saída)

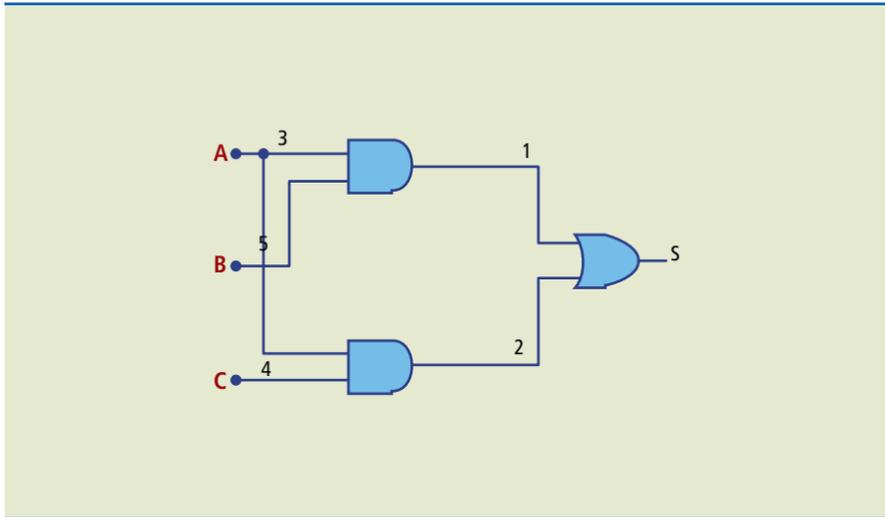


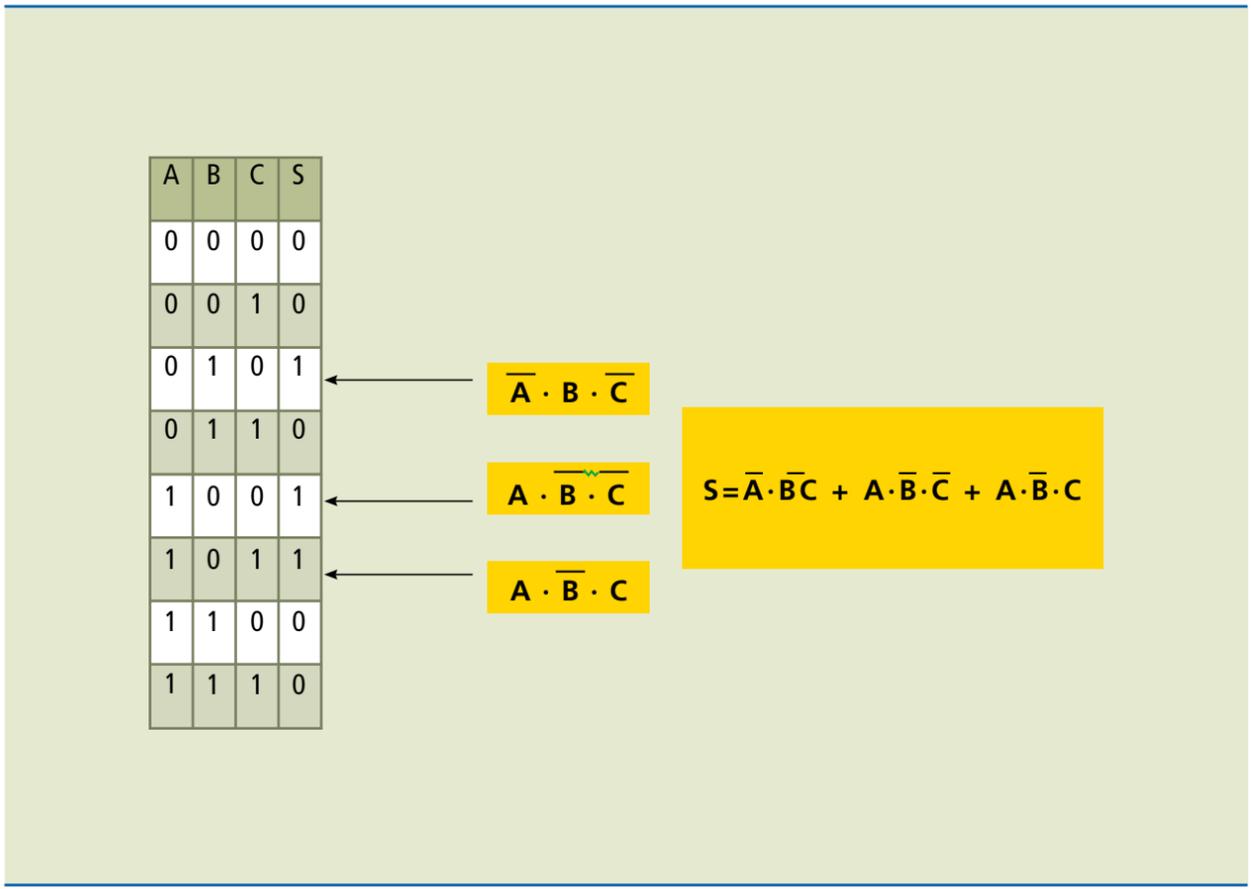
Figura 3.12

Exemplo de circuito lógico.

É possível determinar a expressão booleana com base na tabela verdade. Para tanto, os seguintes passos devem ser seguidos:

- marcar as saídas que estão com nível lógico igual a 1;
- escrever a combinação das variáveis de entrada para essa saída; ou
- escrever a outra combinação que possui nível lógico igual a 1.

Figura 3.13
Tabela verdade e expressão booleana correspondente.



A tabela 3.1 traz um resumo prático com os símbolos empregados, a tabela verdade, a expressão booleana e o comando elétrico correspondente.

PORTA	SÍMBOLO ISO	SÍMBOLO DIN	TABELA VERDADE	EXPRESSÃO BOOLEANA	COMANDO ELÉTRICO															
E		 AND $\&$	<table border="1"> <thead><tr><th>A</th><th>B</th><th>S</th></tr></thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	A	B	S	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	$S = A \cdot B$	
A	B	S																		
0	0	0																		
0	1	0																		
1	0	0																		
1	1	1																		
OU		 OR ≥ 1	<table border="1"> <thead><tr><th>A</th><th>B</th><th>S</th></tr></thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	A	B	S	0	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1	$S = A + B$	
A	B	S																		
0	0	0																		
0	1	1																		
1	0	1																		
1	1	1																		
NÃO		 INVERSOR 1	<table border="1"> <thead><tr><th>A</th><th>S</th></tr></thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>1</td></tr> </tbody> </table>	A	S	0	1	$S = \overline{A}$												
A	S																			
0	1																			
NE		 NAND $\&$	<table border="1"> <thead><tr><th>A</th><th>B</th><th>S</th></tr></thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	A	B	S	0	0	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0	$S = A \cdot B$	
A	B	S																		
0	0	1																		
0	1	1																		
1	0	1																		
1	1	0																		
NOU		 NOR ≥ 1	<table border="1"> <thead><tr><th>A</th><th>B</th><th>S</th></tr></thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> </tbody> </table>	A	B	S	0	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	$S = A + B$	
A	B	S																		
0	0	1																		
0	1	0																		
1	0	0																		
1	1	0																		

Tabela 3.1
Resumo de símbolos, tabela verdade, expressão booleana e comando elétrico correspondente

3.9 Minimização de expressões booleanas pelo uso dos mapas de Karnaugh

O mapa Veitch-Karnaugh, ou mapa de Karnaugh, como é mais conhecido, é um método gráfico usado para simplificar uma equação lógica ou converter uma tabela verdade em seu circuito lógico correspondente, de forma simples e metódica. Embora o mapa de Karnaugh possa ser usado em problemas que envolvam qualquer número de variáveis de entrada, sua utilidade prática está limitada a cinco ou seis variáveis. A figura 3.14 mostra a representação do mapa de Karnaugh para duas e quatro variáveis.

Cada quadrado recebe o nome de célula, e a quantidade de células é definida pelo número de combinações das variáveis do sistema, ou seja, se são quatro variáveis, então $2^4 = 16$ células.

Uma vez que se tenham as combinações de uma ou mais saídas de uma tabela verdade, podem-se dispor tais valores nos mapas de Karnaugh de modo a obter a expressão simplificada. Como exemplo, na figura 3.15, é utilizada uma expressão com quatro variáveis.

Figura 3.14
Mapa de Karnaugh de duas e de quatro variáveis.

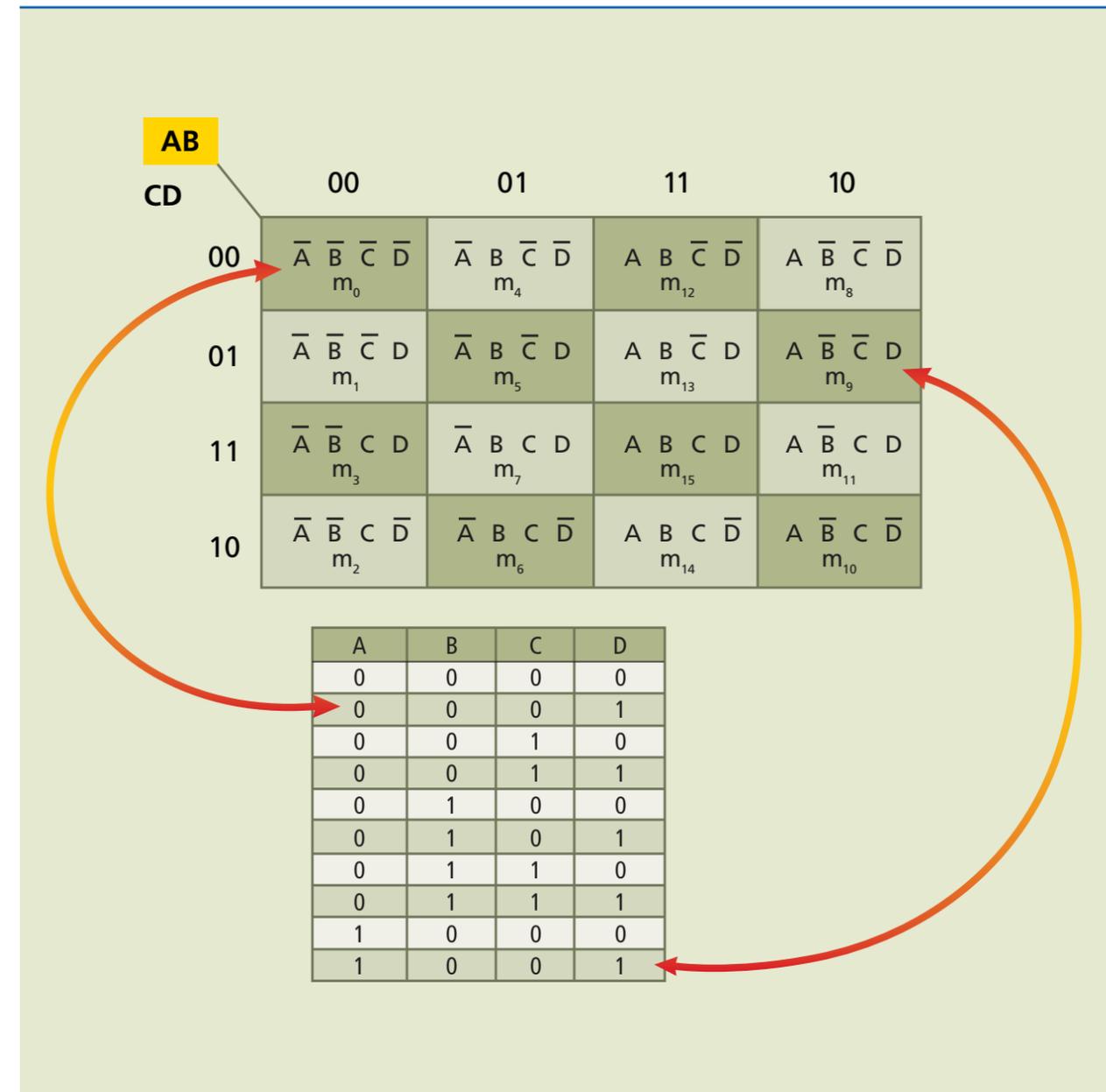
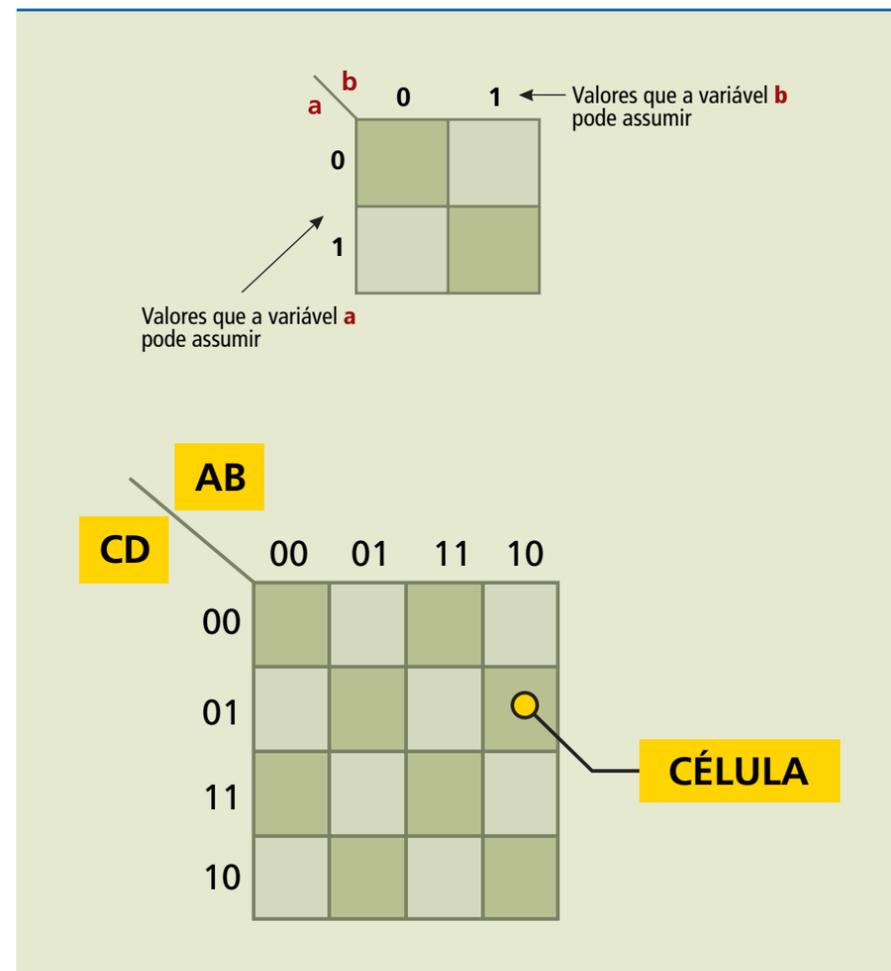


Figura 3.15
Exemplo com quatro variáveis

3.9.1 Regras para a simplificação de mapas K (de Karnaugh)

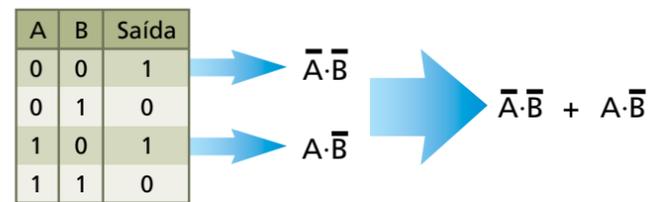
Normalmente são utilizadas as expressões geradas pelo método da soma de produtos para a simplificação dos mapas K. Tais expressões são representadas conforme exemplo a seguir:

$$S = \bar{A} \cdot B \cdot C + A \cdot \bar{B} \cdot \bar{C} + A \cdot \bar{C}$$

A expressão acima forma uma soma de produtos, que é diferente do exemplo a seguir que representa o produto de somas:

$$S = (\bar{A} + B + C) \cdot (A \cdot \bar{B})$$

Para obter o equivalente da soma de produtos, basta utilizar a lógica E para as linhas iguais a 1 e unir todas por meio da lógica OU na(s) saída(s) da tabela verdade em análise, conforme exemplo:



Em qualquer mapa K, as **células adjacentes** sempre **apresentam uma única variação de estado** em **uma única variável do termo**, ou seja, saindo de A para o complemento de A e vice-versa. Isso ocorre com todas as variáveis envolvidas, obtendo-se a combinação total.

Para facilitar a metodologia de simplificação do mapa K, seguem algumas etapas:

- representa-se a função no mapa inserindo o número 1 nas células que representem algum termo da expressão booleana obtida da saída desejada;
- as células iguais a 1, desde que adjacentes, devem ser agrupadas seguindo a potência de base 2: 1, 2, 4, 8, ... ;
- os grupos de células devem ter a forma quadrada ou retangular;
- uma célula pode fazer parte de mais de um grupo, porém um grupo não deve ter todas as suas células utilizadas em outros grupos, pois nesse caso haveria redundância e descaracterizaria a capacidade de simplificação do mapa K;
- sempre devem ser procurados, inicialmente, grupos com 2^{N-1} células e posteriormente 2^{N-2} até 2^0 , sendo N o número de variáveis na tabela verdade.

A seguir, nas figuras 3.16, 3.17 e 3.18, são apresentados exemplos de mapa K de duas, três e quatro variáveis.

Figura 3.16

Mapa K de duas variáveis.

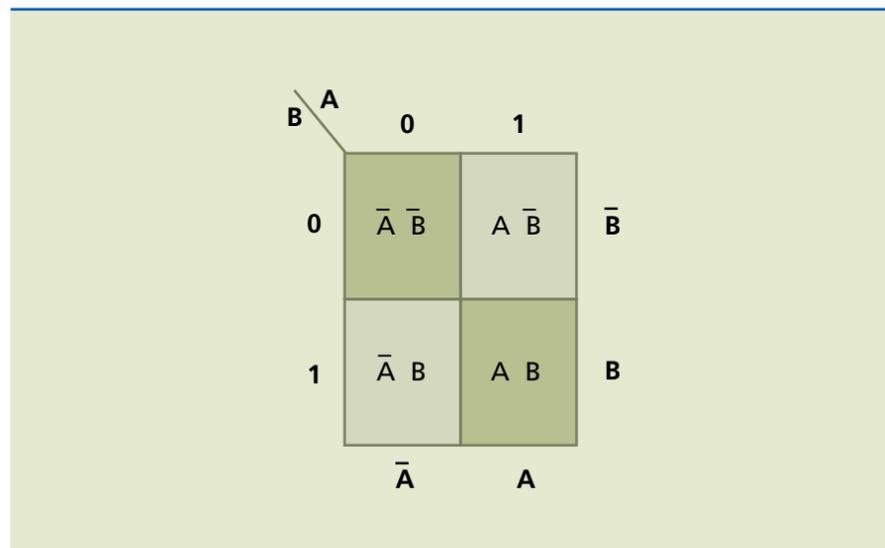


Figura 3.17

Mapa K de três variáveis.

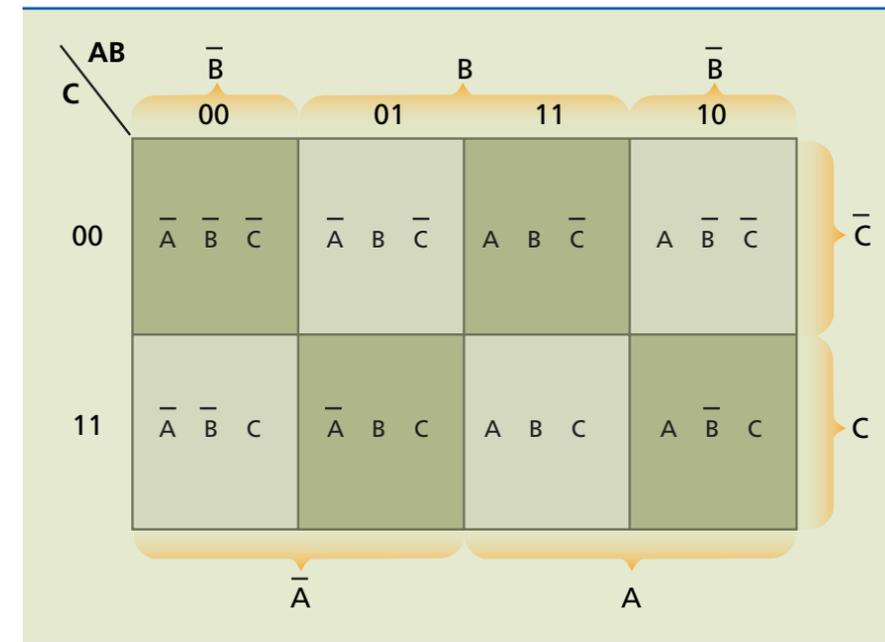
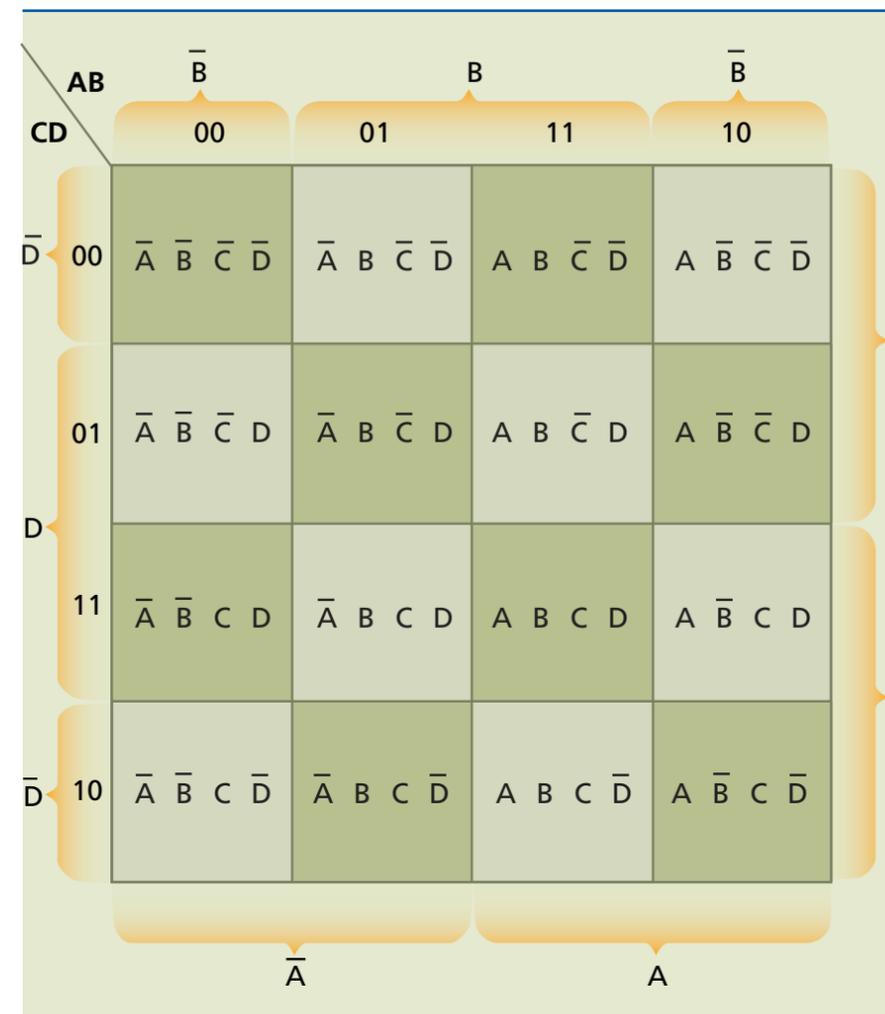


Figura 3.18

Mapa K de quatro variáveis.



Problema resolvido

Montar um dispositivo lógico de quatro chaves que só deve ser acionado quando a maioria das chaves for acionada.

Solução:

O primeiro passo é a montagem da tabela verdade (figura 3.19).

Figura 3.19

Tabela verdade.

CHAVES					
A	B	C	D	S	
0	0	0	0	0	
0	0	0	1	0	
0	0	1	0	0	
0	0	1	1	0	
0	1	0	0	0	
0	1	0	1	0	
0	1	1	0	0	
0	1	1	1	1	$\rightarrow S = \bar{A} \cdot B \cdot C \cdot D$
1	0	0	0	0	
1	0	0	1	0	
1	0	1	0	0	
1	0	1	1	1	$\rightarrow S = A \cdot \bar{B} \cdot C \cdot D$
1	1	0	0	0	
1	1	0	1	1	$\rightarrow S = A \cdot B \cdot \bar{C} \cdot D$
1	1	1	0	1	$\rightarrow S = A \cdot B \cdot C \cdot \bar{D}$
1	1	1	1	1	$\rightarrow S = A \cdot B \cdot C \cdot D$

Assim, chegamos à expressão não simplificada:

$$S = \bar{A}BCD + A\bar{B}CD + AB\bar{C}D + ABC\bar{D} + ABCD$$

Colocamos, então, os valores “1” da saída S no mapa de Karnaugh (figura 3.20) e marcamos os grupos de dois “1s”, nesse caso.

Figura 3.20

Mapa de Karnaugh.

CD \ AB	AB			
	00	01	11	10
00	0	0	0	0
01	0	0	1	0
11	0	1	1	1
10	0	0	1	0

Com o mapa de Karnaugh, chegamos à seguinte expressão, já simplificada:

$$S = ABD + BCD + ACD + ABC$$

Note que essa expressão possui um termo a menos que a expressão não simplificada, e cada termo tem uma variável a menos que na expressão anterior.

Referências bibliográficas

ALBUQUERQUE, Rômulo Oliveira. *Análise de circuitos em corrente contínua*. São Paulo: Editora Érica.

COTRIM, Ademaro A. M. B. *Instalações elétricas*. 5ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009.

FONSECA, Celso Suckow da. *Acionamentos elétricos. Apostila*. Rio de Janeiro: CEFET.

FOWLER, Richard J. *Eletricidade: Princípios e aplicações*. Tradução: José Mariano Gonçalves Lana. Revisão técnica Antonio Pertence Jr. São Paulo: Makron, McGraw-Hill, 1992.

FRANCHI, Cleiton Moro. *Acionamentos elétricos*. 1ª ed. São Paulo: Editora Érica, 2007.

GUSSOW, Milton. *Eletricidade básica*. Tradução: Aracy Mendes da Costa. 2ª ed. rev. e ampl. São Paulo: Makron Books, 1996.

KOSOW, Irving I. *Máquinas elétricas e transformadores*. 14ª ed. São Paulo: Globo, 2000.

MAMEDE FILHO, João. *Instalações elétricas Industriais*. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

MARTINS, Nelson. *Introdução à teoria da eletricidade e do magnetismo*. 2ª ed. Rio de Janeiro: Edgard Blücher, 1975.

OLIVEIRA, Edson Carlos Peres de; DIAS, Jean Carlos. “Rendimento nos motores monofásicos” em WEG em Revista.

PROCOBRE & SCHNEIDER ELETRIC. “Eficiência energética e acionamento de motores”. Workshop realizado pelo engenheiro Ricardo P. Tamietti.

SILVA FILHO, Matheus T. *Fundamentos de eletricidade*. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

SILVA, Edilson A. da. *Considerações sobre instalações de inversores de frequência*. Mato Grosso: CEFET, 2006.

TOCCI, Ronald J.; WIDMER, Neal S. *Sistemas digitais: Princípios e aplicações*. Tradução: José Lucimar do Nascimento. 8 ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2003.

CATÁLOGOS

SANTERNO INDL. E COML. DO BRASIL LTDA. *Manual de utilização do inversor VEGA LE-100 – 2002*.

TELEMECANIQUE. *Manual de operação do Inversor Altivar 18*.

TOSHIBA. *Catálogo do inversor TOSVERT modelo VF-AS1*.

WEG. *Motores elétricos de corrente alternada – Especificação; Características elétricas*.

WEG. *Motores elétricos de corrente alternada – Man-motores*. WEG. *Contatores e relés de sobrecarga – Catálogo*.

WEG. *Catálogo para fusíveis*.

WEG. *Temporizadores e protetores – Catálogo*.

WEG. *Manual da soft-starter SSW-04 versão V3.XX*

WEG. *Módulo 2 – Variação de velocidade*.

SITES

www.schneider-electric.com.br

www.feiradeciencias.com.br

www.dsee.fee.unicamp.br/~sato/ET515/node68.html

<http://www.ufsm.br/desp/luizcarlos/aula2of2.pdf>

CENTRO PAULA SOUZA DO GOVERNO DE SÃO PAULO





Excelência no ensino profissional

Administrador da maior rede estadual de educação profissional do país, o Centro Paula Souza tem papel de destaque entre as estratégias do Governo de São Paulo para promover o desenvolvimento econômico e a inclusão social no Estado, na medida em que capta as demandas das diferentes regiões paulistas. Suas Escolas Técnicas (Etecs) e Faculdades de Tecnologia (Fatecs) formam profissionais capacitados para atuar na gestão ou na linha de frente de operações nos diversos segmentos da economia.

Um indicador dessa competência é o índice de inserção dos profissionais no mercado de trabalho. Oito entre dez alunos formados pelas Etecs e Fatecs estão empregados um ano após concluírem o curso. Além da excelência, a instituição mantém o compromisso permanente de democratizar a educação gratuita e de qualidade. O Sistema de Pontuação Acrescida beneficia candidatos afrodescendentes e oriundos da Rede Pública. Mais de 70% dos aprovados nos processos seletivos das Etecs e Fatecs vêm do ensino público.

O Centro Paula Souza atua também na qualificação e requalificação de trabalhadores, por meio do Programa de Formação Inicial e Educação Continuada. E ainda oferece o Programa de Mestrado em Tecnologia, recomendado pela Capes e reconhecido pelo MEC, que tem como área de concentração a inovação tecnológica e o desenvolvimento sustentável.