

# Mecânica

Habilitação técnica em

Mecânica

4

## Automação

CENTRO PAULA SOUZA

GOVERNO DE  
SÃO PAULO



**CENTRO PAULA SOUZA DO GOVERNO DE SÃO PAULO**



CENTRO PAULA SOUZA



# Mecânica

**Volume 4**



CENTRO PAULA SOUZA



# Mecânica

## Automação

Maria Leonor Reis Vianna  
(autora)

Edvaldo Angelo  
Gabriel Angelo  
(coautores)



2011

**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  
**Autora:** Maria Leonor Reis Vianna  
**Coautores:** Edvaldo Angelo, Gabriel Angelo  
**Revisão técnica:** Evaldo Silva, Mauro Gomes da Silva  
**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  
**Revisão:** Conexão Editorial  
**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 Silvia Marques CRB 8/7377)**

S586

Vianna, Maria Leonor Reis  
Mecânica: automação / Maria Leonor Reis Vianna (autora); Edvaldo Angelo, Gabriel Angelo (coautores); Evaldo Silva, Mauro Gomes da Silva (revisores); Meire Satiko Fukusawa Yokota (coordenadora). -- São Paulo: Fundação Padre Anchieta, 2011 (Coleção Técnica Interativa. Série Mecânica, v. 4)

Manual técnico Centro Paula Souza

ISBN 978-85-8028-042-5

I. Mecânica. 2. Automação. I. Angelo, Edvaldo. II. Angelo, Gabriel. III. Silva, Evaldo. IV. Silva, Mauro Gomes da. V. Yokota, Meire Satiko Fukusawa. VI. Título

CDD 607

**GOVERNADOR**  
Geraldo Alckmin

**VICE-GOVERNADOR**  
Guilherme Afif Domingos

**SECRETÁRIO DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**  
Paulo Alexandre Barbosa

**CENTRO PAULA SOUZA** 

**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 Melquiades 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

# Sumário

## 19 Capítulo I Hidrostática

I.1 O que é fluido.....	21
I.2 Massa específica .....	21
I.3 Pressão .....	24
I.3.1 Pressão atmosférica .....	25
I.3.2 Escalas de pressão .....	27
I.3.3 Distribuição de pressão em um fluido estático .....	27
I.3.4 Medidor de pressão atmosférica .....	31
I.4 Princípio de Arquimedes, “o empuxo” .....	32

## 37 Capítulo 2 Hidrodinâmica

2.1 Escoamento: regime permanente versus regime não permanente.....	38
2.2 Vazão em volume e velocidade .....	39
2.2.1 Determinação da velocidade utilizando a vazão em volume.....	40
2.3 Equação da conservação da massa ou equação da continuidade .....	41
2.4 Equação de Bernoulli .....	42
2.5 Bombas hidráulicas.....	46
2.5.1 Bombas hidrodinâmicas e hidrostáticas... .	47
2.5.2 Eficiência volumétrica.....	48
2.6 Alguns tipos de bombas hidráulicas.....	48
2.6.1 Classificação das bombas hidráulicas, segundo o deslocamento .....	48
2.7 Perda de carga .....	54
2.7.1 Perda de carga distribuída .....	55

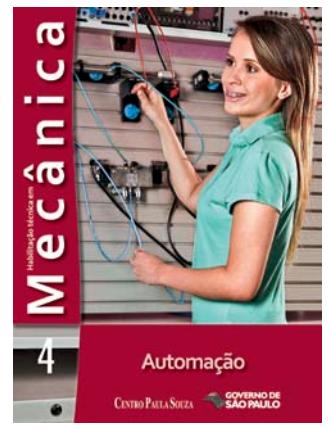
LISOVSKAYA NATALIA/SHUTTERSTOCK



2.7.2 A perda de carga localizada ou singular.....	55
2.7.3 Experimento de Reynolds e os escoamentos viscosos.....	56
2.7.4 Equacionamento da perda de carga .....	58

## 63 Capítulo 3 Princípios básicos de Termodinâmica

3.1 Primeira lei da Termodinâmica.....	64
3.1.1 Calor específico .....	65
3.2 Segunda lei da Termodinâmica.....	66
3.2.1 Processos básicos pelos quais ocorrem transferências de calor .....	68
3.3 Gás ideal ou gás perfeito .....	69
3.3.1 Equação de estado para um gás ideal ou equação dos gases perfeitos.....	69
3.3.2 Processos particulares para um gás ideal .	70
3.4 Mudanças de estado físico .....	71
3.4.1 Vapor e considerações sobre os estados da matéria .....	72
3.4.2 Região de saturação líquido-vapor.....	74
3.5 Caldeiras.....	75
3.5.1 Tipos de caldeiras.....	77
3.5.2 Outras classificações de caldeiras .....	82
3.5.3 Componentes de uma caldeira .....	83
3.5.4 Tratamento da água para as caldeiras .. .	88
3.5.5 Aspectos legais relacionados à segurança operacional .....	88
3.6 Trocadores de calor.....	90
3.6.1 Classificação dos trocadores de calor .. .	91



**Capa:** Marina Morales  
Baptista, aluna do Centro  
Paula Souza  
**Foto:** Eduardo Pozella e  
Carlos Piratininga

# Sumário

## 95 Capítulo 4

### Hidráulica

4.1 Aplicações da hidráulica .....	96
4.2 Manômetros utilizados na hidráulica .....	98
4.2.1 Manômetro de Bourdon .....	98
4.2.2 O manômetro de núcleo móvel .....	100
4.3 Multiplicação de força, princípio da prensa hidráulica. ....	100
4.4 Fluido hidráulico .....	104
4.4.1 Fluido à base de petróleo .....	104
4.5 Potência versus eficiência em sistemas hidráulicos.....	105
4.5.1 Cavitação .....	106
4.6 Elementos hidráulicos.....	107
4.6.1 Grupo de acionamento e reservatório hidráulico.....	107
4.6.2 Resfriadores .....	109
4.6.3 Filtros hidráulicos .....	111
4.6.4 Tipos de filtragem.....	112
4.6.5 Cadeia de comandos .....	115
4.6.6 Válvulas de controle de pressão .....	119
4.6.7 Identificação de válvula de controle direcional.....	126
4.6.8 Acumuladores hidráulicos .....	134
4.6.9 Símbologia hidráulica .....	136
4.7 Circuitos hidráulicos práticos.....	141



## 151 Capítulo 5

### Pneumática

5.1 Filtro de ar comprimido .....	154
5.2 Regulador de pressão.....	155
5.3 Lubrificador de ar comprimido .....	155
5.4 Unidade de condicionamento.....	156
5.5 Compressores de ar.....	156
5.5.1 Compressores de deslocamento positivo. ....	156
5.5.2 Compressores de deslocamento dinâmico .....	156
5.5.3 Tipos de compressores .....	156
5.5.4 Vazão de ar dos compressores .....	161
5.5.5 Regulagem e acionamento dos compressores.....	161
5.5.6 Lugar de montagem dos compressores..	162
5.5.7 Manutenção do compressor .....	162
5.5.8 Refrigeração dos compressores.....	162
5.6 Reservatório de ar comprimido.....	163
5.7 Rede de distribuição do ar comprimido .....	164
5.7.1 Rede de distribuição em circuito aberto .	165
5.7.2 Rede de distribuição em circuito fechado .	166
5.7.3 Rede de distribuição combinada.....	166
5.8 Elementos pneumáticos .....	167
5.8.1 Cadeia de comando .....	167
5.8.2 Válvula redutora de fluxo variável com retenção .....	168
5.8.3 Válvulas limitadoras de pressão.....	168
5.8.4 Válvula alternadora (função lógica “OU”)	169



SHUTTERSTOCK

# Sumário

5.8.5 Válvula de simultaneidade (função lógica “E”) .....	169
5.9 Atuadores pneumáticos .....	169
5.9.1 Válvulas direcionais pneumáticas .....	172
5.9.2 Comandos das válvulas direcionais .....	175
5.10 Circuitos pneumáticos práticos .....	176
<b>183 Capítulo 6</b> <b>Sistemas eletropneumáticos</b>	
6.1 Alimentação .....	185
6.1.1 Contatos NA (normal aberto), NF (normal fechado) e comutador .....	185
6.1.2 Instrumentos de medição.....	186
6.1.3 Tipos de ligação .....	186
6.1.4 Codificação e norma.....	186
6.1.5 Representação de elementos de acionamento .....	187
6.2 Componentes dos circuitos elétricos .....	187
6.2.1 Botoeiras .....	187
6.3 Sensores .....	189
6.3.1 Sensores de proximidade.....	189
6.3.2 Simbologia dos sensores .....	191
6.4 Elementos de processamento de sinais .....	192
6.4.1 Relés auxiliares .....	192
6.4.2 Circuito temporizado.....	193
6.4.3 Circuito com contagem de eventos.....	193
6.4.4 Pressostato .....	194
6.4.5 Solenoide .....	195
6.5 Circuitos eletropneumáticos .....	195
6.5.1 Método intuitivo.....	196
6.5.2 Método passo a passo .....	204
6.5.3 Método cascata .....	205
6.5.4 Métodos sistemáticos.....	210
6.5.5 Método de sequência máxima.....	211
6.5.6 Método de sequência mínima .....	211
6.5.7 Sequência máxima com cadeia estacionária.....	212
6.5.8 Sinalizadores.....	212
6.5.9 Exemplos de circuitos eletropneumáticos	215
<b>219 Capítulo 7</b> <b>Eletro-hidráulica</b>	
7.1 Válvula solenoide de 4/2 vias .....	220
7.2 Válvula solenoide de 4/3 vias .....	221
7.3 Comandos eletro-hidráulicos sequenciais .....	222
7.3.1 Método intuitivo .....	222
7.3.2 Método sistemático .....	223
7.3.3 Simbologia elétrica básica .....	229
<b>231 Capítulo 8</b> <b>Controladores lógicos programáveis</b>	
8.1 Estruturação de um CLP .....	233
8.1.1 Microprocessador.....	234
8.1.2 Memória .....	234
8.1.3 Terminal de programação.....	235
8.1.4 Fonte de alimentação .....	235
8.1.5 Componentes de entradas e saídas .....	235



V.J. MATTHEW/SHUTTERSTOCK

# Sumário

8.2 Interface homem-máquina .....	237
8.2.1 Interface para comunicação em rede ..	238
8.2.2 Princípio de funcionamento de um CLP .	238
8.2.3 Recursos dos softwares .....	240
8.3 Linguagem de programação .....	240
8.3.1 Programação em Ladder .....	242
8.3.2 Algumas instruções básicas .....	246
8.4 Exercício para fixação de conceito .....	249

## 251 Capítulo 9 Comandos eletropneumáticos com CLP

9.1 Atuador comandado por válvula atuada por duas solenoides .....	252
9.2 Atuador comandado por válvula atuada por simples solenoide .....	253
9.3 Recuo do atuador com temporização .....	255
9.4 Circuito com dupla temporização e contagem .	255
9.5 Circuito com dois atuadores em uma linha de produção.....	257

## 259 Capítulo 10 Comandos elétricos com CLP

10.1 Comandos elétricos .....	260
10.2 Contatores .....	260
10.3 Símbolos gráficos .....	261
10.4 Símbolos literais .....	263
10.5 Sistemas de acionamento, segurança e proteção.....	263

10.5.1 Selo .....	263
10.5.2 Intertravamento .....	264
10.5.3 Ligação condicionada .....	264
10.5.4 Proteção do circuito.....	265
10.6 Diagrama elétrico .....	265
10.7 Aplicações dos comandos na partida de um motor .....	268
10.7.1 Diagrama elétrico para a partida de um motor .....	268
10.7.2 Aplicação do CLP para a partida de um motor .....	269
10.8 Aplicações dos comandos na reversão de um motor .....	269
10.8.1 Diagrama elétrico para a reversão de um motor.....	269
10.8.2 Aplicação do CLP para a reversão de um motor .....	270
10.9 Ligação estrela-triângulo.....	271
10.9.1 Aplicação do CLP para a partida estrela-triângulo .....	272

## 273 Capítulo 11 Sensores

II.1 Medição de temperatura.....	275
II.1.1 Elemento bimetálico .....	275
II.1.2 Elemento bulbo-capilar.....	276
II.1.3 Sensor por resistência elétrica.....	277
II.1.4 Termopar.....	279



© ROGER RESSMEYER/CORBIS/CORBIS (DC)/LATINSTOCK

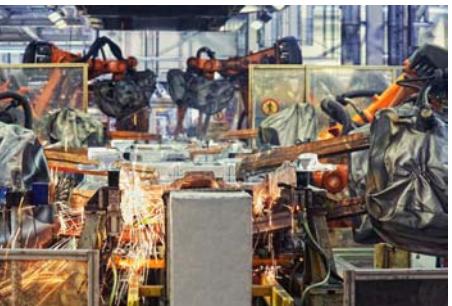


YOSHIKAZUTSUNO/ AFP PHOTO/GETTY IMAGES



© CANADARM2

# Sumário



NATALIYA HORA /SHUTTERSTOCK

II.2 Medição de nível .....	281
II.2.1 Medição por flutuadores.....	281
II.2.2 Medição por pressão .....	282
II.2.3 Medição por variação de propriedades elétricas .....	283
II.2.4 Medição de nível com utilização de diferentes propriedades .....	285
II.3 Medição de pressão .....	287
II.3.1 Medidores de pressão mecânicos.....	287
II.3.2 Medidores de pressão elétricos .....	288
II.4 Medidores de vazão .....	289
II.4.1 Medidores por pressão diferencial .....	289
II.4.2 Medidores volumétricos .....	291
II.4.3 Medidores eletromagnéticos .....	292
II.4.4 Medidores ultrassônicos .....	294
II.5 Controladores PID .....	294
II.5.1 Sistema de comando.....	295
II.5.2 Sistema de controle .....	295
II.5.3 Sistemas de controle automáticos contínuos. ....	296
I2.6 Robôs na agricultura.....	311
I2.7 Robôs nas minas e na construção civil.....	312
I2.8 Micromanipulador.....	313
I2.9 Robôs industriais.....	313
I2.10 Robô manipulador.....	315
I2.11 Como os robôs se movimentam .....	316
I2.12 Estrutura do robô.....	318
I2.13 Sensoreamento .....	320
I2.14 Dispositivos de entrada para manipuladores .	323
I2.15 Sistema de controle .....	323
I2.16 Robô cartesiano .....	325
I2.17 Robô SCARA .....	326
I2.17.1 Robô com braço articulado .....	327
I2.18 Graus de liberdade .....	327
I2.18.1 Espaço operacional. ....	328
I2.19 Programação de robôs .....	328

## 331 Glossário

## 337 Referências bibliográficas

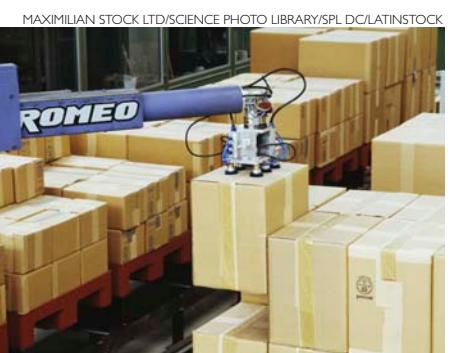


RISTESKI GOCE /SHUTTERSTOCK

## 303 Capítulo 12

### Introdução à robótica

I2.1 Robôs e medicina .....	305
I2.2 Robôs pessoais.....	306
I2.3 Robôs inteligentes .....	306
I2.4 Robôs precursores de um futuro próximo ...	307
I2.5 Gerações de robôs.....	309



MAXIMILIAN STOCK LTD/SCIENCE PHOTO LIBRARY/SPL DC/LATINSTOCK

# **Capítulo I**

## **Hidrostática**

---



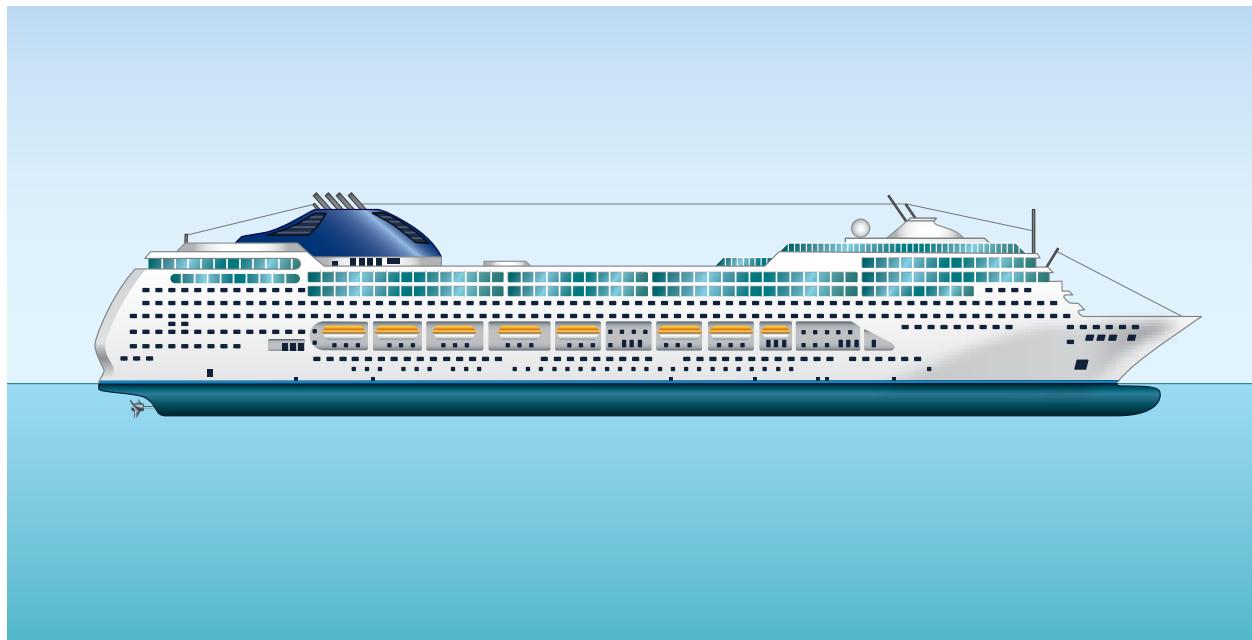


**O**que permite um navio flutuar é a força de empuxo. Essa força equilibra o peso do navio. A magnitude da força de empuxo é igual ao peso do fluido deslocado (esse volume deslocado, no caso do navio, corresponde ao volume submerso do casco). Toda vez que carga é acrescentada, o volume submerso aumenta e, com ele, a força de empuxo.

A descoberta do princípio do empuxo é atribuída a Arquimedes, inventor e matemático grego (282-212 a.C.).

“Eureka!” (que significa “achei”) foi o que Arquimedes teria gritado quando descobriu a força de empuxo. Diz a anedota que nesse momento, ao perceber a importância de sua descoberta, ele pulou da banheira e correu pelas ruas.

Hidrostática é a parte da Física que estuda os fluidos em repouso. Os efeitos de interesse, nesses casos, estão ligados à ação do fluido sobre si mesmo e também sobre elementos como superfícies sólidas, corpos submersos ou paredes de tanques.



## I.1 O que é fluido

Substâncias capazes de escoar quando submetida à ação de uma força são denominadas fluidos. A diferença entre um **fluido** e um sólido reside principalmente nas forças de atração molecular, chamadas forças de coesão, que ocorrem entre as moléculas de todos os tipos de substâncias. Nos sólidos, as forças de coesão são tão grandes que mantêm a forma dos corpos. Os líquidos têm forças de coesão menores que as dos sólidos e, por esse motivo, não têm forma definida. Nos gases, as forças de coesão são ainda menores do que nos líquidos. Em decorrência desse fato, os gases são agregados de moléculas amplamente espaçadas (nos líquidos o espaçamento é menor do que nos gases).

Exemplo típico é um copo contendo refrigerante. Se derramamos esse refrigerante sobre a mesa, ele fica totalmente espalhado sem estrutura geométrica regular definida ou ordenação clara. Outro exemplo é um balão de festa de aniversário, cheio de ar. Quando estoura, o ar do balão se mistura com o ar atmosférico, e não conseguimos identificar uma fronteira definida (porque ela de fato não existe).

## I.2 Massa específica

A massa específica de uma substância é a relação entre a massa **m** e seu volume **V**. É indicada pela letra do alfabeto grego **ρ** (leia “rô”):

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.1)$$

No Sistema Internacional (SI), as respectivas unidades de medida são: **m** em kg, **V** em m<sup>3</sup> e **ρ** em kg/m<sup>3</sup>.

A massa específica é uma propriedade da substância ligada à constituição atômica (os elementos são constituídos de átomos mais ou menos pesados) e às condições termodinâmicas (como a temperatura, que mede indiretamente a agitação molecular e a pressão, que por sua vez está relacionada ao grau de adensamento ou de compactação das moléculas).

Para exemplificarmos, basta pensarmos em um objeto de ferro e em outro de isopor, ambos de mesma forma, mesmo tamanho e na mesma temperatura. Como os elementos constituintes dos dois objetos têm massa molecular distinta, e as moléculas têm arranjos distintos, a densidade deles é diferente. Levantando um e outro podemos constatar que o “peso” deles é diferente.

É possível dizer que os corpos que possuem muita massa em pequeno volume têm grande densidade; em contrapartida, corpos que apresentam pequena densidade são mais “leves”.

A água possui massa específica de 998 kg/m<sup>3</sup> quando está a 20 °C. Há materiais muito mais densos, como o mercúrio líquido, que a 20 °C tem massa específica de 13 550 kg/m<sup>3</sup>.

**Fluido:** qualquer substância que pode fluir, escoar. Portanto, fluidos são os líquidos e os gases.

Comparativamente aos líquidos, os gases possuem densidade muito menor. Como exemplo, podemos citar o ar em condições atmosféricas normais (pressão de 1 atm e temperatura de 20 °C), que tem massa específica de aproximadamente 1,2 kg/m<sup>3</sup>.

É comum expressar a densidade em termos de densidade específica, cuja definição é a seguinte:

**A densidade específica** de um material é a razão de sua massa específica com a massa específica da água a 4 °C. (O valor da massa específica da água a 4 °C é de 1 000 kg/m<sup>3</sup>, e o valor de sua densidade específica na mesma temperatura é assumida como a unidade.)

É fácil entender a dependência da massa específica com a temperatura e pressão. Sabemos que, em geral, os materiais dilatam ou contraem em resposta a uma mudança de temperatura ou pressão, portanto, mudam a razão de sua massa por seu volume quando essas duas grandezas são alteradas.

### Exemplos

1. Determinar a massa de um cubo de ferro que tem arestas de 12 cm. A massa específica do ferro é de 7 800 kg/m<sup>3</sup>.

*Solução:*

O volume da forma cúbica pode ser determinado por:

$$V = \text{aresta}^3 = (0,12\text{ m})^3 = 0,001728\text{ m}^3$$

Utilizando a definição de massa específica (equação 1.1):

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \text{ou} \quad m = \rho V, \quad \text{temos:}$$

$$m = 7800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,001728\text{ m}^3 = 13,48\text{ kg}$$

2. Determinar a densidade do material da caixa com as seguintes dimensões externas: 20 cm de altura, 25 cm de comprimento e 12 cm de largura. A caixa é oca e suas paredes apresentam 1 cm de espessura (uniforme), possuindo massa de 3 kg. Não há tampa na caixa.

*Solução:*

O volume da caixa pode ser determinado pela diferença do volume de um cubo com as dimensões externas da caixa e a dimensão da parte interna (oca e também cúbica). Desse modo:

$$\text{Volume externo} = V_{\text{externo}} = (0,20\text{ m} \cdot 0,25\text{ m} \cdot 0,12\text{ m}) = 0,006\text{ m}^3$$

$$\text{Volume interno} = V_{\text{interno}} = (0,19\text{ m} \cdot 0,23\text{ m} \cdot 0,10\text{ m}) = 0,00437\text{ m}^3 \quad [\text{oco}]$$

$$\text{Volume da caixa} = V_{\text{caixa}} = 0,006\text{ m}^3 - 0,00437\text{ m}^3 = 0,00163\text{ m}^3$$

Utilizando a equação 1.1:

$$\rho = \frac{3\text{ kg}}{0,00163\text{ m}^3} = 1840,5\text{ kg/m}^3$$

Alternativamente, a resposta poderia ter sido fornecida em g/cm<sup>3</sup>, pela seguinte transformação (lembrando que 1 kg = 1 000 g e 1 m = 100 cm):

$$\begin{aligned} \rho &= 1840,5 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1840,5 \frac{1\text{kg}}{(1\text{m})^3} = \\ &= 1840,5 \frac{1000\text{g}}{100^3\text{cm}^3} = 1,84\text{ g / cm}^3 \end{aligned}$$

3. Uma esfera oca, de 1 000 g de massa, possui raio externo de 8,0 cm e raio interno de 7,0 cm. Determinar a massa específica da esfera. O volume de uma esfera maciça de raio R é dado por:

$$V = \frac{4}{3}\pi R^3$$

*Solução:*

Utilizando a mesma técnica empregada no exemplo 2, o volume de uma esfera maciça (com raio externo igual a 8 cm) é diminuído do volume correspondente ao espaço vazio no interior da esfera de interesse (também esférico e com raio de 7 cm). Nesse exemplo, usaremos os volumes em cm<sup>3</sup>. Conforme descrito:

$$V_{\text{esfera oca}} = V_{\text{esfera maciça}} - V_{\text{vazio}}$$

$$V_{\text{esfera oca}} = \frac{4}{3}\pi \cdot (8\text{ cm})^3 - \frac{4}{3}\pi \cdot (7\text{ cm})^3 = 707,9\text{ cm}^3$$

A massa específica da esfera pode então ser determinada:

$$\rho = \frac{1000\text{ g}}{707,9\text{ cm}^3} = 1,413 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

A resposta também poderia ter sido fornecida em unidades do SI:

$$\rho = 1,413 \frac{g}{cm^3} = 1,413 \cdot \frac{1g}{(1cm)^3} = 1,413 \cdot \frac{\left(\frac{1}{1000} kg\right)}{\left(\frac{1}{100} m\right)^3} = 1413 kg/m^3$$

### 1.3 Pressão

O conceito de pressão nos permite entender muito dos fenômenos físicos que nos rodeiam. A pressão é capaz de explicar, por exemplo, o motivo pelo qual uma faca corta facilmente um pedaço de carne usando o lado afiado da lâmina, e não obtém o mesmo efeito com o lado oposto, sem corte.

A pressão é o quociente entre a força normal atuando em uma superfície e a área da mesma superfície.

Matematicamente, temos:

$$P = \frac{F_N}{A} \quad (1.2)$$

em que:

$F_N$  = componente normal da força agindo na superfície;

$A$  = área sobre a qual está agindo a força.

No Sistema Internacional, a pressão é medida em pascal (Pa), que corresponde à pressão exercida por uma força de um newton em uma área de 1 metro quadrado.

#### Quadro 1.1

Conversão de algumas unidades de pressão

Algumas conversões para as unidades de pressão podem ser obtidas no quadro 1.1.

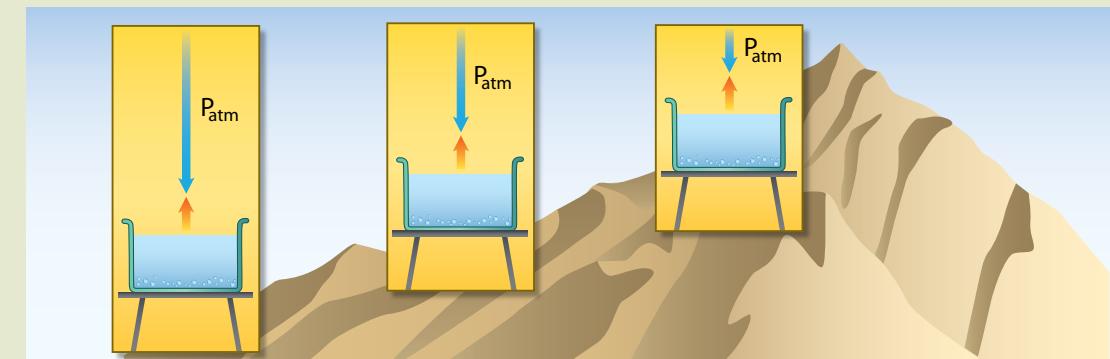
	bar	milibar	Pa	atm	torr
1 bar	1	$10^3$	$10^5$	0,986923	750,062
1 milibar	$1 \cdot 10^{-3}$	1	$10^2$	$0,986923 \cdot 10^{-3}$	0,750062
1 pascal	$10^5$	$10^{-2}$	1	$0,986923 \cdot 10^{-5}$	$0,750062 \cdot 10^{-2}$
1 atm	1,01325	$1,01325 \cdot 10^3$	$1,01325 \cdot 10^5$	1	$0,760 \cdot 10^3$
1 torr	$1,333224 \cdot 10^{-3}$	1,333224	$1,333224 \cdot 10^2$	$1,315789 \cdot 10^{-3}$	1

Outras unidades de pressão também são de uso comum, como o psi (*pound per square inch*), definido no Sistema Inglês de unidades como: 1 psi = 1 lbf/in<sup>2</sup>. Sabendo que 1 lbf (uma libra força) = 4,448 N e 1 in = 25,4 mm, a pressão de 1 psi equivale a 6 894,75 Pa ou, ainda, 1 atm é igual a 14,7 psi.

#### 1.3.1 Pressão atmosférica

É a pressão exercida pela ação do ar atmosférico que está ao redor de todos os objetos na Terra. O valor da pressão atmosférica depende do tamanho da coluna de ar na atmosfera. Por exemplo, a coluna de ar é maior sobre um objeto que está ao nível do mar do que sobre um objeto no topo do monte Everest. Portanto, a **pressão atmosférica ao nível do mar** é maior do que a pressão atmosférica no monte Everest. A figura 1.1 indica esquematicamente a coluna de ar em altitudes diferentes.

**Pressão atmosférica ao nível do mar =**  
 $= 1,01325 \cdot 10^5$  Pa ou  
 $1,01325 \cdot 10^5$  N/m<sup>2</sup>.



#### Exemplos

1. Qual é a força na parte superior de uma mesa com um tampo de área equivalente a um metro quadrado em uma cidade litorânea?

*Solução:*

Sabendo que a pressão atmosférica é igual a 101 325 Pa ou 101 325 N/m<sup>2</sup> para uma cidade ao nível do mar, a força deve ser de 101 325 N (equivalente a 10 329 kgf). O valor é relativamente alto e alguém poderia questionar se está correto, tendo em vista que o tampo, mesmo confeccionado de material resistente, por exemplo, de madeira, não teria resistência mecânica para suportar tamanha carga.

Como o ar atmosférico também está na parte inferior da mesa, a força na parte inferior deve ser igual a 101 325 N. Assim, as duas forças (na parte superior do

**Figura 1.1**  
Coluna de ar para diferentes altitudes.

tampo e na inferior) se equilibram. Os outros lados do tampo também estão sujeitos a forças causadas pela ação da pressão atmosférica, equilibrando-se mutuamente. Mesmo em corpos de formato irregular, caso o ar esteja em contato com toda a superfície desses corpos, a ação da pressão atmosférica ao redor deles possui resultante de força **nula**.

**2.** Qual dos dois exerce maior pressão sobre o solo: uma bailarina com massa de 45 kg, apoiada na ponta de um único pé ou um rinoceronte, de 1 200 kg de massa, apoiado nas quatro patas?

Considere a área de contato da ponta do pé da bailarina de  $5 \text{ cm}^2$ , e a área de contato de cada pata do rinoceronte de  $380 \text{ cm}^2$ . Considere, ainda,  $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ .

*Solução:*

Sabemos que a pressão exercida pela bailarina no solo é dada por seu peso dividido pela área da ponta de seu pé. E que o peso é igual à multiplicação da massa pela aceleração da gravidade:

$$P_{\text{bailarina}} = \frac{mg}{A} = \frac{45 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}{5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2} = 882\,900 \text{ N/m}^2 = 882\,900 \text{ Pa}$$

A pressão exercida pelas patas do rinoceronte é dada por:

$$P_{\text{rinoceronte}} = \frac{mg}{4A} = \frac{1200 \cdot 9,81}{4 \cdot 380 \cdot 10^{-4}} \approx 77\,447,4 \text{ Pa}$$

Desse modo, a pressão exercida no solo pela bailarina é mais de onze vezes maior do que a pressão exercida pelas patas do rinoceronte!

**3.** O salto agulha que as mulheres usam em ocasiões especiais tem área de apoio de aproximadamente  $1,0 \text{ cm}^2$ .

Marisa convidou João para uma festa, entretanto, como não está acostumada a dançar com esse tipo de salto, desequilibrou-se e deu uma pisada no peito do pé de João. Qual foi a pressão exercida no contato do salto com o pé de João?

*Solução:*

Supondo que o peso de Marisa seja aproximadamente 550 N e que ela estava apoiada apenas em uma das pernas, João suportou uma pressão de:

$$P_{\text{Marisa}} = \frac{F}{A} = \frac{550}{1 \cdot 10^{-4}} = 550 \cdot 10^4 \text{ N/m}^2 = 5\,500 \text{ kN/m}^2$$

### I.3.2 Escalas de pressão

A pressão nos fluidos é relacionada aos choques moleculares que acontecem em seu interior e sobre as fronteiras (paredes) em contato com os fluidos. Imagine uma sala em uma região litorânea (situada ao nível do mar). A pressão atmosférica de 101 325 Pa em determinado ponto do meio fluido ocorre pelos choques moleculares. Se, por um processo qualquer, a sala for completamente fechada e o ar retirado por completo de seu interior, não existirão mais moléculas de nitrogênio e oxigênio (os principais componentes do ar atmosférico terrestre) para se chocarem. Assim, em uma situação como a descrita, a pressão no interior da sala vale zero. Esse é o zero absoluto, em uma escala denominada **escala absoluta de pressões**. A condição descrita é muito difícil de ser conseguida na Terra, porque o ar atmosférico tende a entrar por qualquer fresta que exista na superfície externa da sala.

Alternativamente há outra escala de pressão muito utilizada na vida prática, que é a **escala efetiva** ou **escala relativa**. Essa escala se diferencia da escala absoluta porque admite valor nulo para a pressão atmosférica. Assim, a pressão absoluta ao nível do mar é de 101 325 Pa, e a pressão efetiva é de 0 Pa. O primeiro exemplo da seção “Pressão atmosférica” (item 1.3.1) revela a motivação do uso da escala efetiva. Como a resultante de força sobre a superfície de um corpo é nula por causa da ação atmosférica, de modo efetivo a pressão atmosférica também é nula!

A transformação entre as escalas de pressão é indicada pela equação 1.3:

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{efetiva}} + P_{\text{atm}} \quad (1.3)$$

em que:

$P_{\text{abs}}$  = é a pressão medida na escala absoluta;

$P_{\text{efetiva}}$  = é a pressão medida na escala efetiva;

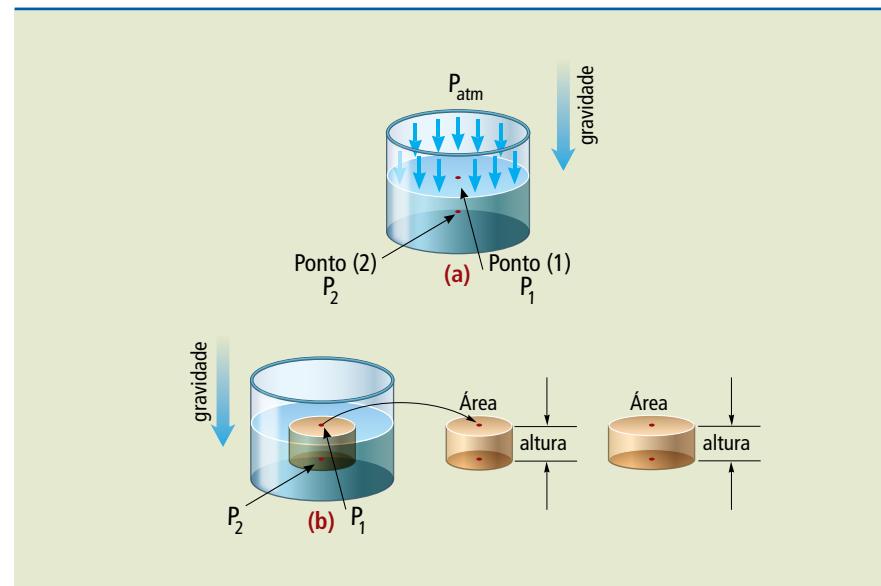
$P_{\text{atm}}$  = é a pressão atmosférica do local.

### I.3.3 Distribuição de pressão em um fluido estático

A figura 1.2 indica uma situação em que um líquido qualquer é confinado em um recipiente aberto à atmosfera. A pressão na superfície é exercida pelo ar atmosférico. Um ponto no interior do fluido tem pressão diferente da pressão na superfície ( $P_1 \neq P_2$ ). A determinação dessa diferença de pressões é facilmente obtida pelo cálculo do peso de um cilindro imaginário construído entre os pontos 1 e 2. O ponto superior pertence ao tampo do cilindro, e o inferior, à base. O peso do cilindro imaginário de fluido dividido pela área de sua base é a diferença de pressão entre os pontos (ver definição da pressão na equação 1.2).

**Figura 1.2**

- a) Distribuição de pressão atmosférica na superfície livre de um líquido;  
b) cilindro imaginário entre os pontos 1 e 2.



O peso do cilindro é definido como a multiplicação de sua massa pela aceleração local da gravidade. A diferença de pressões, ocasionada pela quantidade de fluido acima do ponto, é igual a:

$$\text{diferença de pressão} = \frac{\text{peso}}{\text{área}}$$

seja:

$$\text{diferença de pressão} = \frac{\text{massa} \cdot \text{gravidade}}{\text{área}}$$

Assim, a diferença entre a pressão dos dois pontos, substituindo a massa pela densidade multiplicada pelo volume, e o volume do cilindro pela multiplicação da área da base pela altura é:

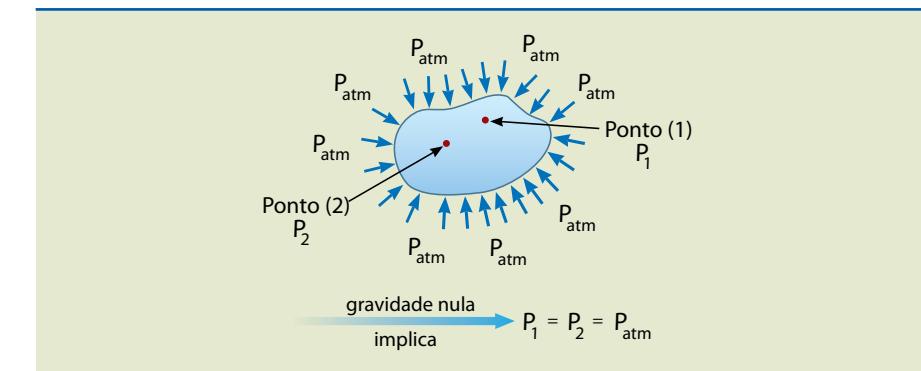
$$\text{diferença de pressão} = \frac{\text{densidade} \cdot \text{gravidade} \cdot \text{área} \cdot \text{altura}}{\text{área}}$$

É possível verificar que a diferença de pressão é independente da área da base do cilindro, o que nos leva a concluir que cilindros imaginários (ou qualquer outra forma tridimensional prismática), escolhidos com qualquer tamanho de base, obterão os mesmos resultados quanto às diferenças de pressão entre os pontos, e que as únicas grandezas relevantes para determinar a diferença são: a densidade do fluido, a gravidade local e a diferença de altura entre os pontos (representada por  $z$ ). Desse modo:

$$P_{\text{abs}} = P_{\text{efetiva}} + P_{\text{atm}} \quad (1.4)$$

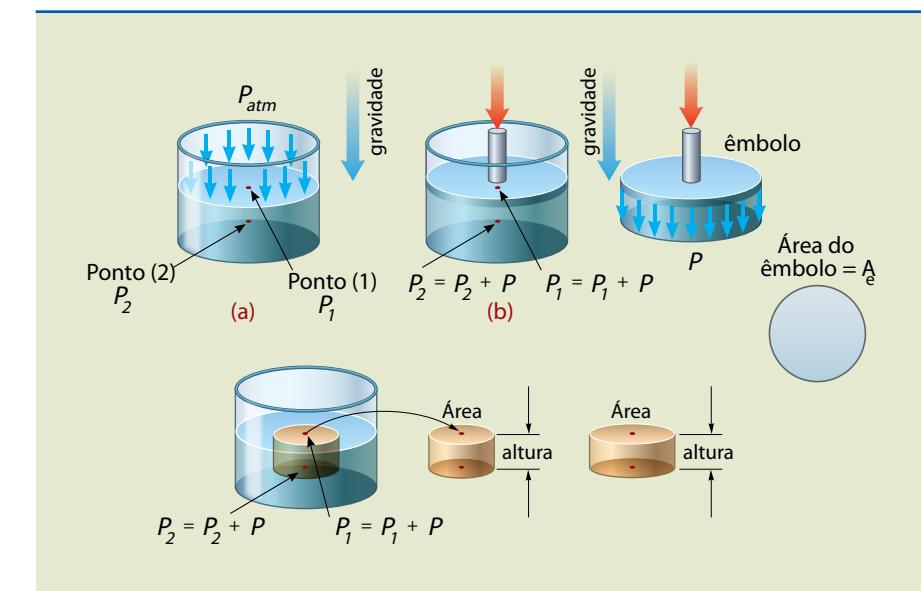
A equação 1.4 é a representação matemática do teorema de Stevin. Pode ser aplicada a fluidos estáticos sempre que não variarem a gravidade do local e a densidade do fluido.

Uma conclusão imediata da análise da equação 1.4 indica que, em um local em que a gravidade é nula, por exemplo, nos ambientes experimentados pelos astronautas em órbita, não há diferença de pressão em um meio fluido em repouso (figura 1.3).



**Figura 1.3**  
Meio fluido na ausência de campo potencial gravitacional.

Se, por um dispositivo qualquer, como um êmbolo, a pressão na superfície sofre aumento ocasionado pela adição de uma força (figura 1.4), a pressão na superfície do líquido é acrescida pelo valor da força dividido pela área da superfície. O ponto no interior do líquido também tem sua pressão acrescida do valor adicionado à superfície, ou seja, a diferença entre as pressões dos dois pontos permanece inalterada.



**Figura 1.4**  
a) Reservatório aberto à atmosfera;  
b) aumento da pressão na superfície – inicialmente livre – pela ação de um êmbolo.

Assim, se por qualquer ação externa, há um aumento de pressão em algum ponto, por exemplo, pela ação de um êmbolo, essa pressão é transmitida integralmente a todos os pontos do fluido (lei de Pascal). No exemplo da figura 1.4, a

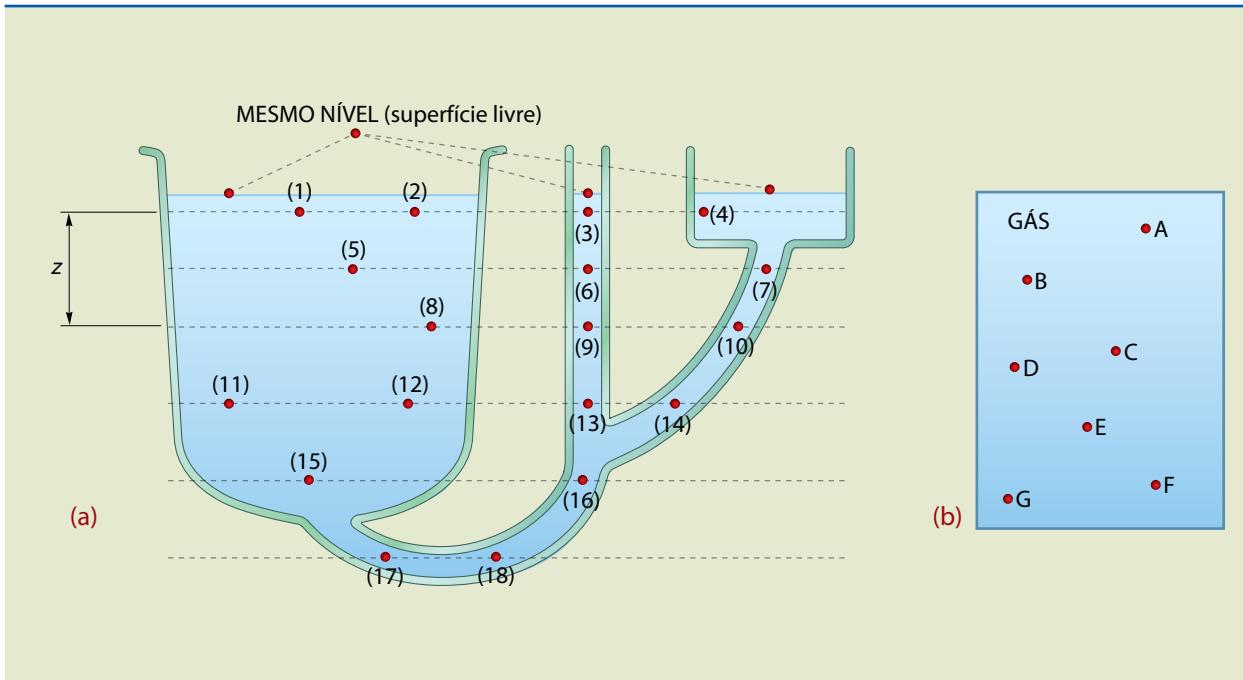
ação do êmbolo na superfície livre causa um aumento de pressão ( $P$ ) em todos os pontos no interior do fluido.

Assim, na condição hidrostática, é possível afirmar que (figura 1.5):

- todos os pontos contidos em um plano horizontal em um dado fluido, independentemente da geometria do recipiente que o contém, possuem a mesma pressão. Exemplos (pontos indicados na figura 1.5a):
  $P_1 = P_2 = P_3 = P_4, P_5 = P_6 = P_7, P_8 = P_9 = P_{10}, P_{11} = P_{12} = P_{13} = P_{14}, P_{15} = P_{16}$  e  $P_{17} = P_{18}$ ;
- a diferença de pressão entre dois pontos depende da densidade do fluido, da diferença de cotas entre eles e do valor da aceleração da gravidade do local. Exemplo (pontos e diferença de cota  $Z$  indicados na figura 1.5a):  $P_8 = P_1 + \rho g z$ ;
- dois ou mais tanques interconectados, se possuem superfície livre, devem obrigatoriamente estar no mesmo nível;
- caso o fluido seja um gás, como o ar, por exemplo, a densidade é relativamente baixa e, nessas condições, apesar de existente, a diferença de pressões entre os pontos do meio fluido é bastante reduzida. Exemplo (pontos indicados na figura 1.5b):
  $P_A = P_B = P_C = P_D = P_E = P_F = P_G$ .

**Figura 1.5**

- a) Tanques de diversos formatos, interligados e contendo um líquido;  
b) tanque contendo um gás.



### Exemplo

A profundidade máxima que um submarino consegue atingir é de 190 metros. A qual pressão externa seu casco é submetido a essa profundidade? Admitir aceleração da gravidade igual a  $10 \text{ m/s}^2$  e massa específica da água de  $1\,000 \text{ kg/m}^3$ .

*Solução:*

A pressão na profundidade indicada é dada por:

$$P = P_{\text{superfície}} + \rho g z = 100\,000 + 1\,000 \cdot 10 \cdot 190 = 2 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

na escala absoluta, ou:

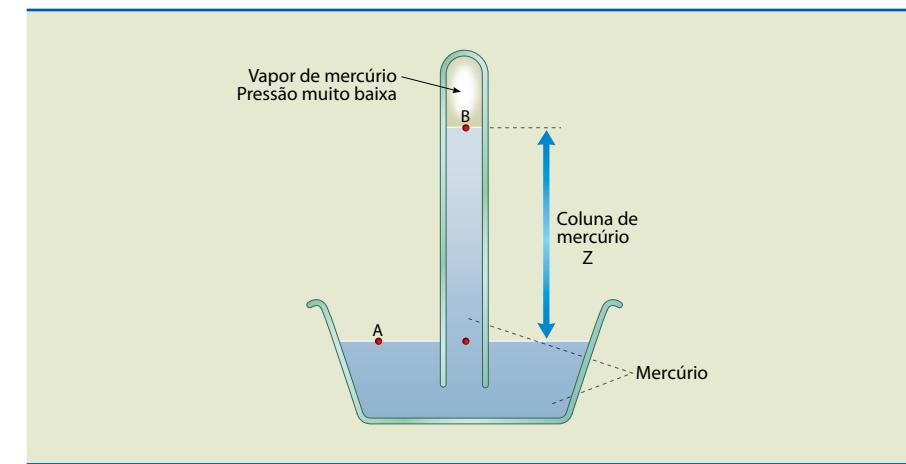
$$P = P_{\text{superfície}} + \rho g z = 0 + 1\,000 \cdot 10 \cdot 190 = 1,9 \cdot 10^6 \text{ Pa}$$

na escala efetiva. Os resultados são válidos para a pressão agindo na parte externa do casco do submarino. Evidentemente, como o submarino deve acomodar a tripulação, a pressão interna deve ser de  $100\,000 \text{ Pa}$  na escala absoluta, ou zero na escala efetiva (igual ou menor que à pressão ao nível do mar para que a tripulação consiga sobreviver).

Desse modo, a pressão resultante sobre o casco é de compressão e vale  $1,9 \cdot 10^6 \text{ Pa}$ . É igual à diferença entre a pressão externa causada pela água e a pressão interna causada pelo ar aprisionado no interior do submarino. Nessas condições, uma escotilha de área igual a 1 metro quadrado suportaria uma força equivalente a  $1\,900\,000 \text{ N}$ !

### 1.3.4 Medidor de pressão atmosférica

A pressão atmosférica é medida por um instrumento denominado barômetro. O dispositivo básico consiste em um reservatório aberto à atmosfera e um tubo fechado em uma das extremidades, conforme indicado na figura 1.6. O fluido utilizado é o mercúrio. Na figura, o ponto A experimenta pressão atmosférica, e o ponto B tem pressão muito próxima de zero (há vapor de mercúrio confinado no espaço acima da superfície do mercúrio líquido). Aplicando a equação 1.4 entre os pontos A e B, é possível indicar qual o valor da pressão atmosférica do local após a leitura da coluna vertical de mercúrio. Caso o manômetro esteja ao nível do mar, em condições padrão, deve marcar uma coluna de  $z = 760 \text{ mm}$  de altura (para densidade do mercúrio de  $13\,595 \text{ kg/m}^3$  a  $0^\circ\text{C}$  e aceleração da gravidade padrão de  $9,80665 \text{ m/s}^2$ ).



**Figura 1.6**

Representação esquemática de um barômetro simples.

## 1.4 Princípio de Arquimedes, “o empuxo”

Conta-se que Arquimedes, enquanto tomava banho, descobriu que um corpo imerso na água se torna aparentemente mais leve. Imaginou que a força exercida pelo líquido sobre o corpo aliviava o peso do corpo e que essa força deveria ser vertical e para cima (de sentido contrário ao sentido da aceleração da gravidade).

A essa força deu-se o nome de **empuxo**. A distribuição de pressão em um fluido estático foi tratada na seção 1.3.3.

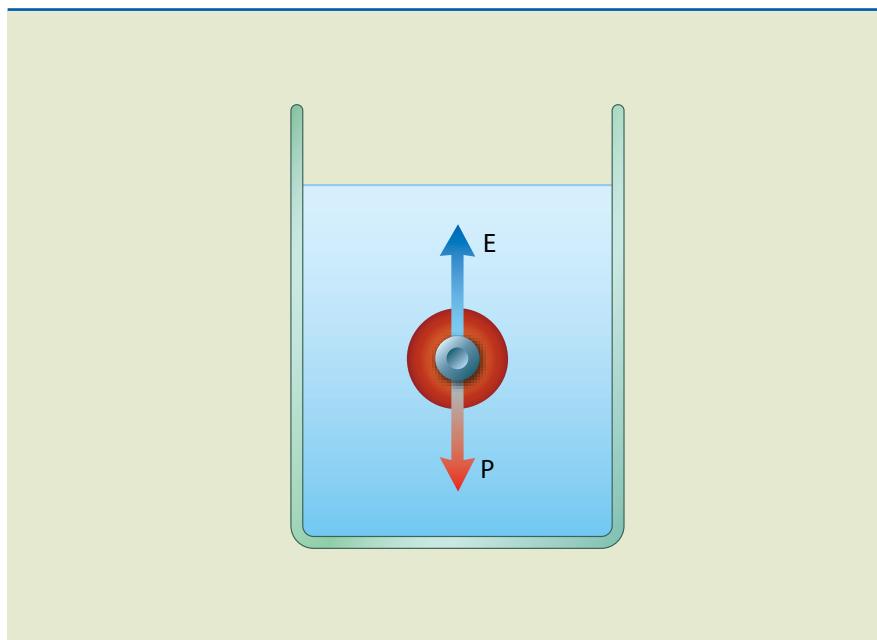
Quando um corpo se encontra imerso em um líquido, sobre ele agem duas forças:

- A força **peso** ( $P$ ), por causa da exposição do corpo ao campo gravitacional terrestre.
- O **empuxo** ( $E$ ), proveniente da distribuição de pressão na superfície do corpo causada pela presença do fluido.

Ver a representação das forças na figura 1.7.

**Figura 1.7**

Representação de um corpo imerso e a força peso e o empuxo.



Se um corpo está imerso em um líquido, podemos observar as seguintes situações:

- Quando o corpo afunda, a intensidade da força de empuxo é menor do que a intensidade da força peso ( $E < P$ ).
- Quando o corpo é levado para a superfície, a intensidade da força de empuxo é maior do que a intensidade da força peso ( $E > P$ ).
- Quando o corpo permanece parado no ponto onde foi colocado, a intensidade da força de empuxo é igual à intensidade da força peso ( $E = P$ ).

Assim, para analisar qual das três situações poderá ocorrer, aplicamos o princípio de Arquimedes:

“Todo corpo mergulhado em um fluido (líquido ou gás) sofre, por parte do fluido, uma força vertical para cima, cuja intensidade é igual ao peso do fluido deslocado pelo corpo”.

Se considerarmos que  $V_{\text{fluido}}$  representa o volume de fluido deslocado pelo corpo, a massa do fluido deslocado é dada por:

$$m_{\text{fluido}} = V_{\text{fluido}} \cdot \rho_{\text{fluido}} \quad (1.5)$$

Como a intensidade do empuxo é igual ao peso dessa massa deslocada, a equação 1.5 torna-se:

$$E = m_{\text{fluido}} \cdot g = \rho_{\text{fluido}} \cdot V_{\text{fluido}} \cdot g \quad (1.6)$$

Para corpos imersos, o volume de fluido deslocado é igual ao volume do corpo. Nesses casos, as equações ficam:

$$E = m_{\text{corpo}} \cdot g = \rho_{\text{corpo}} \cdot V_{\text{corpo}} \cdot g \quad (1.7)$$

$$E = m_{\text{fluido}} \cdot g = \rho_{\text{fluido}} \cdot V_{\text{corpo}} \cdot g \quad (1.8)$$

Comparando as equações 1.7 e 1.8, observamos que:

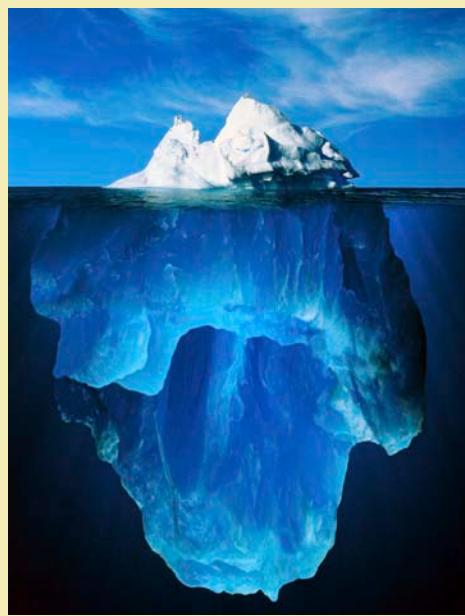
- Se  $\rho_{\text{corpo}} > \rho_{\text{fluido}}$ , isto é, se a densidade do corpo for maior que a densidade do fluido, o corpo desce em movimento acelerado. A força resultante, então, é dada pela expressão:  $F_R = P - E$ .
- Se  $\rho_{\text{corpo}} < \rho_{\text{fluido}}$ , o corpo sobe em movimento acelerado, então:  $F_R = E - P$ .
- Se  $\rho_{\text{corpo}} = \rho_{\text{fluido}}$ , o corpo encontra-se em equilíbrio, não desce nem sobe.

Quando um corpo qualquer, mais denso que um líquido, é totalmente imerso nesse líquido, podemos observar que seu peso, nessa situação, é aparentemente menor do que no ar. Ao entrarmos em uma piscina e mergulharmos na água, aparentemente ficamos mais leves.

A diferença entre o valor do peso real e do peso aparente corresponde ao empuxo exercido pelo líquido:

$$P_{\text{aparente}} = P_{\text{real}} - E \quad (1.9)$$

### Por que um corpo flutua



© RALPH A. CLEVENGER/CORBIS/CORBIS/GETTY IMAGES

Condições para um corpo flutuar em um líquido:

- Se ele se encontra em equilíbrio:

$$E = P$$

- O volume de líquido que ele desloca é menor do que seu volume:

$$V_{\text{deslocado}} < V_{\text{corpo}}$$

- Sua densidade é menor do que a densidade do líquido:

$$V_{\text{corpo}} < V_{\text{líquido}}$$

- O valor do peso aparente do corpo é nulo:

$$P_{\text{aparente}} = P - E = 0$$

a relação entre os volumes imerso e total do corpo é dada por:

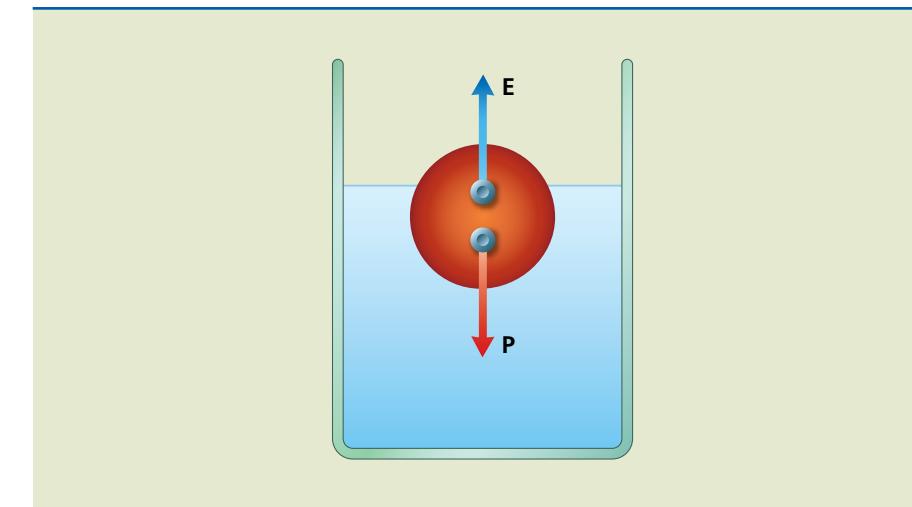
$$E = P$$

$$\rho_{\text{fluido}} \cdot V_{\text{fluido}} \cdot g = \rho_{\text{corpo}} \cdot V_{\text{corpo}} \cdot g \quad (1.10)$$

$$\frac{V_{\text{fluido}}}{V_{\text{corpo}}} = \frac{\rho_{\text{corpo}}}{\rho_{\text{fluido}}} \quad (1.11)$$

### Exemplos

1. Uma bola de densidade  $\rho = 0,70 \text{ g/cm}^3$ , com 20 cm de diâmetro, flutua na água ( $\rho_{\text{água}} = 1,0 \text{ g/cm}^3$ ). Determinar o volume da bola que permanece dentro da água. Ver representação esquemática na figura 1.8.



**Figura 1.8**

Como a bola está flutuando, temos que  $E = P$ .

Sendo o volume da esfera de raio  $R$  igual a:

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3,$$

podemos escrever, pela equação 1.11:

$$V_{\text{fluido}} = V_{\text{corpo}} \frac{\rho_{\text{corpo}}}{\rho_{\text{fluido}}} = \frac{4}{3} \pi (10 \text{ cm})^3 \frac{0,7 \text{ g/cm}^3}{1 \text{ g/cm}^3}$$

$$V_{\text{fluido}} = 2\,932 \text{ cm}^3$$

que é o volume de fluido deslocado pela bola ou, ainda, seu volume imerso.

2. Dois adolescentes jogavam bola no quintal quando a mãe de um deles pediu que fossem fazer os exercícios de Física. Eles imediatamente disseram que estavam fazendo, na prática, um dos exercícios para verificarem se as respostas que haviam calculado eram constatadas.

O enunciado do exercício em questão afirmava que uma bola flutua em uma poça de água (com densidade de  $1\,000 \text{ kg/m}^3$ ).

A bola em questão tinha massa de  $0,35 \text{ kg}$  e diâmetro de  $18 \text{ cm}$ .

- a) Será que a bola flutua mesmo? Por quê?
- b) Qual é o valor da força de empuxo?
- c) Qual é o volume de água deslocado pela bola?
- d) Qual é a densidade média da bola?

*Solução:*

- a) A bola flutua porque é muito menos densa do que a água; seu interior é cheio de ar.
- b) A bola flutua na água; logo, não existe força resultante, pois o peso é contrabalanceado pela força de empuxo.

Assim:

$$F_E = mg = 0,35 \text{ kg} \cdot 9,81 \text{ m/s}^2 = 3,43 \text{ N}$$

c) Pelo princípio de Arquimedes, sabemos que a força de empuxo é igual ao peso do fluido deslocado. Utilizando a equação 1.6:

$$E = m_{\text{fluido}} \cdot g = \rho_{\text{fluido}} \cdot V_{\text{fluido}} \cdot g$$

Assim, o volume deslocado de fluido é dado por:

$$\begin{aligned} V_{\text{fluido}} &= \frac{E}{\rho_{\text{fluido}} g} = \frac{3,43 \text{ N}}{1000 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2} = \\ &= 3,5 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 = 3,5 \cdot 10^{-4} (10^2 \text{ cm})^3 = 350 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

d) Para encontrar a densidade média da bola, precisamos determinar seu volume. O volume da bola é dado por:

$$V_{\text{bola}} = \frac{4}{3} \pi (9 \text{ cm})^3 = 3\,053,6 \text{ cm}^3 = 3,0536 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3$$

Como a densidade é a massa dividida pelo volume:

$$\rho_{\text{bola}} = \frac{0,35 \text{ kg}}{3,0536 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3} = 114,6 \text{ kg/m}^3$$

O exemplo também poderia ter sido resolvido com o auxílio da equação 1.11.

# Capítulo 2

## Hidrodinâmica

**A** hidrodinâmica, ou dinâmica dos fluidos, é uma parte da Mecânica dos fluidos que estuda o seu escoamento quando estão sujeitos a forças externas que o induzem ao movimento.

Os fluidos são substâncias que se deformam quando sob ação de forças. De modo geral, essa deformação é muito maior do que aquela que acontece com sólidos submetidos a cargas.

Forças de contato ou forças gravitacionais podem induzir o movimento dos fluidos. Um exemplo visível desse fato são as superfícies dos oceanos e dos rios.

O estudo do escoamento dos fluidos não é simples porque envolve diversos fenômenos dinâmicos complexos e modelos matemáticos elaborados. Há no mundo muitos pesquisadores e muitos esforços para desvendar os vários e peculiares aspectos envolvidos na movimentação dos fluidos. Para os casos mais comuns, diversas soluções existem e são apresentadas nos cursos de graduação em Engenharia.

O objetivo deste capítulo é fornecer subsídios para apresentação posterior dos dispositivos que promovem o escoamento e apresentar uma pequena parte da base das teorias da Mecânica dos fluidos. O aprofundamento dos estudos exige a consulta de outros livros-texto e também o conhecimento do cálculo diferencial e integral para entender o equacionamento matemático.

Sob essa ótica, em nossos estudos, consideramos apenas os fluidos ideais em movimento, ou seja, desprezamos os efeitos de sua viscosidade. Também, visando à simplificação, são tratados os fluidos chamados incompressíveis (aqueles que mantêm a densidade constante) em escoamento permanente.

## 2.1 Escoamento: regime permanente versus regime não permanente

No escoamento em regime permanente, não há variação das grandezas ao longo do tempo. Nesse tipo de escoamento, a velocidade, a pressão, a temperatura do fluido, por exemplo, em qualquer ponto, permanecem constantes. Não significa dizer que as propriedades não se alterem de ponto para ponto, apenas que, em dado escoamento, em um mesmo ponto, elas se mantêm constantes. O regime permanente também é conhecido como regime estacionário.

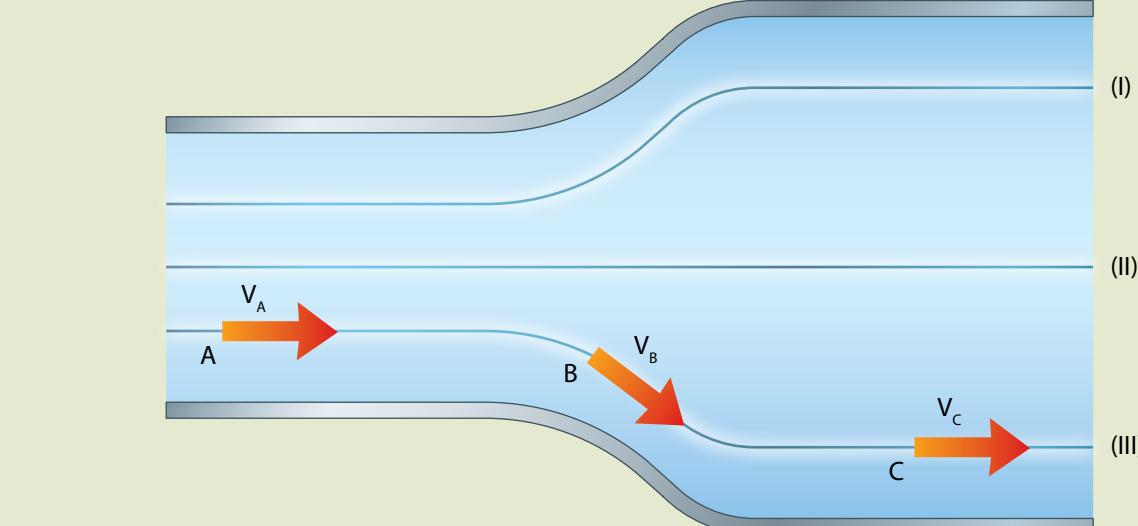
A figura 2.1 simboliza um tubo dentro do qual um líquido escoa da esquerda para a direita. Os pontos A, B e C representam as diferentes posições de uma partícula do líquido, cujas velocidades são  $V_A$ ,  $V_B$  e  $V_C$ , respectivamente.

O escoamento é denominado em regime permanente se qualquer partícula do fluido, ao passar por A, B e C, tem velocidades respectivamente iguais a  $V_A$ ,  $V_B$  e  $V_C$ .

**Importante:** cada partícula que cruza determinado ponto segue a mesma trajetória daquelas que já passaram por aquele ponto.

Em regime permanente, essas trajetórias recebem o nome de **linhas de corrente** (linhas de I, II e III).

**Figura 2.1**  
Escoamento em um tubo divergente. Indicação da velocidade em três posições distintas (A, B e C) e de três linhas de corrente (I, II e III).



Quando o regime não é permanente, é denominado transitório. Como exemplos, podemos citar o processo de esvaziamento de um tanque, ou o escoamento dos gases de escapamento de um veículo em aceleração, entre outros. Nesses casos, o tratamento matemático deve incluir a variável tempo.

## 2.2 Vazão em volume e velocidade

Entende-se por vazão em volume, o volume de determinado fluido que passa por determinada seção de um conduto em uma unidade de tempo. Em outras palavras, a vazão em volume mede a rapidez com a qual um volume escoa.

O conduto pode ser livre (canal, rio ou tubulação com pressão atmosférica) ou forçado (tubulação com pressão positiva ou negativa).

A unidade de vazão em volume no SI é o  $\text{m}^3/\text{s}$ . Usualmente, entretanto, é dada em litro por segundo ( $\text{L/s}$ ), embora existam outras unidades, como:

$\text{L/h}$  = litro por hora;  
 $\text{L/min}$  = litro por minuto;  
 $\text{m}^3/\text{h}$  = metro cúbico por hora;  
 $\text{ft}^3/\text{s}$  = pé cúbico por segundo;  
 $\text{gal/s}$  = galão (EUA) por segundo;  
 $\text{gal/min}$  = galão (EUA) por minuto (gpm).

A equação para a vazão em volume é:

$$Q_V = \frac{V}{t} \quad (2.1)$$

em que:

$Q_V$  é a vazão em  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  
 $V$  é o volume em  $\text{m}^3$ ;  
 $t$  é tempo em s.

### 2.2.1 Determinação da velocidade utilizando a vazão em volume

Na hidrodinâmica, muitas vezes é necessário obter a velocidade do fluido em um conduto. Uma forma de obtê-la é pela vazão desse fluido.

Para determinar a velocidade média de escoamento de um fluido por meio da vazão, basta dividir a vazão pela área da seção considerada (utilizando variante da equação 2.1).

A vazão em volume também pode ser obtida pela multiplicação da velocidade média em determinada seção transversal do conduto pela área da seção; assim:

$$Q_V = v \cdot A \quad (2.2)$$

em que:

$Q_V$  é a vazão em  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  
 $A$  é a área em  $\text{m}^2$ ;  
 $v$  é a velocidade média do fluido na seção de área  $A$  em  $\text{m/s}$ .

### Exemplos

1. Em uma tubulação, precisa-se escoar um fluido com velocidade média de 5  $\text{m/s}$ , vazão de 5 litros por minuto. Qual deve ser a área da seção transversal dessa tubulação?

*Solução:*

A vazão volumétrica está na unidade litro por minuto, então devemos transformá-la para a unidade metro cúbico por segundo:

$$1 \text{ litro} = 1 \text{ dm}^3 = 10^{-3} \text{ m}^3$$

$$1 \text{ minuto} = 60 \text{ s}$$

Então:

$$Q_V = \frac{5 \cdot 10^{-3}}{60} = 0,083 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

logo, a área da seção transversal da tubulação em centímetros é dada por:

$$A = \frac{0,083 \cdot 10^{-3}}{5} = 0,0000166 \text{ m}^2 = 0,166 \text{ cm}^2$$

2. Qual é o volume de fluido que escoa em uma tubulação, sabendo que a vazão é de 8  $\text{m}^3/\text{s}$  em um tempo de 1 s?

*Solução:*

$$V = Q_V \cdot t = 8 \cdot 1 = 8 \text{ m}^3$$

### 2.3 Equação da conservação da massa ou equação da continuidade

A massa não pode ser criada nem destruída. Excluindo a conversão de massa em energia postulada por Albert Einstein, que acontece em situações muito peculiares, a afirmação anterior é sempre verificável. É o princípio da conservação de massa.

Na figura 2.2, há a representação esquemática de um escoamento em um tubo divergente (que aumenta de diâmetro). As regiões 1 e 2 da figura representam as áreas das seções transversais em duas posições distintas do tubo, localizações em que é possível notar diâmetros diferentes.

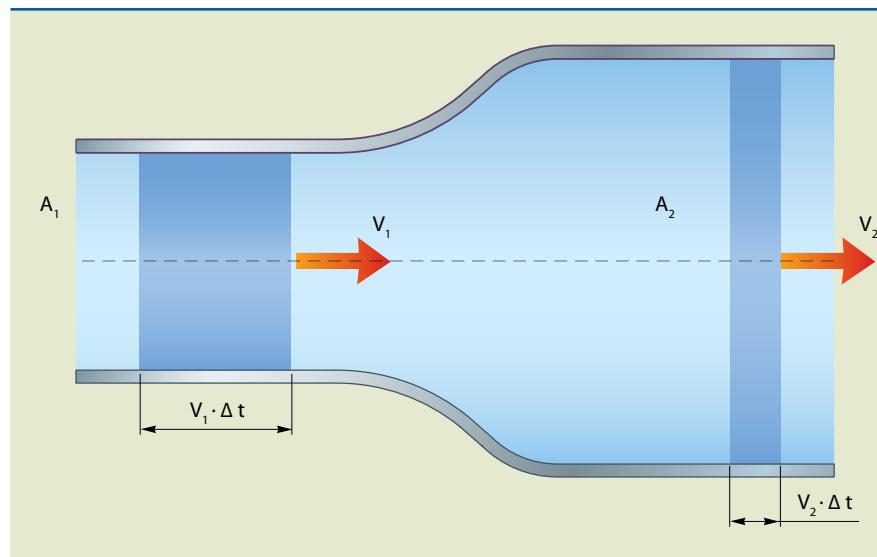
As velocidades médias de escoamento nas áreas  $A_1$  e  $A_2$  valem, respectivamente,  $v_1$  e  $v_2$ .

Em regime permanente, a conservação de massa indica que a quantidade de massa que atravessa a seção 1 ( $m_1$ ) deve ser a mesma quantidade de massa que atravessa a seção 2 ( $m_2$ ). Desse modo:

$$m_1 = m_2 \quad (2.3)$$

**Figura 2.2**

Escoamento em um tubo divergente. Indicação esquemática dos volumes de fluido deslocados em determinado instante de tempo para duas seções (1 e 2).



Usamos a equação 1.1 nas seções 1 e 2, em conjunto com a equação de igualdade 2.3:

$$\rho_1 V_1 = \rho_2 V_2 \quad (2.4)$$

Dividimos a equação 2.3 pelo tempo arbitrário  $t$  escolhido para as observações do fenômeno:

$$\frac{\rho_1 V_1}{t} = \frac{\rho_2 V_2}{t} \quad (2.5)$$

Recorrendo à equação 2.1:

$$\rho_1 Q_{V_1} = \rho_2 Q_{V_2} \quad (2.6)$$

adotamos a hipótese de fluido incompressível, ou seja, densidade constante:

$$Q_{V_1} = Q_{V_2} \quad (2.7)$$

Alternativamente, a equação 2.7 pode ser escrita, com o auxílio da equação 2.2, como:

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (2.8)$$

No caso do escoamento permanente de fluido incompressível, representado esquematicamente na figura 2.2.

## 2.4 Equação de Bernoulli

Uma importante equação da dinâmica dos fluidos é atribuída a Daniel Bernoulli (1700-1782). A famosa equação, conhecida como equação de Bernoulli, é capaz

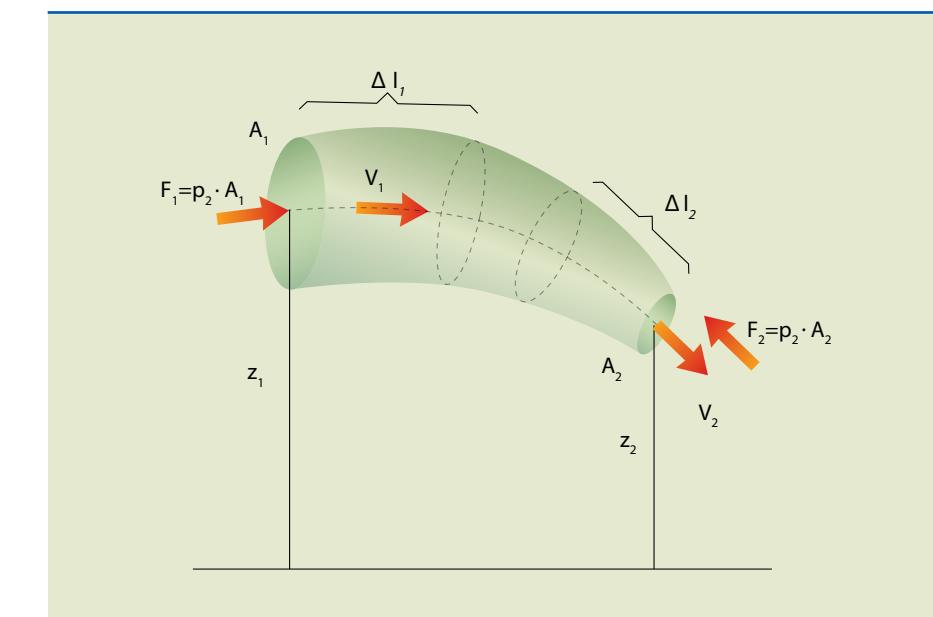
de expressar relação entre a energia de pressão, a energia cinética e a energia potencial em um escoamento. A equação é escrita para uma linha de corrente (como as linhas indicadas na figura 2.1).

Considere duas seções de áreas transversais  $A_1$  e  $A_2$  em um tubo, em que escoa um fluido incompressível e ideal em regime permanente, sendo  $p_1$  e  $p_2$  as pressões nessas seções, respectivamente (figura 2.3).

A densidade do fluido é indicada por  $\rho$  e as velocidades de escoamento valem  $v_1$  e  $v_2$ . A figura 2.3 indica um tubo de corrente que é usado na dedução da equação de Bernoulli. As cotas das seções 1 e 2 são indicadas pela letra  $Z$  e são medidas a partir de um plano referencial horizontal chamado plano horizontal de referência.

**Neste capítulo,**  
indicamos a  
velocidade com  $v$   
minúsculo e o volume  
com  $V$  maiúsculo.

**Figura 2.3**  
Indicação do tubo de corrente.



$F_1$  e  $F_2$  representam as forças de pressão exercidas pelo fluido restante no tubo sobre o fluido contido nele. Então, a soma algébrica dos trabalhos realizados por essas forças ( $\tau_1$  e  $\tau_2$ , respectivamente) é igual à soma das variações das energias cinética e potencial ( $\Delta E_c$  e  $\Delta E_p$ ) entre as seções (1) e (2). Assim:

$$\tau_1 + \tau_2 = \Delta E_c + \Delta E_p \quad (2.9)$$

Sabendo que o trabalho de uma força conservativa é dado pela multiplicação dessa força por um deslocamento e que os deslocamentos na seção 1 e na seção 2 são indicados, respectivamente, por  $\Delta l_1$  e  $\Delta l_2$ , bem como substituindo as expressões para a energia cinética e energia potencial (respectivamente iguais a  $E_c = \frac{1}{2} mv^2$  e  $E_p = mgz$ ) na equação 2.9, temos:

$$(F_1 \cdot \Delta l_1) + (-F_2 \cdot \Delta l_2) = \left[ \left( \frac{m_2 v_2^2}{2} \right) - \left( \frac{m_1 v_1^2}{2} \right) \right] + [(m_2 g z_2) - (m_1 g z_1)] \quad (2.10)$$

O princípio da conservação de massa aplicado ao tubo de corrente indica que  $m_1 = m_2$ . Assim, é possível retirar o índice da variável massa considerando  $m_1 = m_2 = m$ . Usando a equação 1.1 ( $m = \rho V$ ) e a equação 1.2 ( $F = P \cdot A$ ), na equação 2.10, obtemos:

$$(P_1 \cdot A_1 \cdot \Delta l_1) + (-P_2 \cdot A_2 \cdot \Delta l_2) = \left[ \left( \frac{\rho V v_2^2}{2} \right) - \left( \frac{\rho V v_1^2}{2} \right) \right] + \\ + [(\rho V g z_2) - (\rho V g z_1)] \quad (2.11)$$

Lembrando que, por motivos geométricos,  $V = A \cdot \Delta l$ , substituindo na equação 2.11 e simplificando, temos:

$$(P_1 \cdot V) + (-P_2 \cdot V) = \rho V \left( \frac{v_2^2}{2} - \frac{v_1^2}{2} \right) + \rho V (g z_2 - g z_1) \quad (2.12)$$

O volume aparece em todos os termos da equação 2.12 e pode ser simplificado. Após rearranjo da equação 2.12, com os termos de índice 1 do lado esquerdo do sinal de igualdade e os de índice 2 do lado direito do sinal de igualdade, e dividindo a equação 2.12 pela densidade, ela se transforma em:

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2} + g z_1 = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2} + g z_2 \quad (2.13)$$

A equação 2.13 é conhecida na literatura por equação de Bernoulli.

Percebe-se com facilidade que o teorema de Stevin está contido na equação de Bernoulli. Evidentemente, o teorema de Stevin somente pode ser aplicado em condições estáticas, de modo que as velocidades nas seções 1 e 2, nesse caso, devem ser nulas. Assim, a equação 2.13 torna-se:

$$\frac{P_1}{\rho} + g z_1 = \frac{P_2}{\rho} + g z_2 \sqrt{2} \quad (2.14)$$

Após algumas manipulações algébricas da equação 2.14, obtemos:

$$P_1 - P_2 = \rho g (z_2 - z_1) \quad (2.15)$$

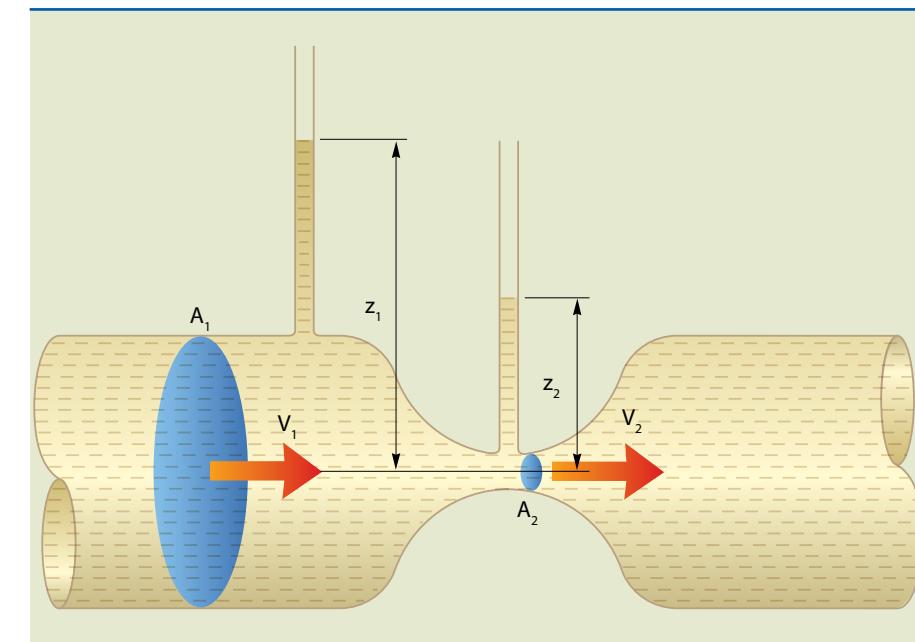
A equação 2.15 é a mesma equação 1.4.

### Aplicações da equação de Bernoulli – o tubo de Venturi

O tubo de Venturi é um tubo horizontal que possui um estrangulamento (redução de seção), conforme indicado na figura 2.4.

Se o tubo horizontal é preenchido por um fluido em movimento, pode-se observar que, na parte de maior diâmetro, a pressão é maior do que na parte mais estreita (chamada garganta).

Essa observação pode ser feita nos tubos verticais do dispositivo, em que a coluna de líquido em cada um indica a pressão na região do tubo horizontal. Assim, as duas colunas apresentam níveis diferentes, ou seja,  $h_1 > h_2$ ; portanto, a velocidade é menor quando o fluido escoa pela parte de maior diâmetro, e maior, na parte de menor diâmetro, ou seja,  $v_2 > v_1$ .



**Figura 2.4**  
Tubo de Venturi.

Pela equação da continuidade (equação 2.8), temos:

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$$

Como  $A_1 > A_2$ , temos  $v_1 < v_2$ .

Assim, pela equação de Bernoulli (equação 2.13), lembrando que as seções estão na mesma altura, temos:

$$P_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = P_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}$$

Conclui-se que  $p_1 > p_2$ , pois  $v_1 < v_2$ .

Nos condutores de seção variável, nas regiões mais estreitas, a pressão é menor e a velocidade de escoamento é maior.

## 2.5 Bombas hidráulicas

Em um circuito hidráulico, a bomba hidráulica é o elemento responsável pela transformação da energia mecânica, fornecida pelo motor de acionamento, em energia hidráulica. Ou seja, as bombas são usadas para converter energia mecânica em energia hidráulica.

Como isso acontece?

Um vácuo parcial é criado na entrada da bomba (ação mecânica). Assim, pela ação da pressão atmosférica, o fluido do tanque penetra na bomba, e esta, por sua vez, força o fluido para o sistema hidráulico.

A instalação de bombas em um sistema hidráulico visa a produzir um fluxo capaz de gerar pressão. É a resistência à vazão do fluido que ocasiona a formação da pressão. Quanto maior a resistência à vazão, maior a pressão fornecida pela bomba. O vácuo parcial permite a admissão de fluido em sua entrada na linha de sucção.

As bombas hidráulicas são especificadas, geralmente, pela capacidade de pressão máxima de operação e por seu deslocamento volumétrico.

A faixa de pressão de uma bomba é determinada pelo fabricante, com base em sua vida útil. A operação com pressão superior à estipulada pelo fabricante pode reduzir a vida útil do equipamento.

Todas as bombas hidráulicas funcionam e são denominadas segundo o princípio de deslocamento volumétrico. Isso significa que o líquido é pressionado para dentro das tubulações e deslocado em direção ao elemento de trabalho, que são os atuadores.

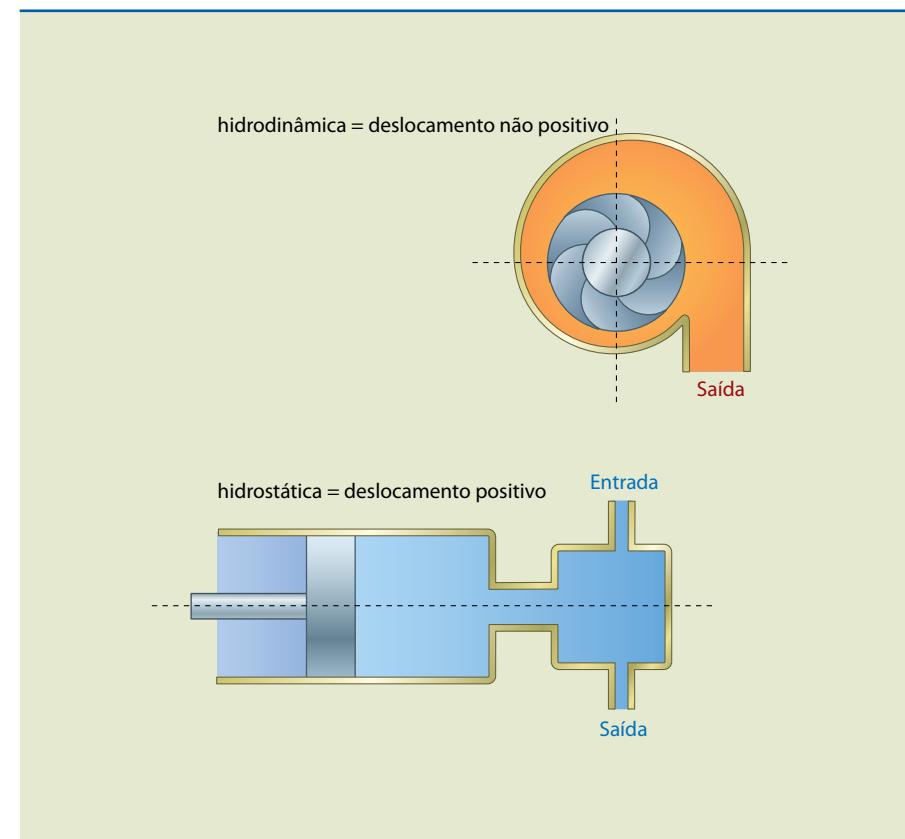
Existem vários tipos construtivos de bombas, e o líquido pode ser deslocado de diferentes formas: por pistões, palhetas ou por dentes de engrenagens.

Deslocamento, por definição, é o volume de líquido transferido em um giro completo. É equivalente ao volume de fluido que ocupa uma câmara e deve ser multiplicado pelo número de câmaras que a bomba possui. Por esse motivo, o deslocamento é expresso em centímetros cúbicos por rotação.

A figura 2.5 mostra um esquema para as bombas de deslocamento positivo e para as bombas de deslocamento não positivo.

De acordo com o tipo de elemento que produz a transferência do fluido, as bombas rotativas podem ser de engrenagens, de palhetas ou de pistões.

As bombas são classificadas em dois tipos: hidrodinâmicas e hidrostáticas. Nas próximas seções, são abordados apenas alguns dos muitos tipos de bombas disponíveis no mercado.



**Figura 2.5**  
Comparação esquemática das bombas de deslocamento positivo e das de deslocamento não positivo.

### 2.5.1 Bombas hidrodinâmicas e hidrostáticas

Podemos distinguir dois tipos de bombas hidráulicas: as hidrodinâmicas e as hidrostáticas.

#### Bombas hidrodinâmicas

Esse tipo de bomba praticamente não é usado em sistemas hidráulicos, pois o deslocamento que ela produz no fluido fica reduzido quando a resistência aumenta. Outro fator limitante para seu emprego em sistemas hidráulicos é o fato de que seu pórtico de saída pode ser completamente bloqueado enquanto a bomba está em funcionamento.

Essas bombas são de deslocamento **não positivo** (fluxo contínuo), e a única resistência é criada pelo tipo de fluido e pelas condições de escoamento.

#### Bombas hidrostáticas

Têm boa aplicabilidade em circuitos hidráulicos industriais, em maquinaria de construção e em aviação.

São de deslocamento **positivo** (fluxo pulsante) e fornecem certo volume fluido a cada rotação ou ciclo. Apesar de produzir fluxo de forma pulsante, a pressão no sistema não varia.

### 2.5.2 Eficiência volumétrica

Teoricamente, uma bomba desloca um volume de fluido igual ao produto do volume de suas câmaras pelo número de câmaras, em uma rotação. Por causa de vazamentos internos, na prática, o deslocamento é menor.

O vazamento da saída para a entrada da bomba ou para o dreno é maior quanto maior é a pressão de trabalho. Dessa forma, reduz-se a eficiência volumétrica da bomba.

A eficiência volumétrica nada mais é que a relação percentual entre o deslocamento real dividido pelo deslocamento teórico em porcentagem.

$$\text{Eficiência volumétrica} = \frac{\text{deslocamento}_{\text{real}}}{\text{deslocamento}_{\text{teórico}}} \cdot 100\% \quad (2.16)$$

#### Exemplo

Uma bomba a uma pressão de 60 kgf/cm<sup>2</sup> deveria deslocar, teoricamente, 30 litros de fluido por minuto. Entretanto, desloca apenas 24 litros por minuto. Qual é a sua eficiência volumétrica?

*Solução:*

Aplicando a equação 2.16, temos:

$$\text{Eficiência volumétrica} = \frac{24}{30} \cdot 100\% = 80\%$$

Portanto, a eficiência volumétrica da bomba é 80%.

#### Localização da bomba

A bomba normalmente está localizada sobre a tampa do reservatório de fluido hidráulico do sistema, e um duto de sucção faz a comunicação entre a bomba e o líquido no reservatório.

## 2.6 Alguns tipos de bombas hidráulicas

### 2.6.1 Classificação das bombas hidráulicas, segundo o deslocamento

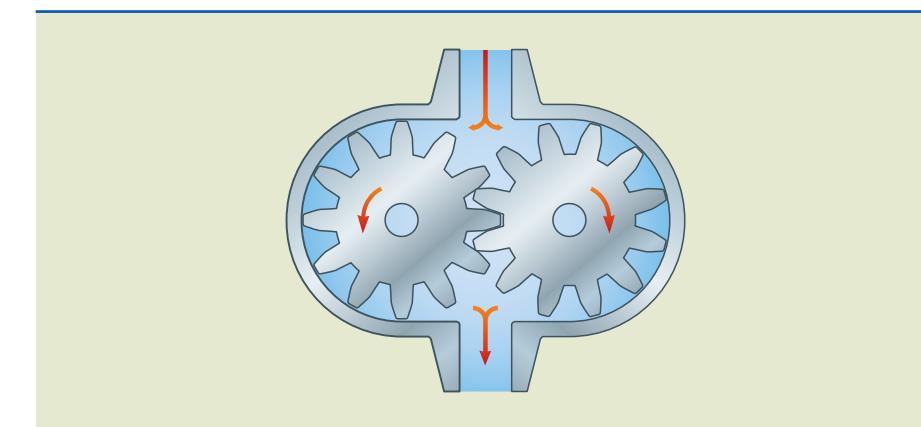
Uma bomba é responsável pelo deslocamento do fluido a ser fornecido para o circuito hidráulico. Na teoria, a quantidade de fluido em deslocamento é igual à quantidade de fluido deslocado em cada ciclo. Contudo, como sabemos, ocorrem vazamentos internos nas bombas e, quanto maior a pressão, maior será o vazamento. Esse fato reduz a eficiência volumétrica da bomba, que, na realidade, terá um deslocamento menor do que o esperado.

Assim, a capacidade de fluxo da bomba pode ser expressa pelo deslocamento ou pela saída em litros por minuto.

#### Bombas de engrenagem

Esse tipo de bomba é constituído de uma carcaça, na qual encontramos orifícios destinados à entrada e à saída do fluido hidráulico, e também de um dispositivo de bombeamento. Nesse dispositivo, há duas engrenagens, a **motora**, que é conectada a um elemento acionador (motor elétrico), e a **movida** (figura 2.6).

#### Bomba de engrenagem de dentes externos



**Figura 2.6**  
Representação esquemática de uma bomba de engrenagens.

Esse tipo de bomba (figura 2.6) é constituído basicamente pelos seguintes componentes:

- Carcaça.
- Duas rodas dentadas (engrenagens).
- Juntas.

Seu princípio de funcionamento também é bastante simples.

Na entrada, ao girar as engrenagens, o óleo é arrastado pela câmara de sucção através dos dentes das engrenagens e deslocado para o interior da câmara de pressão. No engrenamento dos dentes, o óleo comprimido é retido, sendo conduzido pelo espaço existente entre os dentes e a carcaça.

No lado da saída, os dentes se engrenam novamente e forçam o fluido para fora do sistema.

A vedação nesse tipo de bomba é realizada entre os dentes e a carcaça, e entre os próprios dentes da engrenagem.

São basicamente três tipos de engrenagens usadas nesse tipo de bombas: as de dentes retos, de dentes helicoidais e as de dentes em forma de espinha de peixe. Algumas dessas engrenagens estão representadas nas figuras 2.7 e 2.8.

**Figura 2.7**

Engrenagens de dentes retos.



LISOVSKAYA NATALIA/SHUTTERSTOCK

**Figura 2.8**

Engrenagem de dentes helicoidais.



ALEXZ/SHUTTERSTOCK

A construção das bombas de engrenagem de dentes externos é simples, motivo pelo qual é a mais encontrada no mercado. É econômica, robusta e de grande segurança de funcionamento.

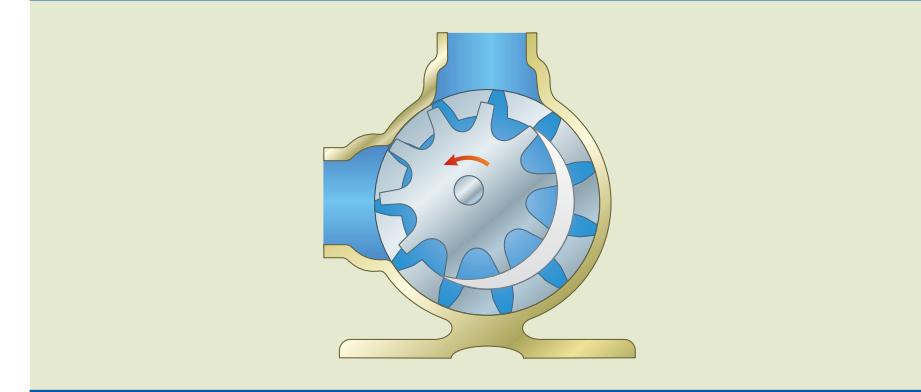
#### Bomba de engrenagem de dentes internos

A bomba de engrenagem interna (figura 2.9) consiste em uma engrenagem externa cujos dentes se engrenam na circunferência interna de uma engrenagem maior.

Esse tipo de bomba tem funcionamento similar à bomba de engrenagens de dentes externos. O acionamento da engrenagem de dentes internos é feito pela engrenagem de dentes externos (que está ligada ao motor). Dessa forma, o óleo é succionado do reservatório de forma similar à bomba de engrenagem de dentes externos, pois forma-se um vácuo parcial entre os dentes da engrenagem. Depois de arrastado entre os dentes, o óleo sai pelo orifício de saída da bomba.

**Figura 2.9**

Bomba de engrenagens internas.



#### Volume variável de uma bomba de engrenagem

O volume que a bomba de engrenagem desloca na saída de uma bomba é determinado ao se multiplicar o volume de fluido deslocado por cada dente de engrenagem pela rotação.

Às vezes, é necessário modificar o volume de fluido deslocado das bombas de engrenagens, entretanto, essa variação não pode ser feita com a bomba em operação.

Uma forma de modificar o fluxo de saída de uma bomba de engrenagem é por meio de um acionador, por exemplo, usando um motor elétrico de rotação variável. Com um motor de combustão interna, também podemos modificar o fluxo de saída.

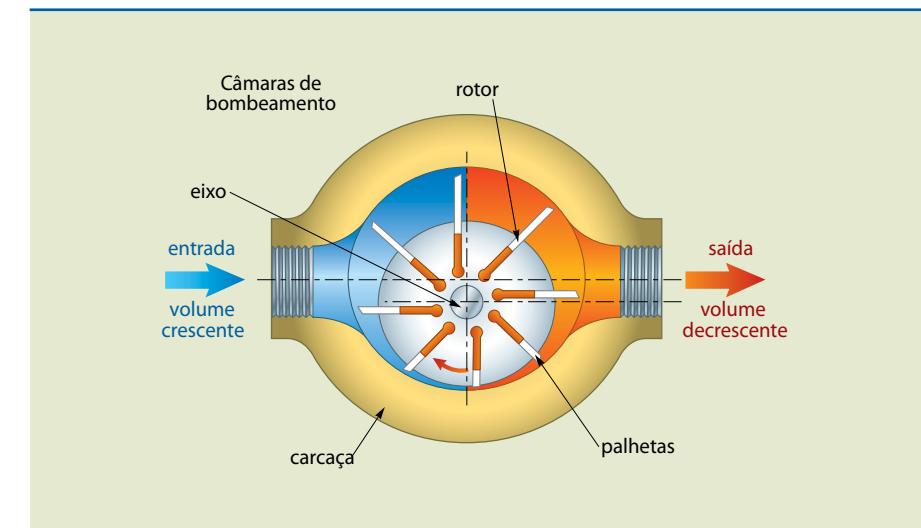
#### Bombas de palheta

Como o nome indica, esse tipo de bomba possui palhetas móveis em um rotor (gira pela ação de um motor elétrico), dentro de uma carcaça ou de um anel.

Como o eixo do rotor é excêntrico à linha de centro da bomba, as câmaras formadas entre rotor, palhetas e carcaça variam de volume, ora fazendo a sucção do fluido hidráulico, ora empurrando-o para a saída da bomba (figura 2.10).

**Figura 2.10**

Representação esquemática de uma bomba de palhetas.



### Como trabalha uma bomba de palhetas?

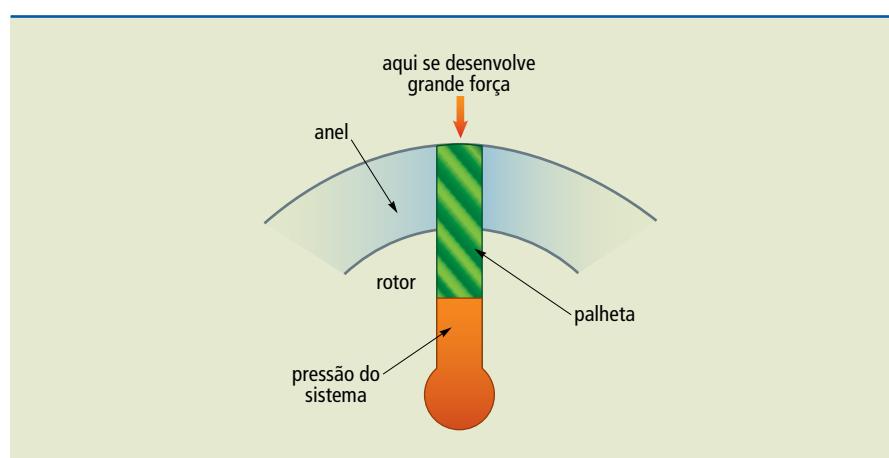
Nesse tipo de bomba, as palhetas são suportadas pelo rotor ligado a um eixo, que é conectado a um elemento acionador (ver detalhe da palheta na figura 2.11). À medida que o rotor entra em rotação, as palhetas tendem a sair do rotor, mas são limitadas pelo anel ou pelo contorno do cilindro.

Quando o fluido entra na bomba, o rotor, que é excêntrico ao anel, promove a sucção do fluido, pois a câmara formada entre rotor, palhetas e anel vai aumentando e depois, diminuindo. Para separar o fluido que entra do fluido que sai, é usada uma placa de entrada, que se encaixa sobre o anel, o rotor e as palhetas.

A entrada da placa de orifício está situada no local em que o volume formado entre anel e palhetas é crescente e, consequentemente, a saída do óleo da bomba é feita na parte em que o orifício de saída da placa tem seu volume decrescente.

**Figura 2.11**

Detalhe da palheta de uma bomba de palhetas.

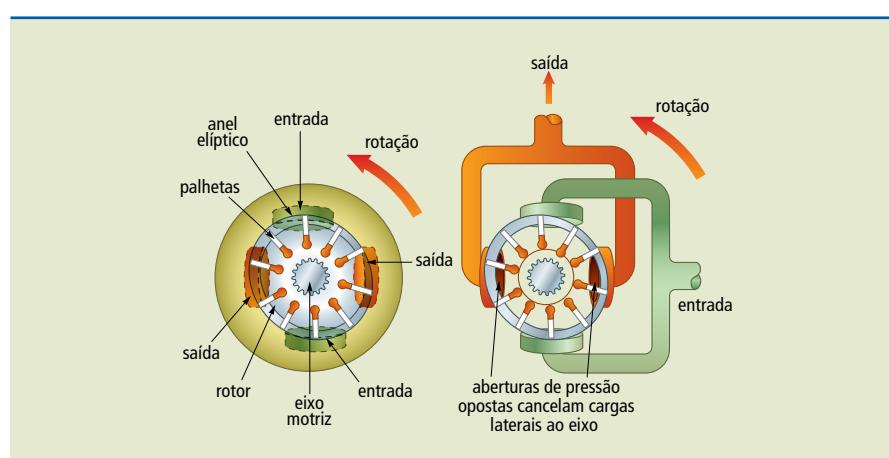


### Bomba rotativa de palhetas, admissão externa, curso duplo

O funcionamento desse tipo de bomba ocorre ao girar o rotor. As palhetas são pressionadas contra uma superfície curva de deslizamento, transportando o óleo desde a câmara de sucção até a câmara de pressão (figura 2.12).

**Figura 2.12**

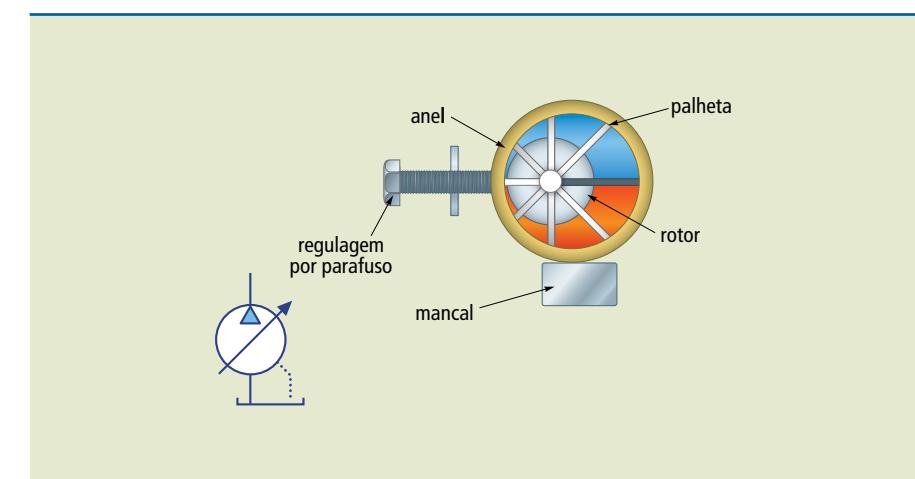
Detalhe de bomba rotativa de palhetas com admissão externa, curso duplo.



A fim de aliviar os mancais, frequentemente se colocam duas câmaras de sucção e duas de pressão, uma em frente à outra.

A vazão, nesse tipo de construção, não é variável.

### Bomba rotativa de palhetas, admissão interna, curso simples

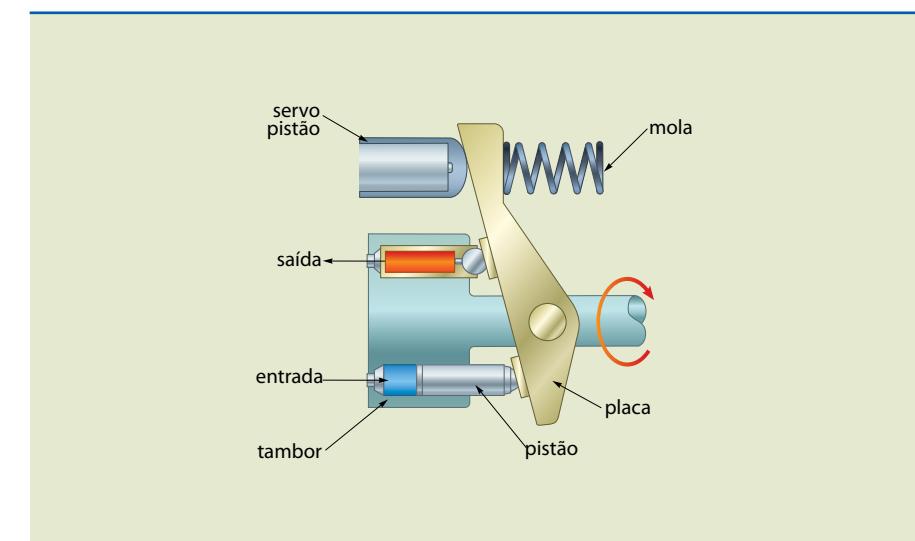


**Figura 2.13**

Bomba rotativa de palhetas, admissão interna, curso simples.

Nas bombas rotativas reguláveis de palhetas, o rotor está montado em forma excêntrica. O óleo é transportado tangencialmente, desde o lado da sucção até o lado da pressão. Nesse tipo de construção, pode-se variar ou inverter a direção do fluxo na regulagem da excentricidade (figura 2.13).

### Bombas de pistão axial variável



**Figura 2.14**

Bomba de pistão axial variável.

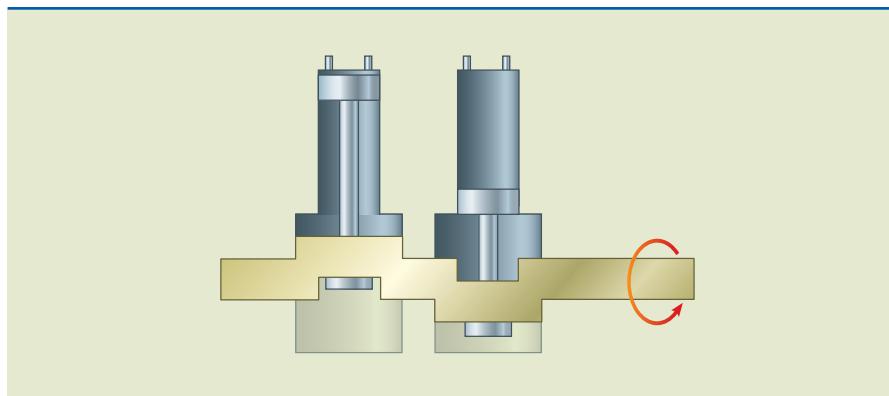
Quando o disco inclinado é posto a girar, os pistões movimentam-se em vaivém; dessa maneira, os pistões se enchem e se esvaziam. Basculando o disco inclinado, é possível variar o fluxo e inverter a direção dele.

## Bomba de pistões em linha

O eixo de manivelas, ao girar, produz o movimento dos pistões, impulsionando um fluxo de óleo. Essa construção é utilizada principalmente como bomba de injeção (figura 2.15).

**Figura 2.15**

Bomba de pistões em linha.



## 2.7 Perda de carga

Na hidráulica, vários aspectos práticos envolvem a análise do escoamento de fluidos incompressíveis em condutos forçados e uniformes e em regime permanente.

São condições que representam a maioria das situações encontradas no dia a dia por grande parte dos projetistas de hidráulica; condições de escoamento que tratam de vazão, velocidade, diâmetro e perda de carga.

Conduto forçado é aquele em que o fluido escoa à plena seção e sob pressão.

Condutos de seção circular costumam ser chamados de tubos ou tubulações.

Um conduto uniforme é aquele que tem sua seção transversal constante em todo seu comprimento. Como já mencionado neste capítulo, se a vazão do fluido em qualquer seção do conduto não variar com o tempo, o regime de escoamento é dito permanente.

Sabemos também que a mudança de densidade nos líquidos (ao contrário do que se passa com os gases) não é significativa quando se varia sua pressão. A variação de densidade nos líquidos só é significativa quando há grandes aumentos ou diminuições da temperatura. Diante desse fato, nos escoamentos em regime permanente, podemos considerar que os líquidos se comportam como se fossem incompressíveis. Podemos citar como exemplo a água, o álcool, o querosene, a gasolina, o óleo diesel, o vinho, o leite, entre outros.

É possível identificar dois tipos de escoamentos viscosos: o laminar e o turbulento. Sob certas circunstâncias, o escoamento pode experimentar características híbridas entre as duas condições e, nesse caso, o escoamento é dito de transição.

No escoamento laminar, as partículas do escoamento seguem trajetórias regulares, e as trajetórias de duas partículas vizinhas não se cruzam.

Já no escoamento turbulento, a velocidade em determinado ponto varia constantemente em grandeza e direção, com trajetórias irregulares, e uma mesma partícula pode ora localizar-se próxima do eixo do tubo, ora próxima da parede do tubo, o que caracteriza um escoamento de padrão caótico.

O que determina se um escoamento é laminar, é turbulento ou está na transição é a relação entre as forças viscosas e as forças de inércia. As forças viscosas são causadas pela atração molecular e tendem a dificultar o escoamento; as forças de inércia são causadas pela existência de massa e de velocidade no processo. Em um escoamento em baixa velocidade, as forças viscosas são predominantes em relação às forças de inércia. Nesse caso, o escoamento acontece de modo organizado, porque as partículas de fluido não têm liberdade de movimentação: essa movimentação está restrita pelas forças de atração molecular. Nos casos de escoamentos com maiores velocidades, as forças de inércia suplantam as forças viscosas, e a movimentação das partículas torna-se desordenada.

Quando um líquido escoa no interior de um tubo, ocorre certa perda de energia denominada perda de pressão ou perda de carga. Esse decréscimo de energia do líquido é causado pelo atrito com as paredes do tubo e pela viscosidade do líquido em escoamento.

### 2.7.1 Perda de carga distribuída

É aquela que ocorre nos trechos retos da tubulação por causa do atrito, o que gera perda de pressão distribuída ao longo do comprimento do tubo, fazendo com que a pressão total vá diminuindo gradativamente.

A perda de carga (perda de energia) do fluido em um circuito hidráulico depende:

- Do diâmetro da tubulação.
- Da vazão, ou mais especificamente, da velocidade de escoamento.
- no caso de escoamento turbulento, da rugosidade interna do tubo e, portanto, do material e modo de sua fabricação.
- Do comprimento da tubulação.
- Da viscosidade e da densidade do fluido.

### 2.7.2 A perda de carga localizada ou singular

Ocorre sempre que os dispositivos ou conexões (curvas, válvulas, registros, válvulas de retenção, luvas de redução etc.) são inseridos na tubulação (são chamados de singularidades), provocando uma queda acentuada da pressão. Verificamos, então, uma perda de carga localizada no curto espaço compreendido pelo acessório.

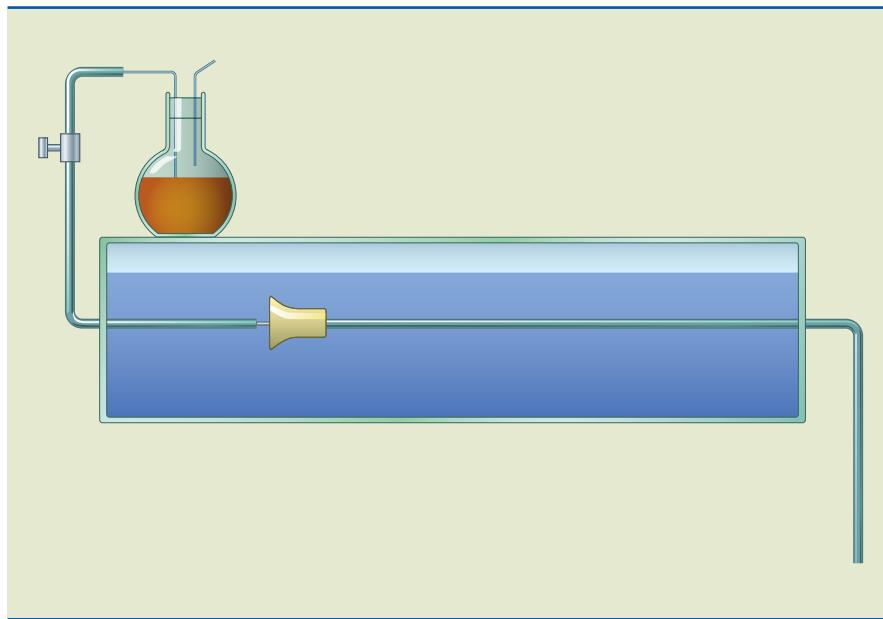
É comum encontrarmos ábacos ou tabelas que expressam a perda de carga localizada em termos de comprimento equivalente, que é o comprimento de tubo que produziria a mesma perda de carga que o acessório produz.

### 2.7.3 Experimento de Reynolds e os escoamentos viscosos

Osborne Reynolds (1842-1912) realizou, em 1883, um experimento buscando mostrar os tipos de escoamento. Em um deles, os elementos do fluido seguiram, ao longo de linhas de movimento, de forma direta a seu destino; e, no outro, as trajetórias se mostraram sinuosas. Com essa experiência, ele demonstrou como visualizar escoamentos laminares e turbulentos.

A figura 2.16 representa esquematicamente o experimento de Reynolds. De modo geral, o experimento clássico de Reynolds consiste em um grande tanque contendo água e um tubo de vidro em seu interior. A função do tubo de vidro é permitir que se faça a visualização do padrão de escoamento de água no interior da tubulação. Como a água é incolor, um elemento traçador (fluido colorido) é injetado no centro do tubo de vidro. Há um bocal convergente montado na entrada do tubo de vidro para conduzir melhor o escoamento da água do tanque para o interior do tubo de vidro, e também do fluido traçador.

**Figura 2.16**  
Representação esquemática  
do experimento  
de Reynolds.



O experimento consiste basicamente em observar o padrão do escoamento no interior do tubo de vidro com o auxílio do fluido traçador em diversas vazões. A figura 2.17 indica o padrão encontrado à baixa velocidade (baixa vazão), ou escoamento laminar, o padrão de alta velocidade (alta vazão), ou escoamento turbulento, e também a transição entre eles, em uma vazão intermediária.

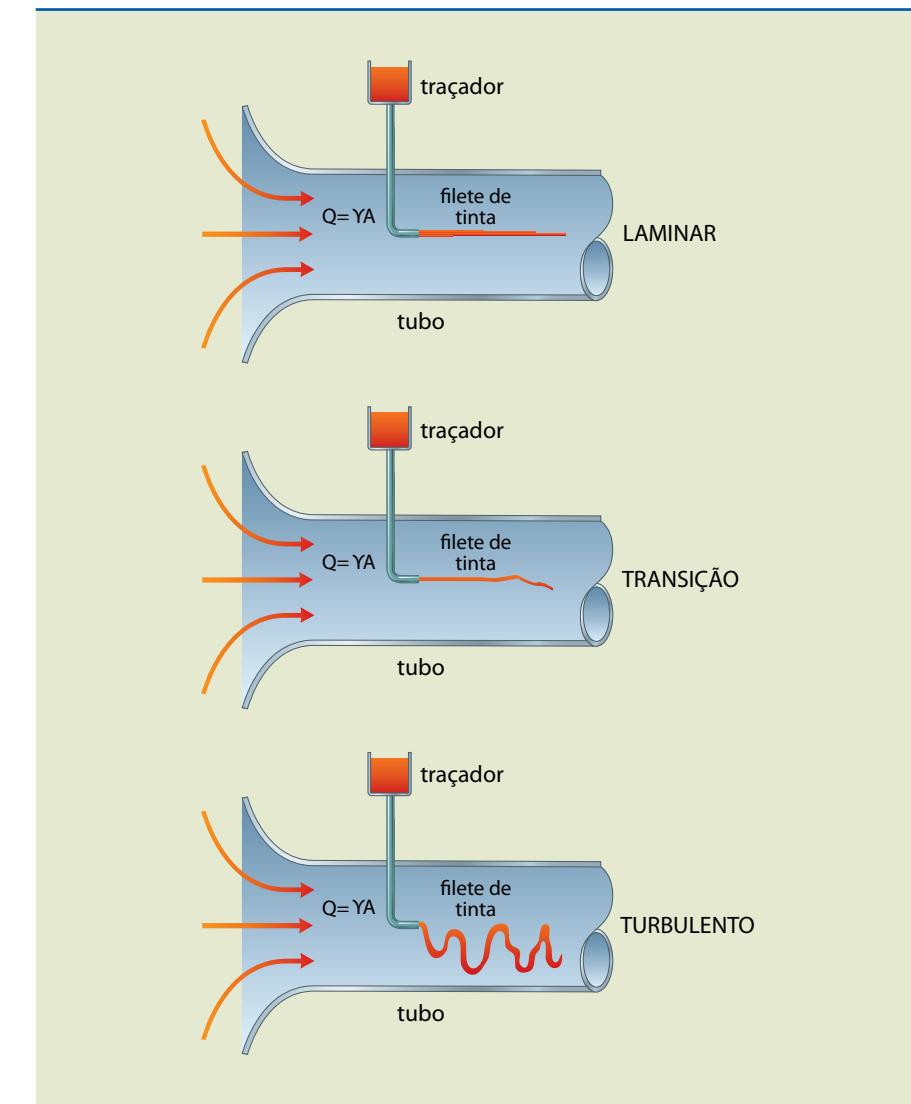
No escoamento laminar, o fluido traçador injetado no centro do duto se mantém em escoamento na região central; e, no escoamento turbulento, a flutuação de velocidades mistura o fluido traçador à corrente de escoamento principal.

Um número adimensional, chamado número de Reynolds, é o parâmetro indicativo de qual padrão de escoamento está ocorrendo. Fisicamente, o número de Reynolds é o quociente entre as forças de inércia e as forças viscosas que agem em um escoamento. Nesse caso, quanto maior for o número de Reynolds, maior será a turbulência. O número de Reynolds é definido como:

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2.17)$$

em que:

$\rho$  é a massa específica do fluido;  
 $v$  é a velocidade média do fluido;  
 $D$  é o diâmetro da tubulação por onde passa o fluxo; e  
 $\mu$  é uma propriedade do fluido denominada viscosidade dinâmica ou absoluta, cuja unidade no SI é Pa·s (pascal vezes segundo).



**Figura 2.17**  
Detalhe dos padrões de  
escoamento no tubo de  
vidro do experimento  
de Reynolds.

A viscosidade dinâmica ou absoluta é função do tipo de substância, e seu valor depende da pressão e da temperatura. Em nosso dia a dia, lidamos com muitos fluidos de viscosidades diferentes, como a água e o óleo. Esvaziar um copo contendo água é muito mais fácil do que esvaziar o mesmo copo contendo óleo. Isso se deve ao fato de o óleo apresentar maior resistência ao escoamento do que a água, ou seja, o óleo é mais viscoso do que a água. Gases também possuem viscosidade, mas essa é comparativamente muito menor do que a viscosidade nos líquidos.

Para dutos de seção transversal circular, admite-se escoamento laminar com valores do número de Reynolds inferiores a 2000, e escoamento turbulento com valores superiores a 2400. Na faixa entre 2000 e 2400, acontece o escoamento de transição. Esses números são valores práticos de referência encontrados na literatura clássica da mecânica dos fluidos.

#### 2.7.4 Equacionamento da perda de carga

A carga é a quantidade de energia de uma partícula de peso unitário. É definida pela expressão:

$$H = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} \quad (2.18)$$

Por análise dimensional, podemos perceber que a carga tem unidade de comprimento (no SI, o metro). A equação de Bernoulli (equação 2.13) pode ser escrita usando a carga (da equação 2.18):

$$H_1 = z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = H_2 = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} = \text{constante} \quad (2.19)$$

A equação 2.19 só pode ser usada em situação de escoamento ideal de um fluido incompressível em regime permanente em condição unidimensional. No caso de escoamento real, há perda de energia (perda de carga) entre duas seções (1 e 2); dessa forma, a equação fica:

$$H_1 - H_{p1,2} = H_2 \text{ ou}$$

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} - H_{p1,2} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \quad (2.20)$$

O termo  $H_{p1,2}$  refere-se à perda de carga entre as seções 1 e 2. Caso, entre as seções 1 e 2, haja uma tubulação de trecho reto, a perda de carga é distribuída. Se, entre as seções 1 e 2, houver uma singularidade (válvulas ou conexões), a perda de carga é localizada. Se, entre as seções 1 e 2, houver associações de tubos e singularidades, a perda é a soma das duas parcelas (distribuída e singular).

#### Determinação da perda de carga distribuída

A equação de Darcy-Weisbach é amplamente utilizada para determinação da perda de carga em tubulações de trecho reto. Nela, há um número adimensional chamado fator de atrito, indicado pela letra  $f$ , que relaciona o atrito do fluido com a parede do duto. A equação de Darcy-Weisbach para um tubo de diâmetro  $D$  e comprimento  $L$  é:

$$H_p = f \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (2.21)$$

O fator de atrito pode ser determinado para escoamento laminar ( $R_e < 2000$ ) pela equação:

$$f = \frac{64}{Re} \quad (2.22)$$

E, para escoamento turbulento, em dutos com rugosidade média  $\epsilon$ , pela equação de Swamee-Jain:

$$f = \frac{1,325}{\left[ \ln \left( \frac{\epsilon/D}{3,7} + \frac{5,74}{Re^{0.9}} \right) \right]} \quad (2.23)$$

#### Determinação da perda de carga localizada

A perda de carga localizada dos acessórios é calculada pelo produto de um coeficiente característico do acessório pela carga cinética que o atravessa. Esse coeficiente costuma ser indicado pela letra  $k$ .

A perda causada pelo acessório é calculada pela expressão:

$$H_p = k \frac{V^2}{2g} \quad (2.24)$$

em que:

- $H_p$  é a perda de carga singular [m];
- $k$  é o coeficiente de perda de carga [adimensional];
- $V$  é a velocidade média do escoamento no duto [m/s];
- $g$  é a aceleração da gravidade [ $m/s^2$ ].

O quadro 2.1 indica o coeficiente de perda de carga localizada para diversos tipos de singularidades. O coeficiente de perda de carga localizado é obtido por meio de ensaios experimentais da singularidade em bancadas de testes.

**Quadro 2.1**

Coeficiente de perda de carga localizada ou singular ( $k$ ) para várias singularidades [adimensional].

Acessórios	Coeficiente de perda de carga localizada ( $k$ )
Curva 90°, raio normal, flangeada	0,3
Curva 90°, raio normal, rosqueada	1,5
Curva 90°, raio longo, flangeada	0,2
Curva 90°, raio longo, rosqueada	0,7
Curva 45°, raio longo, flangeada	0,2
Curva 45°, raio normal	0,4
União rosqueada	0,08
União com cola	0
Válvula globo	10
Válvula gaveta	0,15
Válvula de retenção	2
Válvula esfera	0,05

Em dutos de seção transversal não circular, o diâmetro  $D$  pode ser substituído pelo diâmetro hidráulico ( $D_H$ ), definido como:

$$D_H = \frac{4A}{P_{molhado}} \quad (2.27)$$

em que  $A$  é a área da seção transversal ocupada efetivamente pelo fluido e  $P_{molhado}$ , o perímetro molhado do duto.

Alternativamente, a perda de carga localizada poderia ser calculada pelo comprimento característico, definido como o comprimento de tubulação de trecho reto com perda equivalente ( $L_{eq}$ ) à perda de carga imposta pela singularidade à passagem do fluido. O comprimento equivalente pode ser relacionado ao coeficiente de perda de carga singular, caso as equações 2.21 e 2.24 sejam igualadas:

$$f \frac{L_{eq}}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} = k \frac{v^2}{2g} \text{ ou:}$$

$$L_{eq} = \frac{k f}{D} \quad (2.25)$$

**Determinação da perda de carga total**

Sabendo que a perda de carga total  $Hp_{1,2}$  (equação 2.20) é a soma da perda de carga distribuída (equação 2.21) e da localizada (equação 2.24), a equação geral torna-se:

$$Hp_{1,2} = f \frac{(L + L_{eq})}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (2.26)$$

# **Capítulo 3**

## **Princípios básicos de Termodinâmica**

### 3.1 Primeira lei da Termodinâmica

Para compreendermos as transformações que a energia pode sofrer para realização de trabalho, precisamos conhecer alguma coisa sobre a primeira lei da Termodinâmica.

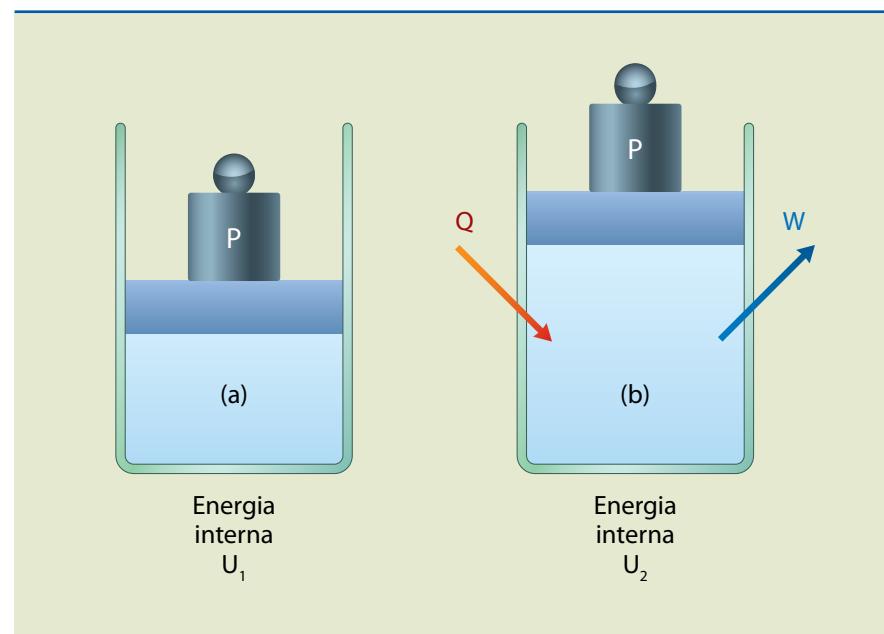
A primeira lei da Termodinâmica é o princípio da conservação da energia. A energia não pode ser criada nem destruída, apenas transformada de um tipo em outro. Em uma usina termoelétrica, por exemplo, queima-se combustível (gás natural, carvão etc.), que libera a energia química contida nas ligações moleculares, transformando essa energia em calor. Este, por sua vez, é absorvido pela água, que se converte em vapor de água e move uma máquina conhecida como turbina a vapor. Na sequência, a energia acumulada no vapor é transmitida à turbina, que movimenta um eixo (energia mecânica), e este simultaneamente gira um equipamento elétrico capaz de transformar a energia mecânica em energia elétrica.

Desse modo, a energia elétrica não foi criada “do nada” na usina termoelétrica: ela estava armazenada no combustível, na forma de ligações químicas, e, por uma série de transformações, converteu-se em energia elétrica.

Na figura 3.1, a força de um peso comprime uma massa de um gás no interior de um cilindro com êmbolo até a situação de equilíbrio. Nessa condição de operação, o sistema tem determinada energia interna  $U_1$ .

Ao considerarmos que não há troca de calor com outros meios, se uma quantidade de calor  $Q$  é adicionada ao gás, ele se expande e o pistão levanta o peso até determinada altura, executando determinado trabalho  $W$ , conforme observado na situação b da figura. Nessa situação, a nova energia interna do sistema é  $U_2$ .

**Figura 3.1**  
Energia interna de um sistema.



A primeira lei relaciona as grandezas anteriormente mencionadas:

$$\Delta U = Q - W \quad (3.1)$$

De acordo com a equação 3.1, a variação da energia interna de um sistema é igual à diferença entre o calor transferido para o sistema e o trabalho executado pelo sistema. Isso significa que a energia pode ser transformada em outra forma de energia, mas não ser criada nem destruída.

No Sistema Internacional (SI), a unidade de energia é o joule (J), seja ela energia interna, calor ou trabalho. Por tradição, há quem utilize calorias ou múltiplos como quilocaloria (kcal), megacaloria (Mcal); mas, sempre que possível, devemos evitar o uso dessas unidades. Uma caloria equivale a 4,1868 joules (número que é chamado equivalente mecânico do calor, conceito atribuído a Joule).

A grandeza  $U + PV$  é denominada entalpia da massa, em que  $U$  é a energia interna;  $P$ , a pressão do sistema; e  $V$ , o volume.

É geralmente representada pela letra  $H$ . Assim:

$$H = U + PV \quad (3.2)$$

A entalpia tem a mesma unidade de energia, isto é, joule (J) no Sistema Internacional. E a entalpia específica  $h$  (entalpia por unidade de massa, J/kg) é definida de modo similar, com as demais grandezas na forma específica, ou seja, por unidade de massa:

$$h = \frac{H}{m} = \frac{U}{m} + P \frac{V}{m} = u_e + Pv_e \quad (3.3)$$

em que  $u_e$  é a energia interna específica (J/kg) e  $v_e$  é o volume específico ( $m^3/kg$ )

#### 3.1.1 Calor específico

Para aumentar  $\Delta T$  a temperatura de uma massa  $m$  de uma substância em uma situação em que não ocorra mudança de estado (líquido para vapor ou vapor para líquido), a experiência indica que a quantidade de calor necessária  $Q$  é proporcional à massa e à diferença de temperatura ( $\Delta T$ ):

$$Q = mc\Delta T \quad (3.4)$$

O coeficiente de proporcionalidade  $c$  é denominado calor específico da substância, cuja unidade no Sistema Internacional é  $J/(kg \cdot K)$ , sendo comumente indicado também por  $J/(kg \cdot ^\circ C)$ .

Lembramos, entretanto, que intervalos entre temperaturas em  $^\circ C$  e em  $K$  são idênticos. No entanto, dados em algumas unidades em processo de obsolescência – cal/(g  $^\circ C$ ) ou kcal/(kg  $^\circ C$ ) – certamente ainda podem ser encontrados.

O calor específico varia com a temperatura e, portanto, a igualdade apresentada na equação 3.4 só permite resultados precisos em intervalos de temperatura relativamente pequenos.

Em cálculos mais exatos, deve ser levada em conta a variação do calor específico com a temperatura.

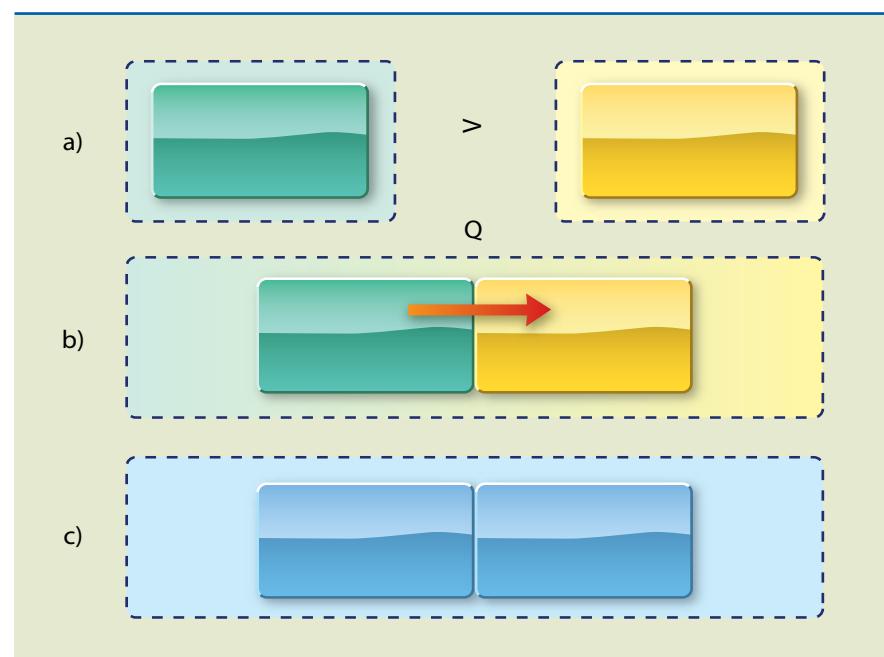
### 3.2 Segunda lei da Termodinâmica

A primeira lei da termodinâmica é fundamental para os processos energéticos, isto é, a energia não pode ser gerada ou desaparecer espontaneamente; na realidade, o que acontece é um balanço energético.

A segunda lei acrescenta restrições quanto ao modo de utilização e comportamento das transformações energéticas.

A segunda lei indica qual é o sentido correto de transferência de energia. Vejamos o exemplo da figura abaixo. Na situação a da figura 3.2, existem dois corpos isolados:

**Figura 3.2**  
Transferência de calor entre dois corpos.



- **Corpo quente (verde)**, com temperatura  $T_A$ .
- **Corpo frio (laranja)**, com temperatura  $T_B < T_A$ .
- Por exemplo, a eficiência de uma máquina térmica seria ideal se todo calor  $Q_1$ , proveniente da queima do combustível, fosse transformado em trabalho, figura 3.2a. Assim, a eficiência seria 100%, mas isso nunca acontece.
- Numa máquina real, sempre acontece uma troca de calor com uma fonte fria (muitas vezes o próprio ambiente) causando, assim, uma perda no rendimento.
- É impossível converter todo calor trocado com apenas uma fonte de trabalho.

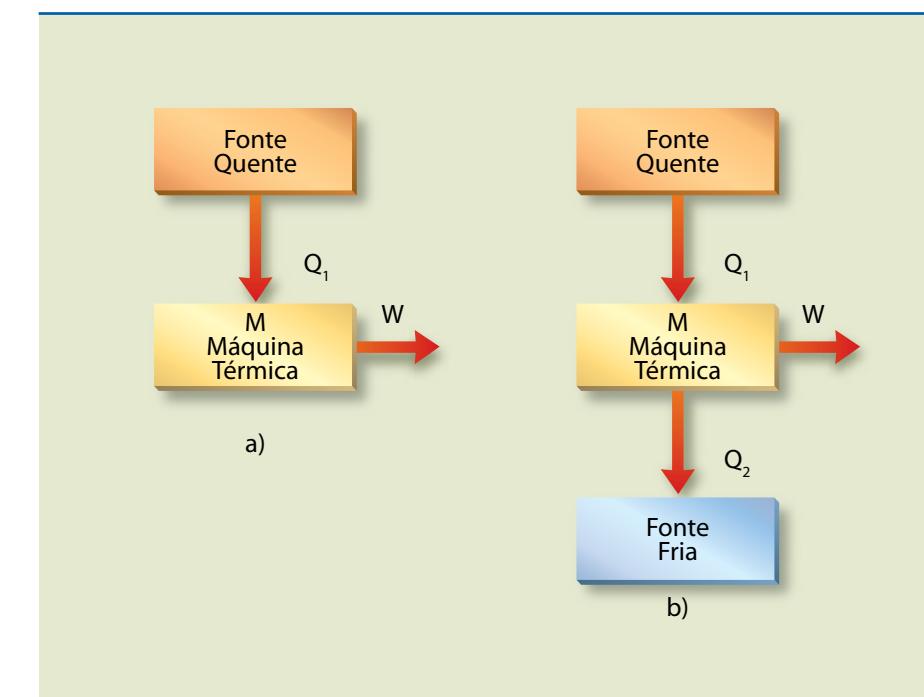
Se dois corpos estão em contato, em um sistema isolado, situação b da figura 3.1, a experiência mostra que a energia se transporta sob forma de calor do corpo com temperatura maior para o corpo com temperatura menor até que se estabeleça equilíbrio em uma condição (temperatura  $T_E$ ), em que  $T_A > T_E > T_B$ .

Devemos levar em consideração que o calor nunca passa de um corpo frio para o quente (um dos enunciados da segunda lei da Termodinâmica).

Por exemplo, a eficiência de uma máquina térmica seria ideal se todo calor  $Q_1$ , proveniente da queima do combustível, fosse transformado em trabalho, figura 3.2b. Assim, a eficiência seria de 100%, mas isso nunca acontece.

Numa máquina real, sempre acontece uma troca de calor com uma fonte fria, muitas vezes o próprio ambiente, causando, assim, uma perda no rendimento.

É impossível converter todo calor trocado com apenas uma fonte de trabalho.



**Figura 3.3**  
Eficiência de uma máquina térmica.

Todo o calor  $Q_1$  de uma fonte quente (exemplo: a queima de um combustível) seria transformado em trabalho  $W$ . Assim,  $W = Q_1$ , com eficiência  $\eta = 1$  ou 100%. Mas nunca ocorre esse tipo de eficiência.

Uma máquina real trabalha como ilustrado na situação b da figura 3.3. Há sempre uma quantidade de calor  $Q_2$  que é trocada com uma fonte fria (muitas vezes, o próprio ambiente).

Outra forma de apresentação da segunda lei é a que segue.

É impossível converter em trabalho útil todo o calor trocado com uma única fonte.

Quando dois corpos ou fluidos em diferentes temperaturas interagem, ocorre troca de energia interna entre eles até a temperatura atingir o equilíbrio.

Em um sistema isolado de outras formas de transferência de energia, a quantidade de energia transferida é a quantidade de calor trocado, enquanto houver diferença de temperatura.

Calor e trabalho não dependem apenas da diferença entre o estado inicial e o estado final do processo, dependem também do caminho e se o sistema se encontra em uma evolução reversível ou quase estática entre o estado inicial A e o estado final B.

### 3.2.1 Processos básicos pelos quais ocorrem transferências de calor

As transferências de calor se dão por condução, convecção ou radiação.

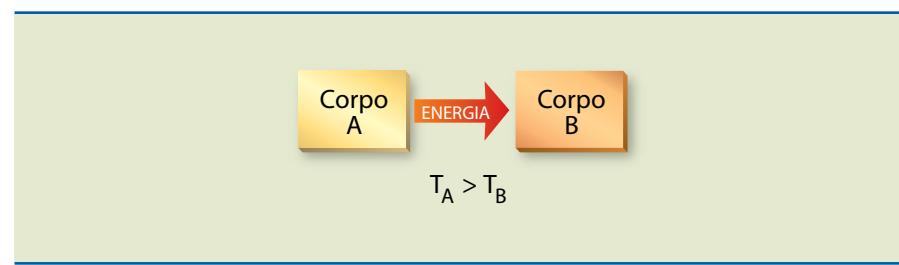
**1. Condução** – ocorre em um meio sólido ou em um meio fluido estacionário (figura 3.4).

**2. Convecção** – ocorre entre uma superfície e um fluido em movimento (figura 3.5).

**3. Radiação** – ocorre entre duas superfícies sem a necessidade de meio físico, exemplo: transmissão de energia do Sol para a Terra através do vácuo.

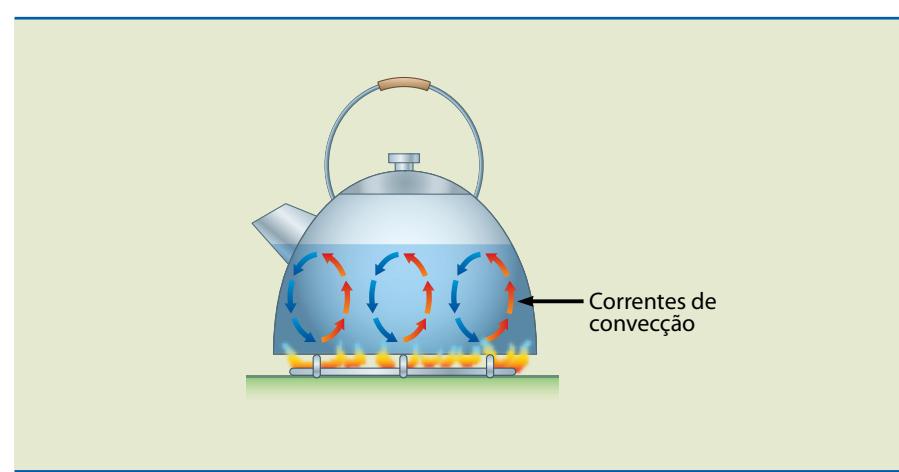
**Figura 3.4**

Transferência de calor por condução.



**Figura 3.5**

Correntes de convecção originadas por uma fonte de calor.



## 3.3 Gás ideal ou gás perfeito

Para facilitar o estudo da termodinâmica dos gases, consideramos inicialmente as transformações em um **gás perfeito** ou **gás ideal**, isto é, um gás de comportamento irreal, cujas moléculas não têm volume nem forças de repulsão ou atração.

Gases reais, como o hidrogênio e o hélio, apresentam comportamento bem próximo do gás ideal. Outros gases (ou misturas, como o ar), em pressões relativamente pequenas e temperaturas apropriadas, também oferecem aproximação razoável de um gás ideal.

### 3.3.1 Equação de estado para um gás ideal ou equação dos gases perfeitos

Uma equação de estado é uma equação matemática que relaciona, para uma substância pura, a temperatura (T), a pressão (P) e o volume (V). Existem diversas equações de estado. A equação de formulação matemática mais simples e também a mais conhecida é a equação de estado dos gases perfeitos:

$$P = \rho RT \text{ ou}$$

$$P = \frac{m}{V}RT \quad (3.5)$$

Na equação 3.5, P é a pressão medida na escala absoluta (ver equação 1.3);  $\rho$ , a densidade (definida na equação 1.1); R, uma constante particular do gás; e T, a temperatura na escala absoluta. A transformação da temperatura na escala Celsius para a escala Kelvin é:

$$T(K) = T(^{\circ}\text{C}) + 273,15 \quad (3.6)$$

A constante particular do gás é definida como:

$$R = \frac{\bar{R}}{M} \quad (3.7)$$

em que  $\bar{R}$  é a constante universal dos gases cujo valor é  $8,3145 \text{ (N} \cdot \text{m})/(\text{mol} \cdot \text{K})$  e M, a massa molecular da substância em kg/mol. Como exemplo, podemos citar a constante particular do ar, que vale  $287 \text{ (N} \cdot \text{m})/(\text{kg} \cdot \text{K})$ , obtida, segundo a equação 3.7, como o quociente entre a constante universal dos gases e a massa molecular do ar de  $M = 28,97 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$ . A massa molecular das substâncias é facilmente obtida pela tabela periódica de elementos encontrada nos livros de Química.

### Exemplo

Manter a correta pressão nos pneus do carro é absolutamente essencial para evitar seu desgaste excessivo ou aumento no consumo de combustível. Em geral,

nos postos de gasolina, há um manômetro para verificar a pressão do ar no interior dos pneus e também um compressor para enchê-los, caso seja necessário. O manômetro mede a pressão na escala efetiva.

Qual deve ser a massa de ar dentro de um pneu com pressão interna de 32 psi, cujo volume é de 35 litros? O posto de gasolina em que foi feita a conferência da pressão de 32 psi do pneu em questão está localizado em uma cidade litorânea e, no dia da leitura, a temperatura era de 24 °C.

*Solução:*

Inicialmente, deve-se transformar a pressão de 32 psi em Pa. Sabemos que psi é uma unidade de medida de pressão no Sistema Inglês e 1 psi = 1 lbf/in<sup>2</sup>, ou seja, o resultado entre a divisão de libra-força por polegada ao quadrado. Sabemos que 1 lbf = 4,44822 N e 1 in = 25,4 mm. Desse modo:

$$P = 32 \text{ psi} = 32 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} = 32 \frac{(1\text{lbf})}{(1\text{in})^2} = 32 \frac{(4,44822 \text{ N})}{(25,4 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2} = 220\,632,15 \text{ Pa}$$

A pressão de 220 632,15 Pa está na escala efetiva, sendo necessário somar o valor da pressão atmosférica do local para obtenção da pressão na escala absoluta. Estando o posto de gasolina localizado em uma cidade litorânea, a pressão atmosférica do local pode ser considerada 101 325 Pa; assim, a pressão interna do pneu na escala absoluta é de 321 957,15 Pa abs. Usando a equação de estado dos gases perfeitos (equação 3.5), com a constante do ar como 287 (N · m)/(kg · K) e a temperatura de T = 24 + 273,15 = 297,15 K e lembrando que 1 000 L = 1 m<sup>3</sup>:

$$m = \frac{(321\,957,15 \text{ Pa}) \cdot (0,035 \text{ m}^3)}{\left(287 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right) \cdot (297,15 \text{ K})} = 0,132 \frac{\left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right) \cdot (\text{m}^3)}{\left(\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right) \cdot (\text{K})} = 0,132 \text{ kg} = 132 \text{ g}$$

### 3.3.2 Processos particulares para um gás ideal

Um sistema é definido como uma quantidade fixa de massa. Nesse sentido, se uma quantidade fixa de um gás ideal sofre um processo que o leve de uma condição 1 para uma condição 2, sabendo que, pela definição de sistema, a massa não varia, a equação 3.5 pode ser aplicada aos dois estados (1) e (2) e as massas igualadas nas duas condições:

$$P_1 = \frac{m_1}{V_1} R T_1 \rightarrow m_1 = \frac{P_1 V_1}{R T_1}$$

$$P_2 = \frac{m_2}{V_2} R T_2 \rightarrow m_2 = \frac{P_2 V_2}{R T_2}$$

Igualando as massas e reorganizando a equação:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (3.8)$$

A equação 3.8 pode ser aplicada a um sistema contendo um gás ideal. Caso o processo 1 → 2, seja:

- Isotérmico (com temperatura constante):

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad (3.9)$$

- Isobárico (com pressão constante):

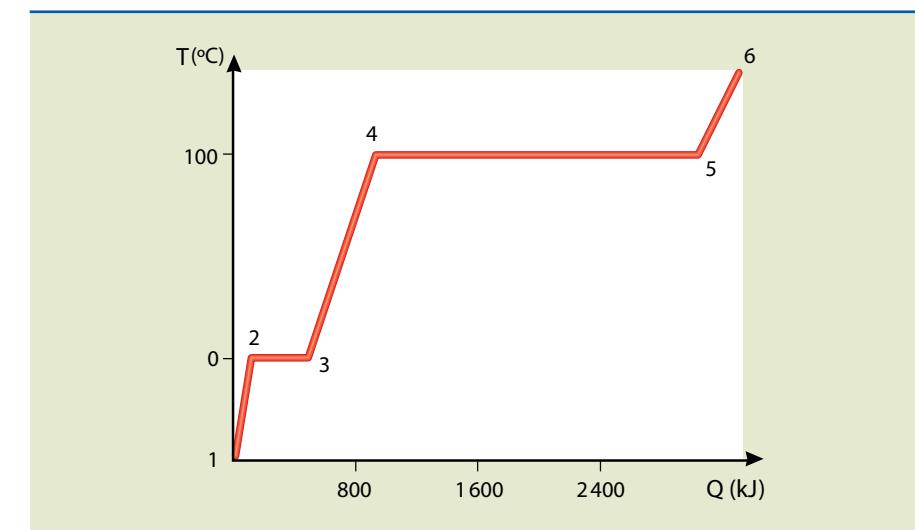
$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (3.10)$$

- Isocórico (com volume constante):

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad (3.11)$$

### 3.4 Mudanças de estado físico

A mudança de estado físico, por exemplo, de líquido para vapor ou de vapor para líquido, ocorre por transferência de energia de uma fonte para a substância ou da substância para um sorvedouro. Durante o processo de mudança de fase, a pressão e a temperatura se mantêm constantes. A figura 3.6 indica o diagrama aproximado de um processo de fornecimento de energia a uma massa de 1 kg de água, sob pressão atmosférica de 101 325 Pa abs.



**Figura 3.6**  
Energia sob a forma de calor versus temperatura em um processo isobárico (água em pressão de 101 325 Pa abs).

Na figura 3.6, entre os pontos indicados por 1 e 2, a água está no estado sólido, e a quantidade de calor (chamado calor sensível) absorvida pela substância para ir de 1 a 2 pode ser calculada pela equação 3.4:

$$Q = mc_m\Delta T \quad (3.4)$$

O índice  $m$  acrescentado no calor específico indica que ele deve ser usado como valor médio no intervalo de interesse de temperatura, tendo em vista que o calor específico é uma propriedade que varia com a temperatura.

Se continuarmos a fornecer calor após o ponto 2, inicia-se o processo de mudança de fase, de sólido para líquido (ou fusão) e a temperatura se mantém constante até que toda a massa de gelo seja transformada em líquido. Assim, denominamos de calor latente de fusão ( $L_f$ ) a quantidade de calor por unidade de massa que funde determinada substância.

Dessa forma, a quantidade de calor para fundir uma massa  $m$  de determinada substância é dada por:

$$Q = mL_f \quad (3.13)$$

Para água sob pressão atmosférica normal,  $L_f \approx 335 \text{ kJ/kg}$  (80 kcal/kg).

Na figura 3.6, de 3 até 4 a água está no estado líquido. Nessa condição, a equação do calor sensível (equação 3.4) apresentada anteriormente pode ser aplicada. Entretanto, o valor da propriedade calor específico para a água entre os estados 3 e 4 é muito diferente daquele usado entre os processos 1 e 2. De forma similar ao trecho de fusão, na figura 3.6, de 4 até 5, a temperatura se mantém constante, indicando que o fornecimento de calor é usado para vaporizar a água (transformá-la do estado líquido para o estado de vapor).

Essa quantidade de calor por unidade de massa é chamada calor latente de vaporização ( $L_v$ ). Portanto, a quantidade de calor para vaporizar uma massa  $m$  de determinada substância é dada por  $Q = mL_v$ . Para água sob pressão normal,  $L_v \approx 2260 \text{ kJ/kg}$  (540 kcal/kg).

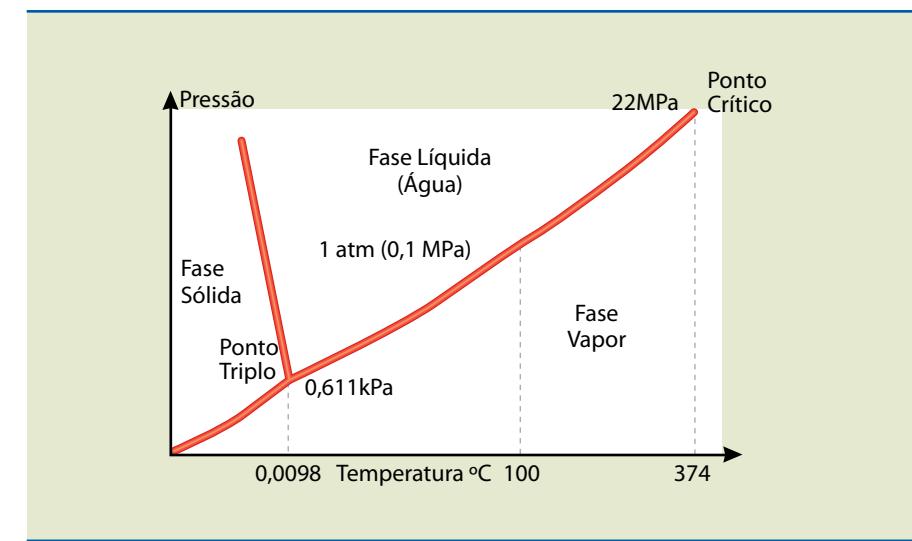
Nos processos inversos – condensação (do estado 5 para o estado 4) e solidificação (do estado 3 para o estado 2) – valem os mesmos valores da vaporização e da fusão, se as demais condições são as mesmas. Porém, o sinal é negativo, pois há remoção e não fornecimento de calor.

### 3.4.1 Vapor e considerações sobre os estados da matéria

O estado físico (sólido, líquido, gás) em que uma substância se encontra depende basicamente das condições de pressão e temperatura. A figura 3.7 indica o diagrama esquemático (sem escalas) para a água.

As mudanças de estado físico, de sólido para líquido (fusão) ou de líquido para sólido (solidificação), de sólido para gás (sublimação) ou de gás para só-

lido (também conhecido como sublimação), de líquido para gás (vaporização) ou gás para líquido (condensação), são provocadas pelas mudanças de pressão e/ou de temperatura.



**Figura 3.7**  
Diagrama de estado físico da água.

Na figura 3.7 as linhas cheias indicam as regiões fronteiriças entre os estados. Um processo termodinâmico qualquer (mudança de temperatura e pressão) pode cruzar as fronteiras e mudar o estado da substância. Uma condição em que a substância apresente condição de pressão e temperatura em um ponto exatamente sobre a linha divisória, por exemplo, sobre a linha divisória entre os estados de líquido e vapor, indica que as duas fases podem coexistir simultaneamente. Na figura 3.7, há um ponto chamado Ponto Triplo, em que os três estados (sólido, líquido e vapor) coexistem.

Temperatura de saturação é aquela correspondente à transição de líquido para vapor em determinada pressão. Portanto, é na temperatura de saturação que ocorre o efeito do calor latente. Para água sob pressão normal (101 325 Pa abs), a temperatura de saturação é 100 °C, ou seja, temperatura na qual ocorre a ebulição da água.

A temperatura de saturação aumenta com a pressão, mas até um limite ao qual chamamos Ponto Crítico. A partir desse ponto, não há transição definida entre os dois estados em questão.

A coordenada do Ponto Crítico é obtida por meio da pressão crítica e da temperatura crítica. Acima da temperatura crítica, são necessários o aumento de pressão e também uma redução de temperatura para que um gás seja liquefeito.

Vamos verificar agora os termos gás e vapor. O vapor é o gás que está à temperatura inferior à crítica.

Vapor superaquecido é o vapor resultante do fornecimento de calor ao vapor saturado, com temperatura acima da temperatura de saturação.

### 3.4.2 Região de saturação líquido-vapor

#### Diagrama temperatura versus entalpia

A figura 3.8 indica em um gráfico aproximadamente a temperatura *versus* entalpia para a água. A região designada de saturação líquido mais vapor expõe condição em que há as duas fases coexistindo (líquido saturado e vapor saturado). A quantidade de vapor na “mistura” é indicada por uma variável denominada título ou qualidade do vapor, definida como:

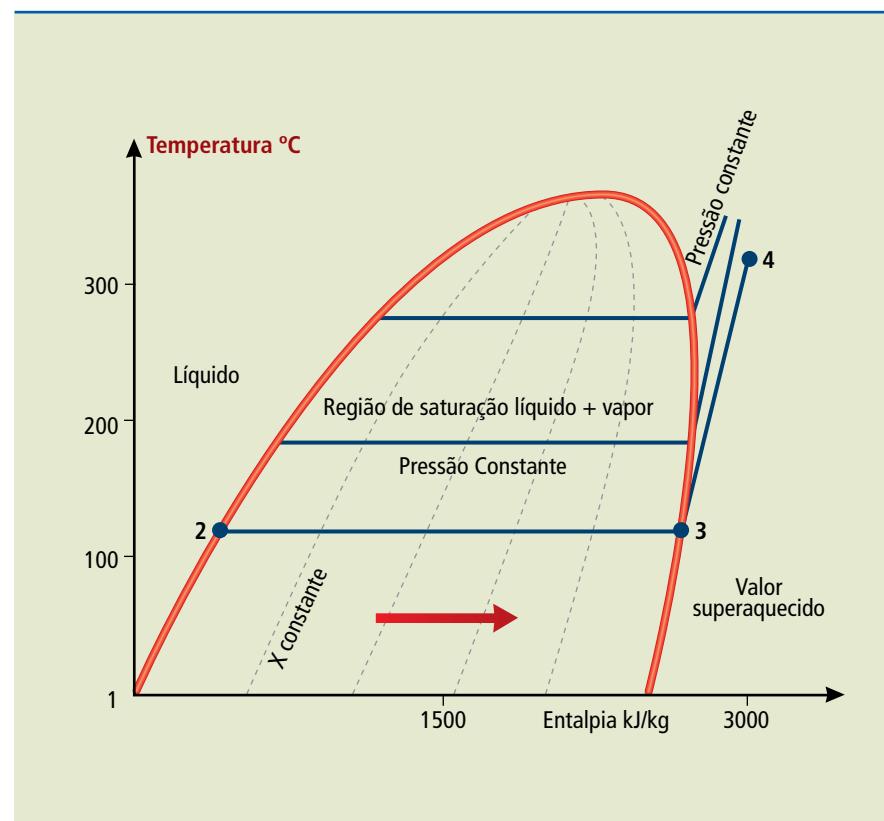
$$x = \frac{\text{massa}_{\text{vapor saturado}}}{\text{massa}_{\text{total}}} \quad (3.14)$$

O vapor é produzido por geradores de vapor, ou seja, as caldeiras, que são máquinas térmicas capazes de utilizar vários tipos de combustíveis. Após a produção do vapor nas caldeiras, sua distribuição se faz de forma bastante simples, por meio de tubulações. O que explica, entre outros motivos, a razão do amplo emprego desse equipamento na indústria, em hospitais e em hotéis.

Uma caldeira ideal deveria produzir o vapor superaquecido, ou, na pior das hipóteses, saturado com título unitário, mas, na prática, por uma série de fatores, em muitas situações, há líquido saturado com o vapor. Isso é prejudicial porque reduz a quantidade de vapor disponível e também provoca desgaste nos equipamentos que utilizam o vapor.

**Figura 3.8**

Diagrama temperatura *versus* entalpia para a água.



Na realidade, em uma instalação em bom estado, deve-se produzir vapor com  $x \approx 0,95$ , ou seja, cerca de 5% de líquido saturado.

Continuemos a análise do diagrama de temperatura *versus* entalpia, da figura 3.8, especialmente atentando para as linhas inicialmente na horizontal, que representam linhas isobáricas ou de pressão constante, e é por meio delas que analisamos a formação do vapor.

Supõe-se a água a uma pressão que se encontra na linha 1-2-3. Do ponto 1 até o ponto 2, o aquecimento eleva sua entalpia até o máximo possível do líquido para aquela pressão.

O ponto 2 indica a temperatura de saturação da água para a pressão considerada, ou seja, o início da vaporização. Na condição do ponto 2, a substância é conhecida como líquido saturado (com título igual a zero). Ao se continuar o fornecimento de calor para a água, inicia-se a evaporação (aumento progressivo do título) e a temperatura se mantém constante até o ponto 3 (com título unitário). No ponto 3, toda a água está no estado de vapor saturado. A diferença da **entalpia entre o ponto 3 e o ponto 2** é a **entalpia de vaporização** da água. A partir de 3, mantido o aquecimento, tem-se então o vapor superaquecido.

Observamos que a expressão entalpia de vaporização equivale ao calor latente de vaporização anteriormente comentado (considerado por unidade de massa). Mas o conceito de entalpia é mais abrangente e, por isso, o termo é preferível. De forma similar, a diferença de entalpia do aquecimento entre os pontos 2 e 1 equivale ao calor sensível por unidade de massa.

### 3.5 Caldeiras

Caldeiras são equipamentos que produzem e acumulam vapor por meio do aquecimento da água, sob pressão (superior à atmosférica), utilizando fonte de energia diversificada.

O vapor saturado é o meio mais fácil de obter aquecimento em larga escala, sendo normalmente produzido por geradores de vapor, as caldeiras. As caldeiras podem ser projetadas para utilizar a fonte de energia mais conveniente ou a disponível dentro de um processo industrial. A distribuição do vapor é simples, pois usa tubulações que podem ser projetadas para atender todas as unidades produtivas de uma fábrica. Por esses e outros fatores, o vapor saturado e também o vapor superaquecido são amplamente empregados na indústria.

As caldeiras são utilizadas para alimentar máquinas térmicas, autoclaves para esterilização de materiais diversos, cozimento de alimentos pelo vapor ou calefação ambiental.

A primeira tentativa do ser humano de produzir vapor foi no século II a.C., quando Heron de Alexandria elaborou um artefato que vaporizava água e

movimentava uma esfera em torno de seu eixo. Esse foi o aparelho precursor das caldeiras e das turbinas a vapor.

Foi na Revolução Industrial que o vapor sob pressão teve ampla aplicação para movimentar máquinas. Cientistas, artífices e operários trabalharam por muitos anos na evolução dos geradores de vapor.

Os principais trabalhos nesse campo se devem a Denis Papin (França), a James Watt (Escócia) e a Wilcox e Babcock (Estados Unidos). Por volta de 1835, cerca de mil teares eram movidos a vapor. Mas o emprego desse tipo de energia só se ampliou após a Primeira Guerra Mundial.

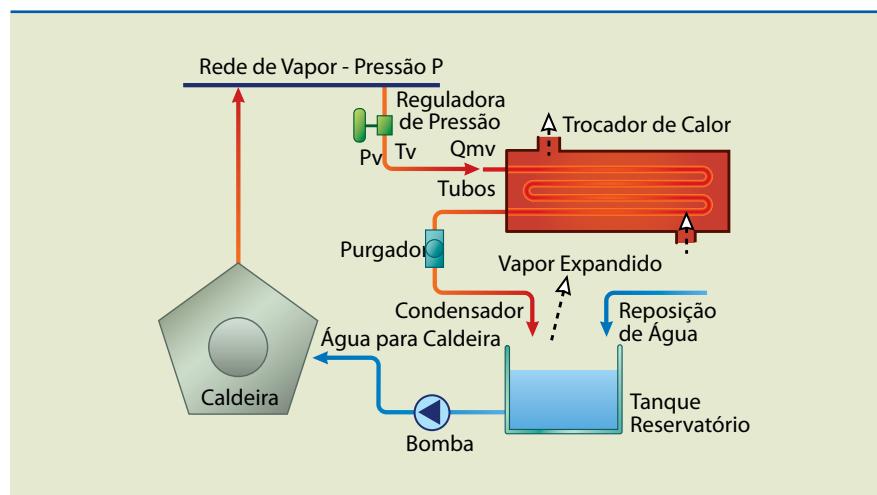
Nessa época, as caldeiras começaram a ser utilizadas para gerar energia elétrica. No início do século passado, as caldeiras foram adequadas para suportar maiores temperaturas e pressões de trabalho e passaram a utilizar diferentes tipos de combustível.

Atualmente, existem caldeiras com capacidade para produzir centenas de toneladas de vapor por hora, e sabe-se que o fator limitante dessa característica é o tamanho da unidade. A limitação das pressões relaciona-se às propriedades metalúrgicas dos materiais empregados. No entanto, existem caldeiras que operam a pressões acima de 200 atmosferas (20,265 MPa), ou seja, relativamente próximas do valor da “pressão crítica” da água (22,12 MPa), no qual se igualam determinadas características da água nas fases líquida e de vapor.

As indústrias químicas, petroquímicas, metalúrgicas, metalomecânicas, eletrônicas, entre outras, têm o vapor como principal fonte de aquecimento em diversos processos.

A figura 3.9 mostra o esquema bastante simplificado de uma aplicação típica. Após a troca de calor no trocador, a água condensada é dirigida a um reservatório e, por bombeamento, retorna para a caldeira. Naturalmente, há necessidade de reposição de água para compensar perdas e vazamentos.

**Figura 3.9**  
Aplicação típica do uso do vapor.



O vapor saturado mantém a temperatura constante durante a condensação, quando se mantém a pressão constante.

Uma maneira de controlar a pressão é pelo uso de sistemas mecânicos. É bem mais simples controlar a pressão do que a temperatura. Dessa forma, a pressão de condensação do vapor saturado é usada para controlar indiretamente a temperatura dos processos.

Até 170 °C, utiliza-se vapor saturado até 10 atmosferas, sua temperatura de saturação é 183 °C, e é nessa faixa que se encontra a maioria de pequenos e médios consumidores de vapor. Temperaturas maiores são obtidas com o aumento da pressão de saturação, o que corresponde a maior investimento, pois há a necessidade de maior resistência mecânica da caldeira, como mais rigor em sua fabricação e inspeção. O limite da temperatura de vapor saturado é o ponto crítico, a 374 °C e pressão de aproximadamente 218 atm.

Não se utiliza, na maioria dos casos, vapor superaquecido em processos que requerem temperaturas mais altas. É bastante difícil manter o controle da temperatura sendo que a distribuição de energia por unidade de massa ou volume de vapor diminui drasticamente.

Na indústria, as caldeiras são classificadas, em relação à pressão de trabalho, em:

- Caldeiras de baixa pressão, para pressões de até 10 atm.
- Caldeiras de média pressão, para pressões entre 11 e 40 atm.
- Caldeiras de alta pressão, para pressões maiores que 40 atm.

Essa classificação é arbitrária, mas representa a faixa de utilização de vapor na indústria. Caldeiras de grande porte, empregadas tanto para acionamento de turbinas quanto para processos de aquecimento, podem trabalhar com pressões de até 100 atm. Existem caldeiras de maiores pressões, que representam um número reduzido de unidades. São usadas em geração de energia ou em grandes complexos industriais.

Essa tentativa de classificação nos mostra a enorme dificuldade de classificar esse tipo de equipamento. As caldeiras possuem formas, capacidades de produção de vapor e tamanhos bastante diferenciados, tornando difícil encontrar uma forma de classificação única. A uniformização da classificação das caldeiras já vem sendo tentada desde a utilização do vapor como forma de produzir trabalho.

### 3.5.1 Tipos de caldeiras

- Flamotubulares

Os gases de combustão circulam por dentro de tubos e a água circula por fora destes tubos, sendo então vaporizada.

- Aquatubulares

Os gases circulam por fora dos tubos e a água circula por dentro desses tubos, onde é vaporizada.

As flamotubulares são utilizadas para pequenas capacidades de produção de vapor, até 10 toneladas por hora, e para baixas pressões, até 10 atmosferas e, em alguns casos, de 15 a 20 atmosferas.

### Caldeiras flamotubulares

A maioria das caldeiras é do tipo flamotubular. Elas são utilizadas para pequenas capacidades de produção de vapor (da ordem de até 10 ton/h) e baixas pressões (até 10 atmosferas), chegando algumas vezes a 15 ou 20 atmosferas.

A caldeira flamotubular horizontal é constituída de um vaso de pressão cilíndrico na horizontal. Nele, existem dois ou três tampos planos, chamados espelhos. Nestes espelhos, estão afixados os tubos e a fornalha.

As caldeiras modernas são conhecidas como caldeiras de passes de gases, e nelas existe uma fornalha que possui dois passes de gases. Na saída da fornalha, há uma câmara de reversão que pode ser recoberta com refratários, ou ainda, ser constituída de parede metálica molhada. Esta última possui água que troca calor quando atinge o meio externo.

As câmaras do tipo de reversão molhadas são mais eficientes e apresentam melhor rendimento térmico. Porém, têm construção mais complicada, são mais caras e perdem mais calor para o ambiente.

A fornalha da caldeira flamotubular deve ser dimensionada para que a combustão ocorra completamente em seu interior, a fim de evitar a reversão da chama, que pode atingir os espelhos, diminuindo a vida útil desse tipo de caldeira. A fornalha é constituída de um corpo cilíndrico e está imersa em água.

As caldeiras flamotubulares modernas só queimam combustíveis líquidos ou gasosos, pois existe grande dificuldade construtiva para instalar as grelhas quando se usam combustíveis sólidos. Algumas caldeiras flamotubulares de pequena capacidade são adaptadas com grelhas na fornalha para a queima de combustível sólido, porém, são limitadas ao tamanho necessário à área de grelha. Na verdade, para combustíveis sólidos, em caldeiras de pequena capacidade, a opção é pelas caldeiras mistas.

Desde as primeiras caldeiras dos primórdios da Revolução Industrial até hoje, as caldeiras flamotubulares foram sucessivamente aprimoradas até alcançarem a atual concepção de fornalha, com mais de dois passes de gases de combustão. A sua aceitação como detalhe construtivo para caldeiras de pequenas capacidades se deu pelo baixo custo de construção em comparação com uma caldeira do tipo aquatubular de mesma capacidade. Por outro lado, as pressões de trabalho e a qualidade do vapor saturado são limitadas por motivo de segurança.

No corpo da caldeira fica um acúmulo de água. Quando súbitas flutuações de demanda acontecem com pouca queda de pressão da rede de vapor, essa água acumulada pode funcionar como um pulmão de vapor, respondendo rapidamente ao sistema. Por isso, esse tipo de caldeira é usado para aplicações em que o consumo é variável ou em que se requer condições de emergência.

As caldeiras flamotubulares têm eficiência térmica que varia de 80 a 90%, e valores maiores são limitados pela dificuldade de adicionar equipamentos de recuperação de calor (economizadores).

### Caldeiras aquatubulares

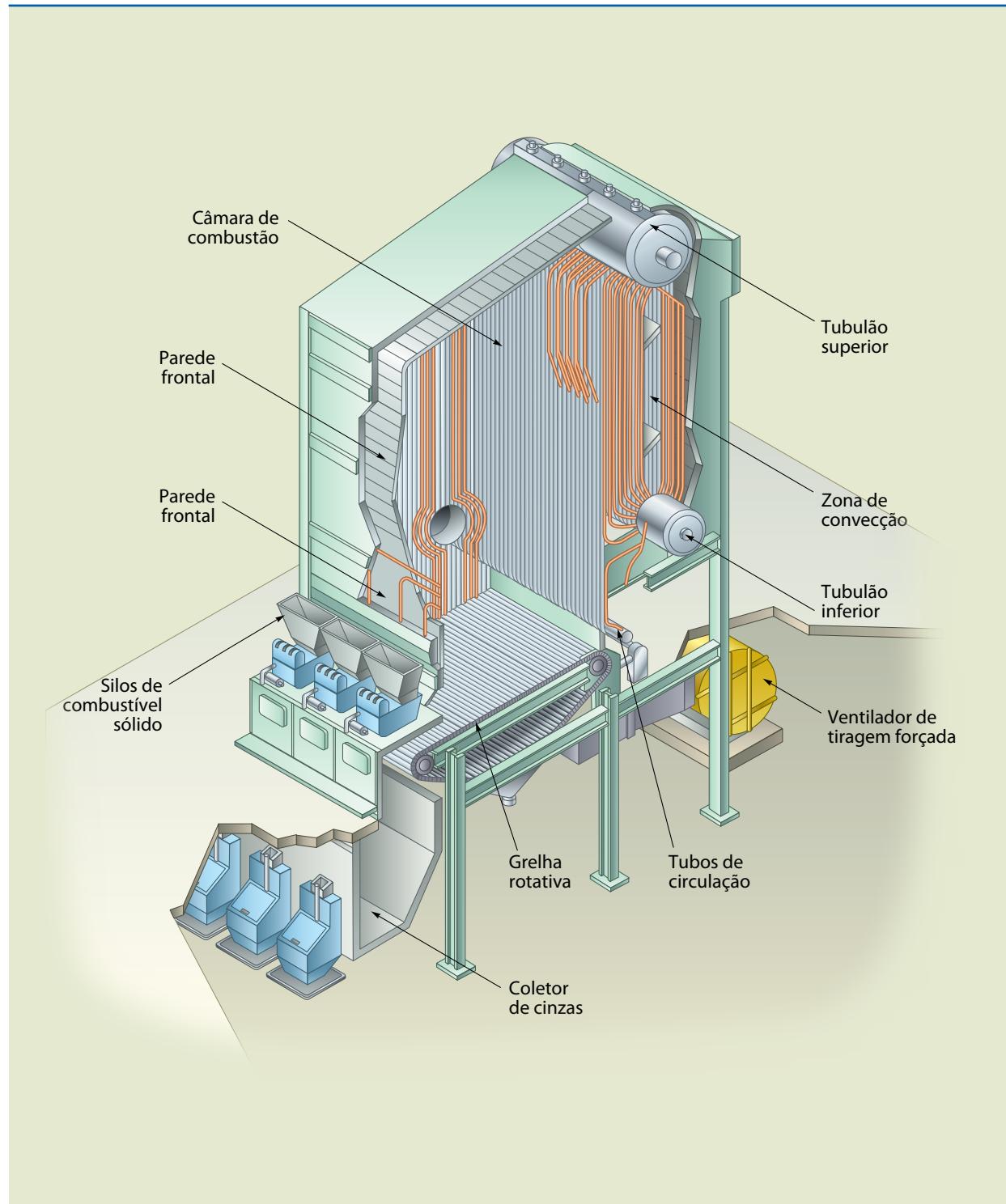
As caldeiras aquatubulares caracterizam-se pela circulação externa dos gases de combustão, enquanto os tubos conduzem massa de água e vapor. Esses tubos interligam dois ou mais reservatórios cilíndricos horizontais: o tubulão superior, onde ocorre a separação da fase líquida do vapor, e o inferior, no qual ocorre a decantação e a separação dos sólidos que estão em suspensão.

As primeiras caldeiras desse tipo usavam apenas tubos retos, mas, apesar de algumas vantagens (facilidade na limpeza, por exemplo), hoje essa construção não é mais utilizada.

Nas caldeiras em que os tubos curvos interligam os balões, as câmaras de combustão são fechadas por paredes de água.

Nas caldeiras aquatubulares (figura 3.10) que operam com combustíveis líquidos ou gasosos, o queimador é instalado na parte frontal da fornalha ou da câmara de combustão. Nessa câmara, a troca de calor ocorre sobretudo por **radiação luminosa** e, nas partes posteriores da caldeira (caixas de reversão e tubos), a troca de calor se processa essencialmente por **radiação gasosa e convecção**. As caldeiras aquatubulares são as mais utilizadas quando a produção do vapor e da pressão requeridos são maiores, pois o custo de fabricação das flamotubulares fica mais alto nestas condições.

A transferência do calor no interior da caldeira ocorre em duas secções: a de radiação, por radiação direta da chama com os tubos por onde passa a água, os quais geralmente delimitam a câmara de combustão; e a de convecção, por convecção forçada, utilizando os gases quentes provenientes da câmara de combustão, que atravessam um banco de tubos de água.

**Figura 3.10**

Caldeira aquatubular de grande porte com combustível sólido.

### Caldeiras mistas

A solução de caldeiras híbridas (mistas) se deve ao fato da utilização de combustíveis sólidos para caldeiras de pequena capacidade. Na realidade, essas caldeiras são flamotubulares com uma antecâmara de combustão que tem suas paredes revestidas de tubos de água.

Os sólidos ficam depositados em grelhas na antecâmara, onde acontece a combustão. Desta forma, sólidos como lenha em toras, cavacos, bagaço podem ser utilizados e a retirada das cinzas é efetuada por baixo das grelhas.

As caldeiras mistas não são vantajosas quando se trata de segurança e eficiência térmica como as aquatubulares, mas é uma solução prática quando se tem o combustível sólido a baixo custo.

Este tipo construtivo ainda tem a possibilidade de queimar combustível líquido ou gasoso em paralelo com sólidos quando são instalados queimadores apropriados.

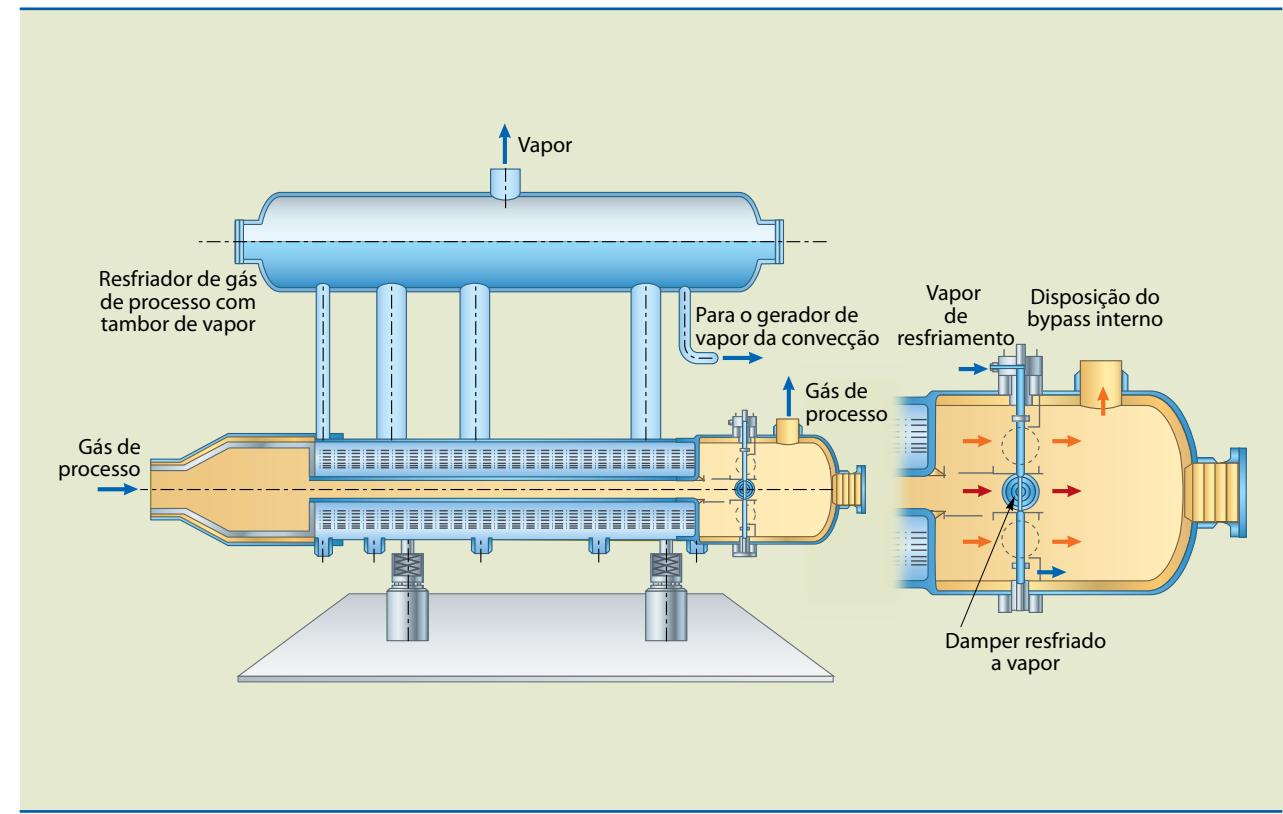
O rendimento é menor comparado com as flamotubulares, pois a perda de calor na antecâmara é grande. E, na maioria dos casos, as paredes frontal e traseira não possuem tubos em razão do pequeno tamanho dessas caldeiras e das dificuldades construtivas.

### Caldeiras de recuperação de calor

Alguns processos de fabricação, como gases de alto forno, produtos de combustão de incineradores e fornos de alta temperatura, entre outros, geram gases de processo (ou de combustão) com temperatura suficientemente alta para recuperar calor (figura 3.11). Nesses casos, tanto a caldeira aquatubular quanto a flamotubular podem ser utilizadas, mas, em geral, a escolha recai sobre a aquatubular quando há menor demanda na produção do vapor.

**Figura 3.11**

Caldeira de recuperação de calor de gás de processo.



### 3.5.2 Outras classificações de caldeiras

As caldeiras ainda podem ser classificadas:

#### Quanto à energia empregada para o aquecimento

O tipo mais comum é o de caldeiras que queimam combustíveis:

- Líquidos (óleos combustíveis, principalmente).
- Gasosos (gás liquefeito de petróleo GLP, embora esse tipo de combustível seja hoje utilizado apenas em caldeiras de pequeno porte). O GLP e os combustíveis líquidos de modo geral estão sendo substituídos por gás natural.
- Sólidos (carvão, lenha, cavacos, bagaços etc.).

#### Quanto ao fluido que contêm

As caldeiras vaporizam água, mas existem as que vaporizam outros líquidos, como o mercúrio, líquidos térmicos.

#### Quanto à montagem

Normalmente, as caldeiras flamotubulares (tipo compacto) são pré-montadas, isto é, saem prontas das fábricas e instaladas no local de operação.

As caldeiras aquatubulares, além do tipo compacto, podem ser do tipo “montadas em campo”. Nesse caso, seu porte justifica a construção no local de operação. Por exemplo, uma caldeira de 33 metros de altura. Esse tipo de caldeira se caracteriza pela estrutura que a suporta, como:

- **Caldeira auto-sustentada**, quando sua estrutura é constituída pelos próprios tubos e tubulões.
- **Caldeira suspensa**, quando exige a construção de uma estrutura à parte.
- **Caldeira mista**, quando tem essas duas formas básicas de sustentação.

#### Quanto à circulação de água

Para que ocorra o fornecimento homogêneo de calor à água, é necessário que haja a circulação da água. Quando essa circulação é mantida pelas diferenças de densidade entre água quente e água menos quente, a circulação da água é dita “natural”.

Já as caldeiras de circulação forçada são as que possuem sistemas de coletores que dão impulso à água.

#### Quanto ao sistema de tiragem

O combustível é queimado na fornalha, e os gases quentes provenientes dessa queima percorrem o circuito destinado aos gases, a fim de melhor aproveitamento do calor, sendo, finalmente, lançados à atmosfera pelas chaminés.

Para que haja essa movimentação, é preciso que ocorram diferenças de pressão. Tais diferenças promovem a retirada dos gases queimados e possibilitam a entrada de nova quantidade de ar e combustível. Distinguem-se dois tipos:

- **Caldeiras de tiragem natural**, quando a tiragem se estabelece por meio de chaminés.
- **Caldeiras de tiragem artificial (mecânica ou forçada)**, quando, para produzir a depressão, empregam-se ventiladores ou ejetores.

Nota-se que existem vários critérios para a classificação de caldeiras, variando não apenas de um país para outro como também de acordo com as diferentes abordagens.

### 3.5.3 Componentes de uma caldeira

As caldeiras aquatubulares produzem maior quantidade de vapor com as maiores pressões disponíveis, na condição de vapor saturado ou superaquecido; isso faz com que esse tipo de caldeira seja considerado o mais importante entre todos. Sendo o mais importante, vamos conhecer com mais detalhes seus componentes.

Encontramos nessas caldeiras, em geral, os seguintes componentes:

**Câmara de combustão** – É a região onde acontece a queima do combustível, com a produção dos gases de combustão que fornecem calor à água. É, também, onde ocorrem as maiores taxas de absorção de calor e as maiores temperaturas. As câmaras de combustão devem ter um volume capaz de garantir que toda a queima se efetue em seu interior, assegurar que o posicionamento dos maçaricos e das superfícies de transferência de calor deva ser tal que não haja contato entre a chama e os tubos, e possuir superfície dos tubos para absorção do calor gerado com suficiência para que não ocorra vaporização nos tubos de subida.

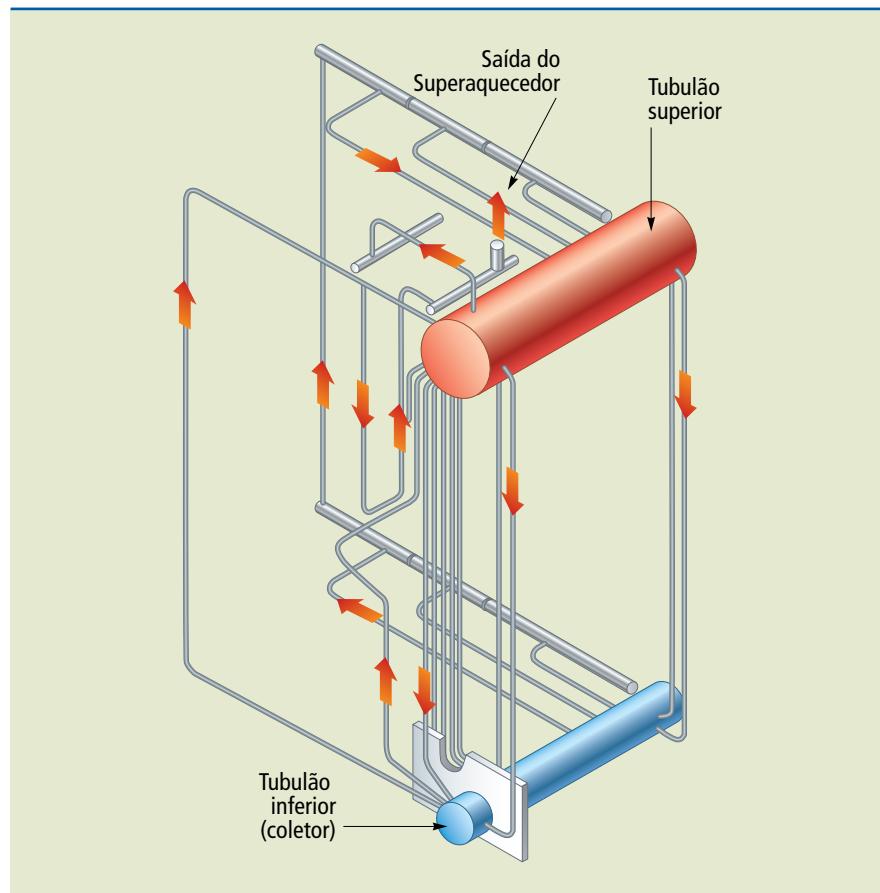
**Tubos** – Neles se realiza a circulação de vapor e água dentro da caldeira, processo que permite a troca de calor entre os gases quentes de combustão e a água ou o vapor.

**Tubulão** – É um tambor horizontal situado no ponto mais alto do corpo principal da caldeira (tubulão superior). A ele se conectam, por meio de tubos, os coletores, também chamados tubulões inferiores, que se encontram em níveis diferentes dentro da caldeira. A água circula várias vezes através do conjunto tubulão-coletores, descendo pelos tubos externos e retornando pelos internos (figura 3.12). Essa circulação natural é promovida pela diferença de pressão exercida pelas colunas líquidas e pelas correntes de convecção formadas. A coluna externa formada apenas por água é mais pesada que a coluna interna, a qual contém também vapor de água. Essa diferença no peso provoca a circulação. A parte vaporizada vai para o tubulão superior, enquanto o líquido volta a circular.

Além de acumular o vapor, o tubulão superior recebe também a água de alimentação, que vem do economizador. O espaço acima do nível da água no tubulão chama-se espaço de vapor.

**Figura 3.12**

Circulação de água e vapor através dos tubos da caldeira.



**Chicanas** – São defletores instalados no espaço de vapor para evitar o arraste de partículas de líquido com o vapor.

**Superaquecedor** – É um conjunto de serpentinas que conduz o vapor saturado separado no tubulão para coletores de vapor situados na zona de radiação ou de convecção, conforme o grau de superaquecimento para o qual as caldeiras são projetadas. Esse superaquecimento aumenta a energia interna do vapor e consequentemente sua entalpia.

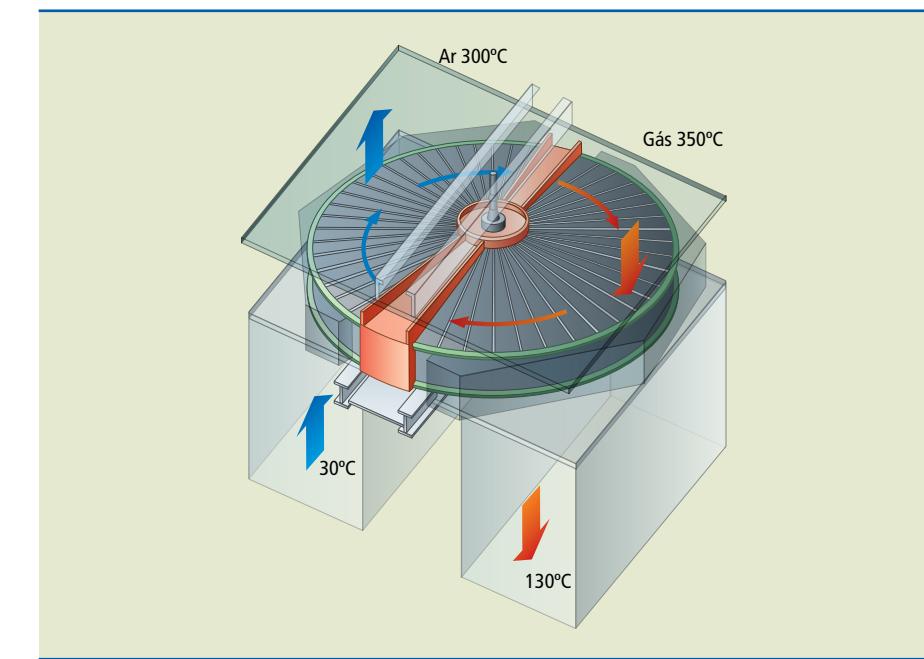
**Preaquecedor de ar** – É um dispositivo (figura 3.13) utilizado para aproveitar parte do calor dos gases residuais de combustão, aquecendo o ar de alimentação das chamas; é geralmente instalado na saída dos gases na chaminé.

**Economizador** – É um conjunto de serpentinas ou um feixe tubular cuja finalidade é preaquecer a água de alimentação, aproveitando também o calor dos gases residuais da combustão, para depois seguir para o tubulão com maior temperatura, que representa uma economia de energia.

**Tijolos refratários** – As paredes da caldeira são revestidas internamente de tijolos ou concretos refratários, resistentes a altas temperaturas. Esses materiais protegem as estruturas metálicas da deterioração por alta temperatura ao mesmo tempo que refletem o calor da chama e permitem a distribuição homogênea do calor.

**Figura 3.13**

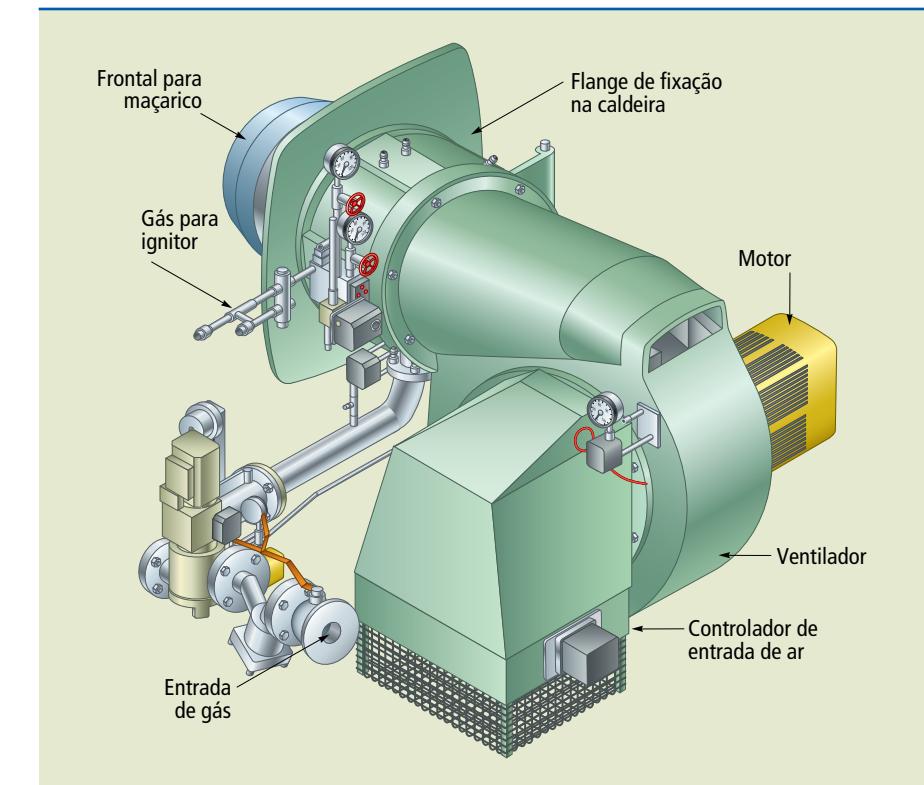
Preaquecedor de ar rotativo.



**Maçaricos** – Utilizados em uma caldeira, têm por finalidade converter o combustível líquido a ser queimado em gás (figura 3.14). Essa conversão se dá, em alguns casos, após a entrada do combustível na fornalha e, em outros casos, ainda no próprio queimador. Os maçaricos das caldeiras são, muitas vezes, semelhantes aos dos fornos e podem operar também com gases ou, ainda, com sólidos finamente particulados.

**Figura 3.14**

Maçarico para queima de gás.

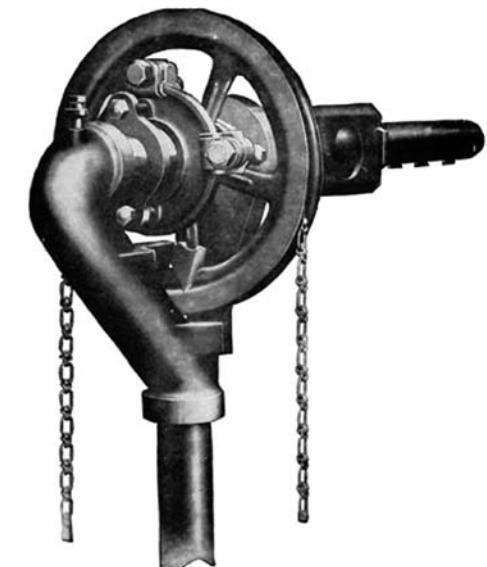


**Ignitor** – Sua função é fornecer uma chama adequada para o acendimento de um maçarico, seja ele de óleo diesel, nafta, gás, ou óleo combustível. Um maçarico nunca pode ser aceso com a chama de outro maçarico, mas somente com a chama do ignitor correspondente. O ignitor, por sua vez, também necessita de uma fonte de calor para seu acendimento, que, no caso, é uma centelha proveniente de uma vela de ignição elétrica, a qual recebe tensão de um transformador. Essa centelha não é constante e permanece operante por alguns segundos. Se o ignitor não acender enquanto o transformador está energizado, será necessária nova operação para acendimento. Normalmente, os ignitores são instalados ao lado dos maçaricos ou tangencialmente a eles.

**Soprador de fuligem** – A fuligem aparece nos tubos das caldeiras durante seu funcionamento. Os sopradores têm a função de removê-la. Eles atuam em tempos preestabelecidos injetando vapor para remover a fuligem criada no processo. A alimentação para os sopradores é ligada a um sistema de geração de vapor independente do sistema da caldeira. São constituídos de tubos inseridos em posição transversal em relação aos tubos da serpentina. Os tubos do soprador são dotados de vários orifícios por onde sai o vapor responsável pela limpeza dos tubos da caldeira. Com o objetivo de atingir maior área de limpeza, esses sopradores, em geral, possuem movimento de rotação. O posicionamento e a quantidade de sopradores de fuligem variam de acordo com o tipo de caldeira e do combustível utilizado. Podem ser usados na câmara de combustão, no superaquecedor, nos aquecedores de ar e nas zonas de convecção, e seu acionamento pode ser realizado manual ou automaticamente. Veja uma foto de um soprador de fuligem na figura 3.15.

**Figura 3.15**

Soprador de fuligem manual.



WIKIMÉDIA.ORG

**Ventilador** – Tem a finalidade de impulsionar o ar de combustão até os maçaricos na câmara de combustão, e os gases da câmara de combustão até a chaminé.

Dois tipos de ventiladores são encontrados no mercado:

- O de tiragem forçada (utiliza o ar atmosférico e o envia para os maçaricos).
- O de tiragem induzida (suciona os gases de combustão e os conduz até a chaminé).

**Chaminé** – É a parte que conduz os gases de combustão para a atmosfera.

**Válvulas de segurança** – São instaladas no tubulário com a função de dar escape ao vapor, no caso de este atingir uma pressão superior à pressão máxima admitida de operação da caldeira (figura 3.16). Essas válvulas são calibradas para obedecer a uma sequência de funcionamento predeterminada, para garantir que situações de emergência não venham a acontecer, se ocorrer alguma falha mecânica ou insuficiência de operação.

A calibração dessas válvulas é feita com precisão, e seu funcionamento deve ser monitorado de modo permanente. Além disso, devem ser testadas periodicamente, objetivando perfeitas condições de funcionamento.

**Figura 3.16**

Válvula de segurança típica.



WIKIMÉDIA.ORG

O projeto de caldeiras de médio e grande porte leva em consideração as vazões de vapor através de todas as válvulas de segurança. A soma das capacidades de vazão dessas válvulas deve ser igual ou superior à vazão máxima de vapor produzido pela caldeira. Dessa forma, o equipamento fica protegido no caso de sobrepressão, garantindo a integridade e a segurança dos operadores da caldeira.

### 3.5.4 Tratamento da água para as caldeiras

A água obtida na natureza é chamada água bruta e não serve para ser utilizada diretamente em uma caldeira, porque, em sua composição, encontra-se uma série de constituintes em suspensão ou dissolvidos, que podem ser sólidos ionizados, gases dissolvidos, particulados, micro-organismos e matéria coloidal. Devem ser extraídos da água por causa dos efeitos danosos que podem provocar, como corrosão, incrustação, depósitos nas superfícies internas dos tubos ou contaminação do vapor produzido. Esses problemas estão relacionados com a natureza das águas usadas para a produção de águas de alimentação e compensação.

Convém lembrar que nenhum processo de remoção de impurezas é perfeito. Isso porque, após o tratamento, a água permanece com contaminantes que poderão ser nocivos ao processo.

As caldeiras de baixa pressão são menos exigentes, e a simples redução da salinidade (ou abrandamento) e a clarificação da água satisfazem a produção de vapor com custos baixos. Caldeiras de média e alta pressão já necessitam de água desmineralizada ou destilada, além de adequado controle da concentração de sólidos e da remoção do oxigênio da água de alimentação, ajuste do pH etc.

O tratamento da água para alimentar uma caldeira é feito com base na qualidade do vapor a ser gerado e nas condições gerais das superfícies internas dos tubos. Para cada tipo de aplicação da caldeira, temos um tipo de tratamento de água adequado. Além disso, outros aspectos devem ser considerados, como a origem da água utilizada, o regime operacional, os tipos de materiais aplicados nas caldeiras, as condições de pressão e temperatura do vapor produzido, entre outros.

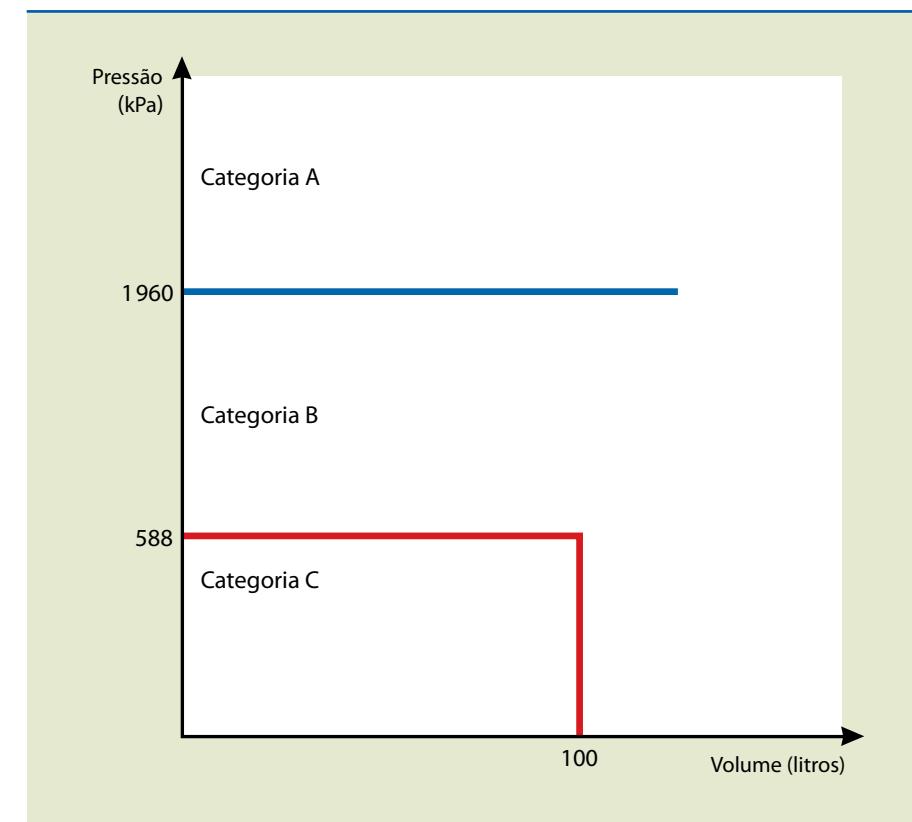
### 3.5.5 Aspectos legais relacionados à segurança operacional

As altas pressões e temperaturas envolvidas na operação das caldeiras faz com que haja necessidade de medidas para garantir a segurança em sua utilização.

O histórico de acidentes fatais provocados por falhas nas operações em caldeiras exigiu uma regulamentação dos parâmetros de segurança em todo o mundo. No Brasil, temos a NR-13, uma norma regulamentadora do MTE (Ministério do Trabalho e Emprego), que determina os parâmetros de segurança para caldeiras e vasos de pressão.

Diferentemente da classificação arbitrária já vista, a NR-13 classifica as caldeiras em três categorias (ver também a figura 3.17):

- Caldeira categoria A:** cuja pressão de operação é igual ou maior que 1 960 kPa.
- Caldeira categoria C:** pressão de operação igual ou inferior a 588 kPa com volume interno igual ou menor que 100 litros.
- Caldeira categoria B:** todas as que não estão nas categorias A e C.



**Figura 3.17**  
Classificação das caldeiras segundo a NR-13.

Na NR-13, centrada na inspeção de segurança de caldeiras estacionárias a vapor, são apresentadas várias regulamentações, entre elas a do profissional habilitado. Profissional habilitado, segundo a NR-13, é aquele que tem a competência legal para o exercício da profissão de engenheiro habilitado nas atividades de projeto de construção, acompanhamento de operação e manutenção, inspeção e supervisão de inspeção de caldeiras.

Outros pontos importantes regulamentados pela NR-13 são a obrigatoriedade de as caldeiras serem submetidas à inspeção de segurança, interna e externamente, nas seguintes oportunidades:

- Antes de entrarem em funcionamento, quando novas, no local de operação.
- Após reforma ou modificação, ou após terem sofrido qualquer acidente.
- Periodicamente, pelo menos uma vez ao ano.

A NR-13 prevê ainda que toda caldeira deve possuir, no estabelecimento onde estiver instalada, uma sequência de documentos atualizados:

a) "Prontuário da Caldeira", contendo as seguintes informações:

- Código de projeto e ano de edição.
- Especificação dos materiais.
- Procedimentos utilizados na fabricação, montagem, inspeção final e determinação da Pressão Máxima de Trabalho Admissível.
- Conjunto de desenhos e demais dados necessários para o monitoramento da vida útil da caldeira.
- Características funcionais.
- Dados dos dispositivos de segurança.
- Ano de fabricação.
- Categoria da caldeira.

b) "Registro de Segurança".

c) "Projeto de Instalação".

d) "Projetos de Alteração ou Reparo".

e) "Relatórios de Inspeção".

Os instrumentos e sistemas de controle das caldeiras, a qualidade da água e seus tratamentos, bem como treinamento dos operadores, também são contemplados por essa norma regulamentadora. É ressaltada a importância do elemento humano na segurança de operações de caldeiras, não só como responsável pelo projeto, pelas especificações de materiais na construção de caldeira, pela escolha de instrumentos, mas também na condução do equipamento, ou seja, na operação propriamente dita.

Os operadores e supervisores das caldeiras devem ser treinados (por orientação da NR-13) para desenvolvimento de suas atividades rotineiras, que exigem habilidade e prática. Os riscos de acidentes na operação de caldeiras, portanto, são controláveis pela prática da técnica correta em todas as fases: projeto, construção, controle de qualidade, operação, manutenção e inspeção.

## 3.6 Trocadores de calor

Trocador ou permutador de calor é um equipamento usado para realizar o processo da troca térmica entre dois fluidos. É muito comum na engenharia, quando se quer efetuar a troca de calor entre fluidos que se encontram em diferentes temperaturas. Os trocadores de calor podem ser utilizados tanto para aquecimento e resfriamento de ambientes, quanto para condicionamento de ar, produção de energia, recuperação de calor e em processos químicos.

São fabricados de diversas formas, de acordo com suas aplicações. Normalmente, os fluidos envolvidos na troca térmica são separados por superfícies de troca, ou seja, por paredes sólidas. Mas ocorrem casos em que os fluidos são imiscíveis e, assim, as paredes sólidas podem ser dispensadas. Nesses casos, são denominados permutadores de contato direto.

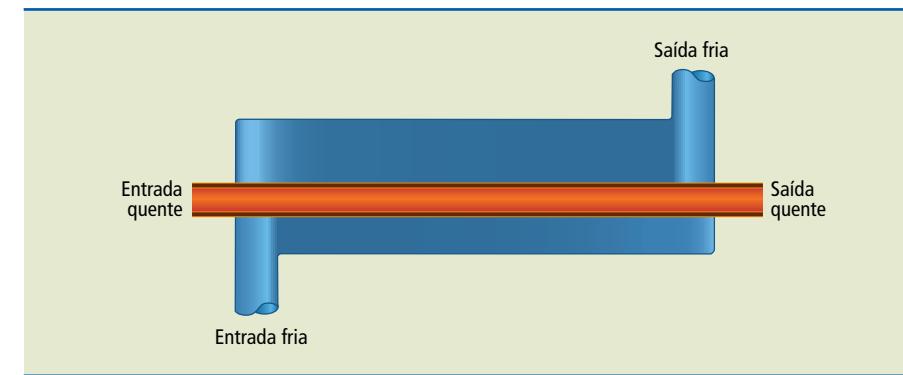
### 3.6.1 Classificação dos trocadores de calor

Os trocadores de calor são classificados da maneira descrita a seguir.

#### Pelo arranjo do escoamento

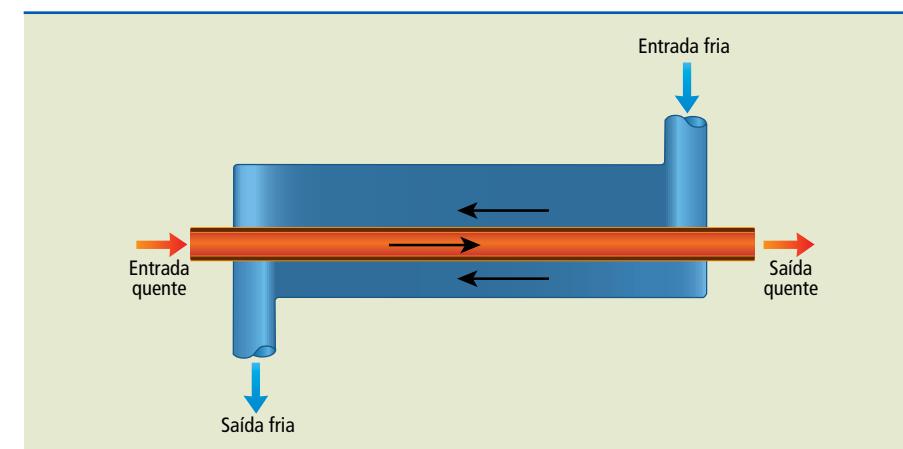
##### 1. Trocadores de calor de correntes paralelas.

Normalmente, são associados a trocadores tipo duplo tubo. Neles, o fluido quente e o frio entram pelo mesmo lado do trocador e escoam no mesmo sentido. À medida que escoam, há a transferência de calor do fluido quente para o frio (figura 3.18).



##### 2. Trocadores de calor de correntes contrárias ou opostas.

Apresentam maior eficiência global quando comparados com os de corrente paralela. Nesses trocadores, o fluido quente entra por um lado e o frio entra pelo lado oposto, e o escoamento ocorre em sentidos opostos (figura 3.19).



##### 3. Trocadores de correntes cruzadas.

Nesse tipo, os escoamentos são perpendiculares entre si. O escoamento pode ser misturado ou não, o que pode influenciar significativamente o desempenho do trocador de calor.

**Figura 3.18**

Trocador de calor com correntes paralelas.

**Figura 3.19**

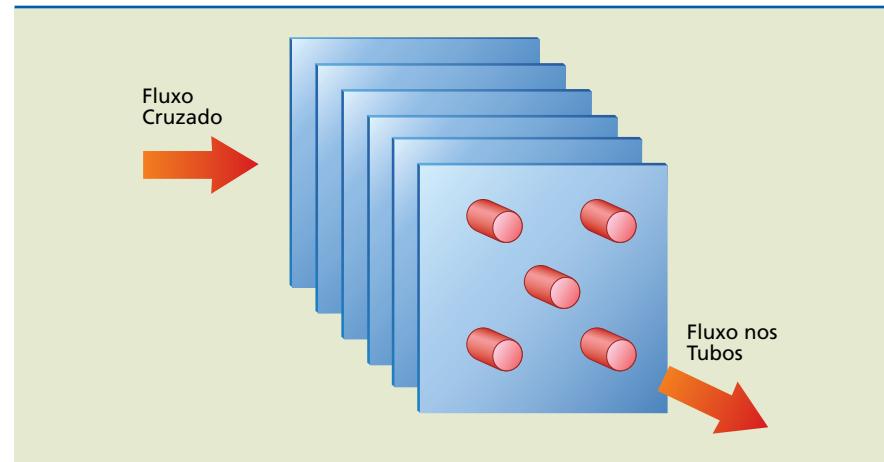
Trocador de calor com correntes opostas.

a) Correntes cruzadas com fluidos não misturados.

Nesses trocadores, existem aletas que inibem o movimento do fluxo cruzado na direção do escoamento (figura 3.20).

**Figura 3.20**

Trocador de calor com correntes cruzadas com fluidos não misturados.

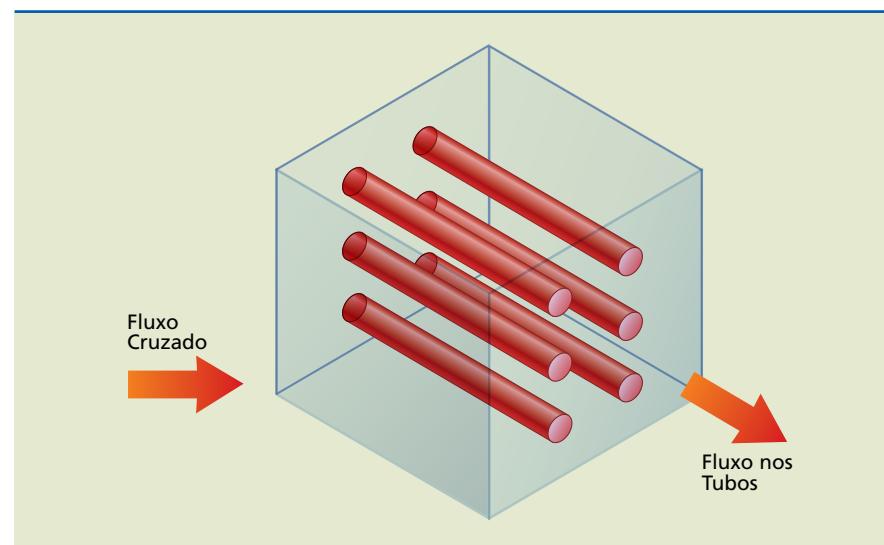


b) Correntes cruzadas com fluidos misturados.

Nesse tipo de trocador, o fluido pode escoar em todas as direções (figura 3.21).

**Figura 3.21**

Trocador de calor com correntes cruzadas com fluidos misturados.



Pelo tipo construtivo

Os trocadores de calor, pelo tipo construtivo, podem ser:

- De duplo tubo.
- De casco tubo.
- De placas.
- Compactos.
- De tubos aletados.

Pelo tipo de possibilidade de contato entre os fluidos

Os trocadores podem ser:

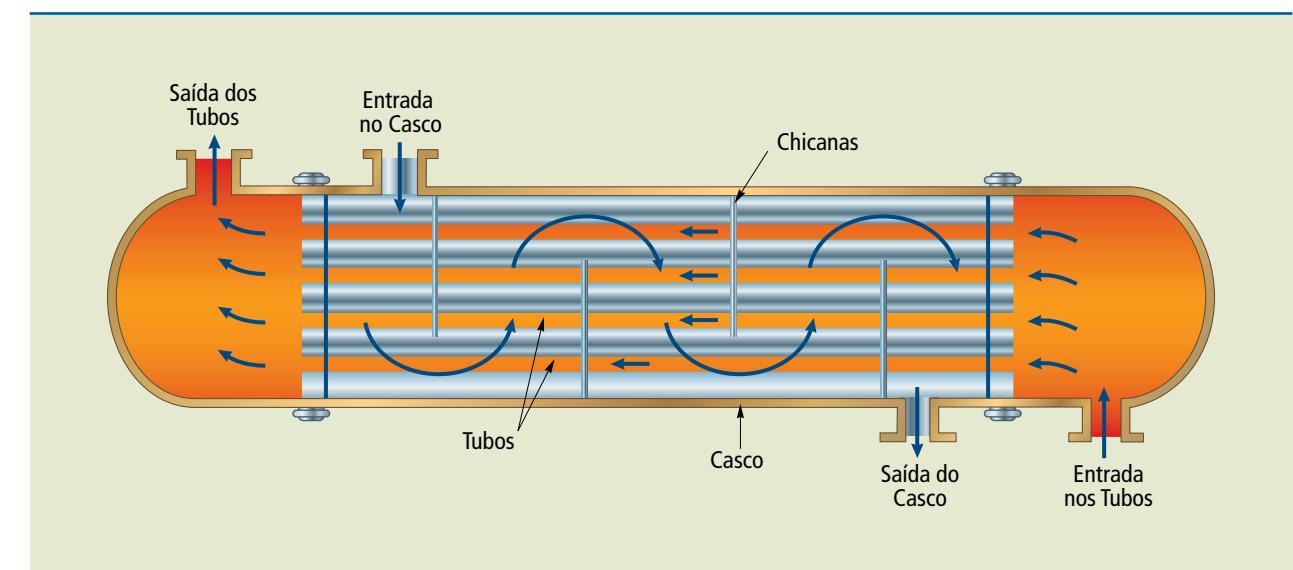
- Separados por parede.
- Com contato direto.

Trocadores de calor de casco e tubos

São o tipo mais comum de trocador nas indústrias (figura 3.22). Têm simplicidade de operação, construção e manutenção. São compostos por um grande tubo externo e um feixe de tubos externos. Em alguns casos, são adicionados deflectores para melhorar as características de troca térmica. Podem ser de passes simples (figura 3.22) ou múltiplos (figura 3.23).

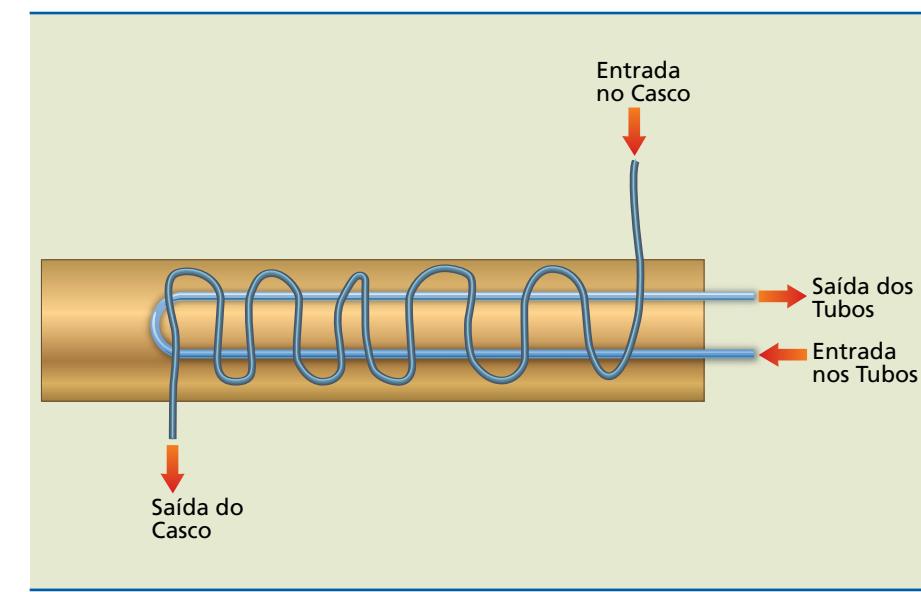
**Figura 3.22**

Trocador de calor de casco e tubos.



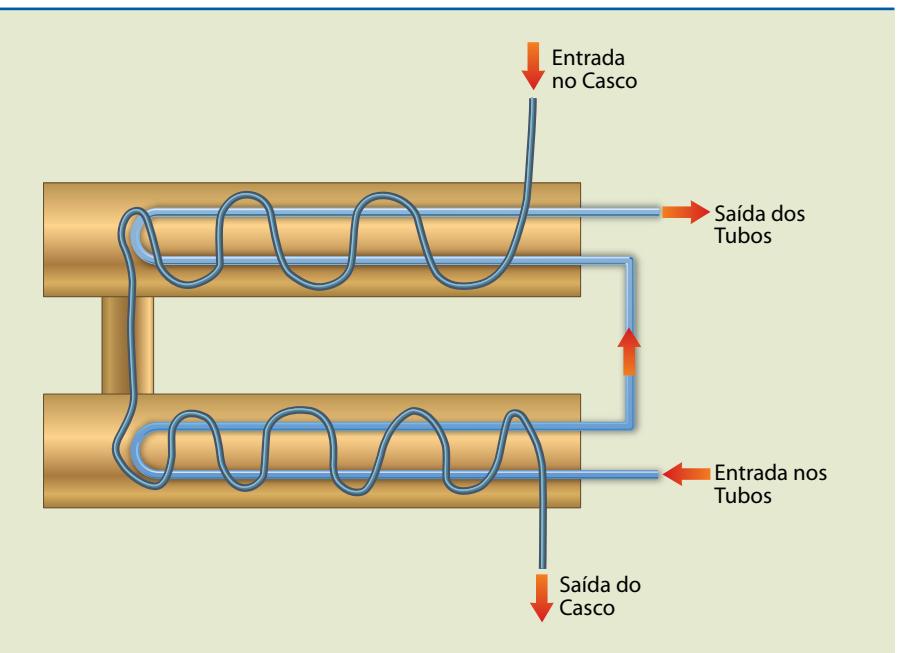
**Figura 3.23**

Trocador de calor casco e tubo de passe simples.



**Figura 3.24**

Trocador de calor casco e tubo passes múltiplos.



#### Trocadores de calor de placas

Nesses trocadores, os canais são formados por placas paralelas separadas por aletas. Há diferentes configurações desse tipo de trocador porque cada configuração tem aplicação específica.

#### Trocadores de calor de tubos aletados

São constituídos de tubos com aletas, internas ou externas. As aletas são superfícies estendidas com finalidade de aumentar a área de troca de calor.

#### Trocadores de calor compactos

São tipicamente usados quando um dos fluidos é gás. Possuem grande área de troca ocupando um pequeno volume.

# Capítulo 4

## Hidráulica

**C**omo o próprio nome indica, a Hidráulica se dedica ao estudo do fluido hidráulico.

Os circuitos hidráulicos são similares aos circuitos pneumáticos, ambos trabalham com fluido, mas a diferença entre eles é que dentro do circuito pneumático escoa o ar comprimido a baixa pressão (relativa) fornecido pelo compressor, enquanto, no outro, o óleo hidráulico, com alta pressão, é enviado pelas bombas hidráulicas.

Outra diferença significativa é que o circuito pneumático é um circuito aberto, isto é, o ar é dispensado na atmosfera; o circuito hidráulico é um circuito fechado, o circuito de retorno volta ao tanque.

Assim, podemos definir hidráulica como um conjunto de elementos físicos que, associados, utilizam um fluido como meio de transferência de energia, permitindo a transmissão e o controle de movimentos e de forças em sistemas produtivos.

A hidráulica e a pneumática são sistemas de geração de energia bastante simples, de fácil manutenção e relativamente seguros. Por esse motivo, são muito utilizados na automação e abrangem vários setores industriais.

## 4.1 Aplicações da hidráulica

As prensas hidráulicas, sem dúvida, são exemplos típicos de aplicação da hidráulica. As figuras 4.1, 4.2 e 4.3 exemplificam outras aplicações.

Os comandos hidráulicos e pneumáticos são usados para gerar forças que movimentam diversas máquinas e equipamentos, como guindastes, direção e freio dos carros, betoneiras, robôs industriais, manufaturas industriais, ferramentas automáticas, portas automáticas de ônibus, elevadores de carga, em cadeiras de dentistas, comandos de vôo dos aviões, empilhadeiras, envasadoras de alimentos, sistema de compactação de lixo dos caminhões coletores de resíduos, furadeiras, parafusadeiras, prensas e outras inúmeras máquinas portáteis ou não.



**Figura 4.1**  
Robô hidráulico.

RONALD KARPIO / ALAMY / OTHER IMAGES



**Figura 4.2**  
Elevadores hidráulicos.

DRIVE IMAGES / GRUPO KEystone

**Figura 4.3**  
Hidráulica móvel.



© RICHARD CUMMINS/CORBIS/CORBIS (DC)LATINSTOCK

A **hidráulica** estuda as características e o uso dos fluidos sob pressão. Essa tecnologia vem se destacando em diversos segmentos da indústria como meio seguro e eficiente de transmissão de energia.

Costumamos dizer que, quando precisamos executar um pequeno esforço, como movimentar objetos leves, utiliza-se a pneumática. E, quando o movimento requerer grandes forças, a melhor opção é a hidráulica. Portanto, hidráulica e pneumática são sistemas de controle de movimento e força.

## 4.2 Manômetros utilizados na hidráulica

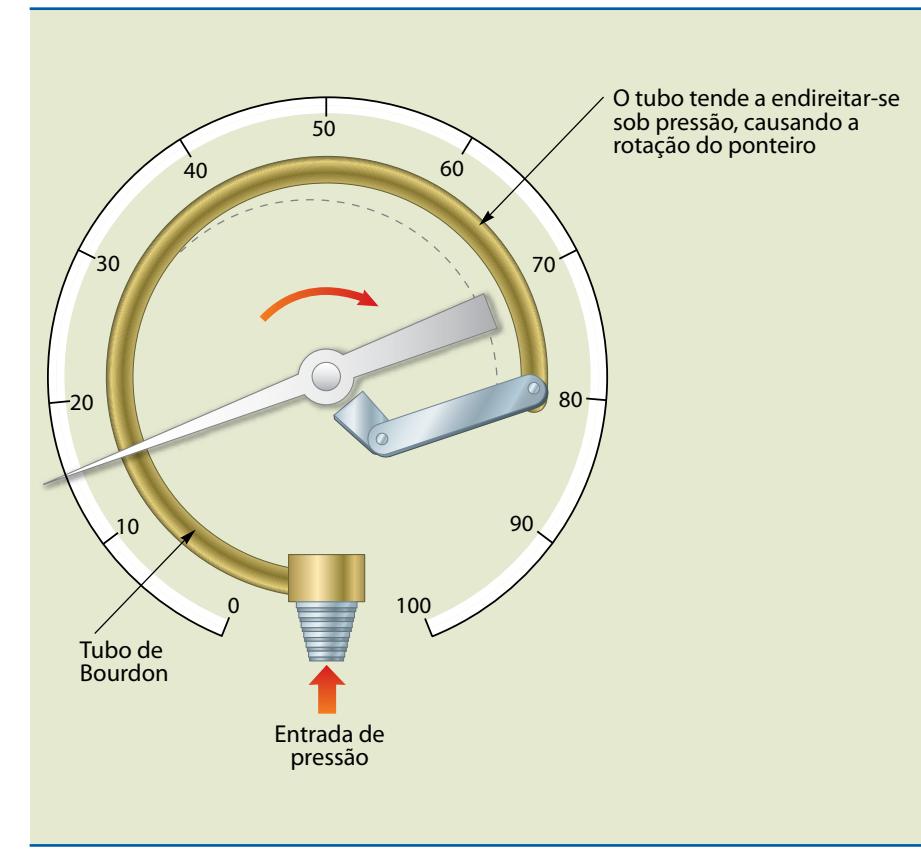
O manômetro é um aparelho utilizado para medição de pressão na escala efetiva. Dois tipos desse dispositivo são usados nos sistemas hidráulicos: o de Bourdon (ou manômetro metálico) e o de núcleo móvel.

### 4.2.1 Manômetro de Bourdon

No manômetro de Bourdon, existe uma escala em unidades de pressão que é ligada a um ponteiro por engrenagens, sendo esse mecanismo conectado a um tubo oval em forma de “C”. Esse tubo é conectado à pressão a ser medida (ver na figura 4.4 um esquema simplificado, que não indica toda a cadeia de engrenagens para transmissão do movimento da ponta do tubo para o ponteiro).

Quando a pressão aumenta, o tubo de Bourdon tende a estender-se por causa das diferenças nas áreas entre os diâmetros externo e interno. A extensão do tubo provoca o movimento do ponteiro que indica o valor da pressão no mostrador.

**Figura 4.4**  
Representação esquemática de um manômetro de Bourdon.



Os manômetros de Bourdon (figura 4.5) são instrumentos de boa precisão e tem vasta utilização em laboratórios e na automação industrial.

**Figura 4.5**  
Fotos de alguns manômetros.

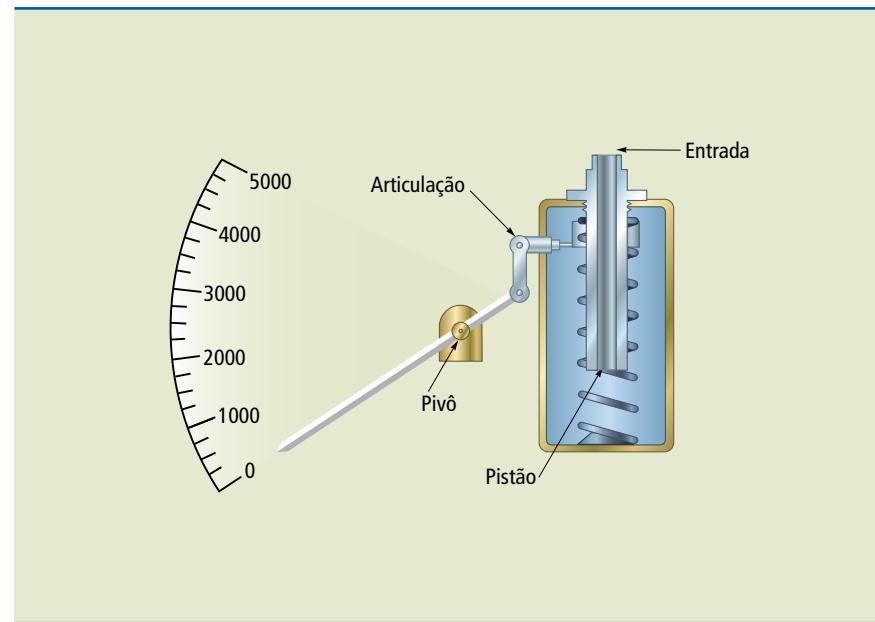


SHUTTERSTOCK

## 4.2.2 O manômetro de núcleo móvel

O manômetro de núcleo móvel consiste em um elemento móvel ligado à fonte da pressão, uma mola de retração, um ponteiro e uma escala graduada de pressão. À medida que a pressão aumenta, o núcleo é empurrado contra a mola de retração, provocando o movimento do ponteiro que está ligado ao núcleo e registrando o valor da pressão no mostrador graduado (figura 4.6).

**Figura 4.6**  
Representação esquemática do manômetro de núcleo móvel.



## 4.3 Multiplicação de força, princípio da prensa hidráulica

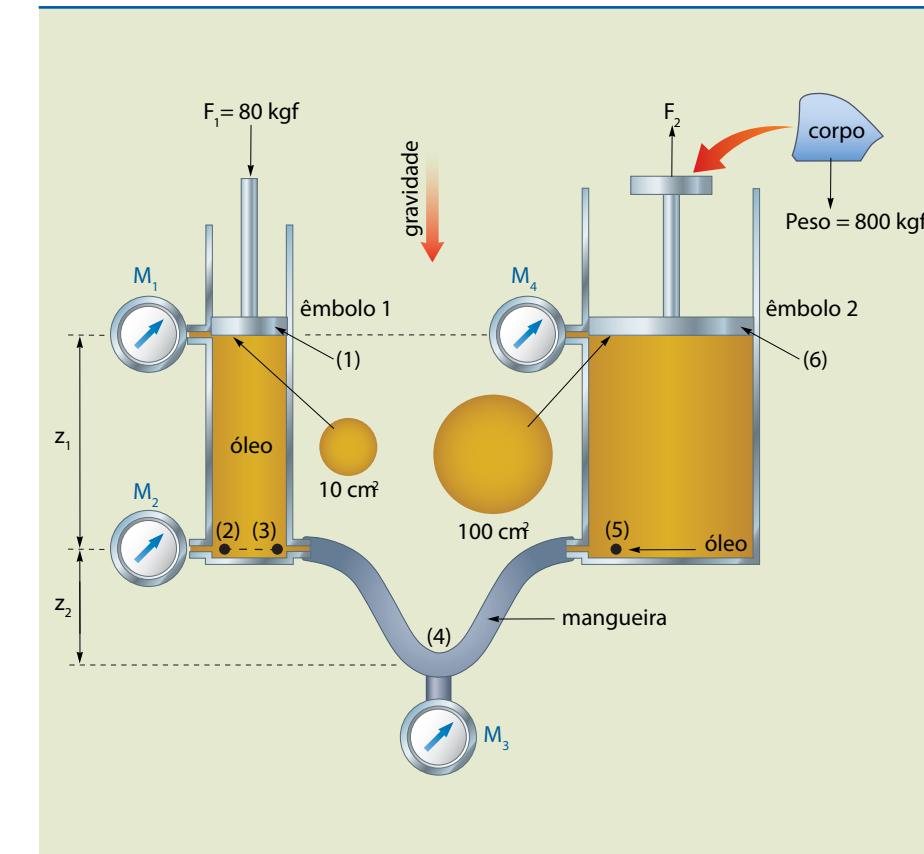
É possível montar um sistema em que uma pequena força seja “transformada” em uma força de maior intensidade? A resposta a essa pergunta é positiva e, na verdade, é a grande motivação da existência do que se convencionou chamar hidráulica, ou aplicações da hidráulica. O fato é que o princípio de Pascal (visto na seção 1.3) pode ser usado de modo a conseguir o aumento da força desejado. A melhor maneira de exemplificar essa possibilidade é apresentar o princípio da prensa hidráulica. Na figura 4.7, é esquematizado um sistema em que dois cilindros contendo óleo são conectados por uma mangueira. Os êmbolos dos cilindros 1 e 2 têm área de  $10 \text{ cm}^2$  e  $100 \text{ cm}^2$ , respectivamente. Quatro manômetros são montados para medir a pressão em pontos do sistema. Em uma situação inicial, sem a aplicação da carga  $F_1$  ao êmbolo 1, desprezando o peso próprio dos êmbolos, a pressão no ponto 1 é exatamente igual à pressão do ponto 6, pois estão na mesma altura. Como foi desprezado o peso próprio dos êmbolos, essa pressão é a pressão atmosférica, cujo valor é zero na escala efetiva de pressões. As pressões nos pontos 2, 3 e 5 também serão iguais entre si e podem ser relacionadas com as pressões dos pontos 1 e 6, da seguinte maneira:

$$P_2 = P_3 = P_5 = P_1 + \rho_{\text{óleo}} g z_1 = P_6 + \rho_{\text{óleo}} g z_1$$

A pressão do ponto 4, analogamente, pode ser relacionada à pressão do ponto 1:

$$P_4 = P_1 + \rho_{\text{óleo}} g (z_1 + z_2)$$

Os manômetros  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  e  $M_4$  fariam, pelo posicionamento, a leitura das pressões dos pontos 1, 2, 4 e 6.



**Figura 4.7**  
Esquema de uma prensa hidráulica.

Ao êmbolo 1, é aplicada uma força de 80 kgf, indicada como força  $F_1$ . A força será transmitida ao óleo no contato da superfície inferior do êmbolo 1, com ele mudando a pressão do ponto 1, de inicialmente zero (igual à pressão atmosférica) para uma pressão (segundo a definição) igual a:

$$P_1 = 80 \text{ kgf}/10 \text{ cm}^2 = 8 \text{ kgf/cm}^2$$

Como a pressão é transportada para todos os pontos do meio fluido, gera aumento em todas as pressões do sistema do valor de  $8 \text{ kgf/cm}^2$ . A pressão no ponto 6 (que também era nula sem a presença da força  $F_1$  no êmbolo 1) passa a valer  $8 \text{ kgf/cm}^2$ . Dessa forma, consegue gerar uma força  $F_2$  de:

$$F_2 = (8 \text{ kgf/cm}^2) \cdot (100 \text{ cm}^2) = 800 \text{ kgf}$$

Essa força é dez vezes maior do que a força  $F_1$  de 80 kgf, capaz, em uma situação estática, de equilibrar um corpo de peso equivalente a 800 kgf colocado sobre

o êmbolo 2. Caso a área do êmbolo 2 fosse 1 000 vezes maior do que a área do êmbolo 1 (ou seja, de  $10\,000\text{ cm}^2$ ), a multiplicação da força seria por 1 000, ou seja, um corpo com 80 000 kgf de peso poderia ser equilibrado se ao êmbolo 1 fosse aplicada a mesma força de 80 kgf.

Poderíamos tirar uma conclusão óbvia do exemplo indicado, que é a possibilidade de multiplicação infinita de uma força, desde que usado um sistema capaz de reproduzir ao esquema indicado aumentos sucessivos de área. Isso é possível? A resposta é positiva. Mas, por que, então, não poderíamos usar apenas esse princípio e dispensar, por exemplo, usinas de geração de energia? Aparentemente, não estamos criando energia ao multiplicar a força? A primeira lei da Termodinâmica (ver seção 3.1) indica irrefutavelmente que não há como criar ou destruir energia, apenas transformá-la de um tipo em outra. Então, o que ocorre?

Na verdade, devemos lembrar que o trabalho realizado por uma força (que é energia) é a multiplicação da força por um deslocamento. Sabendo que o fluido, nesse caso, o óleo, é um líquido e pode ser considerado incompressível, o volume deslocado pelo êmbolo 1 ( $V_{\text{deslocado}} = \Delta z_1 \cdot 10$ ) deve ser o mesmo volume de fluido deslocado do lado do êmbolo 2 ( $V_{\text{deslocado}} = \Delta z_2 \cdot 100$ ). Assim, pela análise da figura 4.7 e do equacionamento, descobrimos que o êmbolo 2 se movimenta muito menos do que o êmbolo 1. Nesse caso, o deslocamento do êmbolo 2 é a décima parte do deslocamento do êmbolo 1 ( $\Delta z_2 = \Delta z_1 / 10$ ). A multiplicação do deslocamento do êmbolo 1 pela força aplicada ao êmbolo 1 é igual à multiplicação do deslocamento do êmbolo 2 pela força aplicada pelo êmbolo 2.

Desse modo, a equação da conservação da energia ou primeira lei da Termodinâmica ainda continua válida ( $F_1 \Delta z_1 = F_2 \Delta z_2$ ).

Resumindo, o trabalho produzido pela força  $F_1$  é o mesmo trabalho produzido pela força  $F_2$ . Como não há meio de criar energia, o aumento da força é compensado pela diminuição de deslocamento.

### Exemplo

Um macaco hidráulico é necessário para elevar um automóvel de 2 000 kgf pelo bombeamento manual.

- Calcular a força  $F_1$  necessária para elevar o automóvel da figura 4.8.
- Calcular quantas vezes o operador deve bombear para que o veículo suba 20 cm. O avanço manual é conseguido na razão de 1 cm por bombeamento.

Dados:

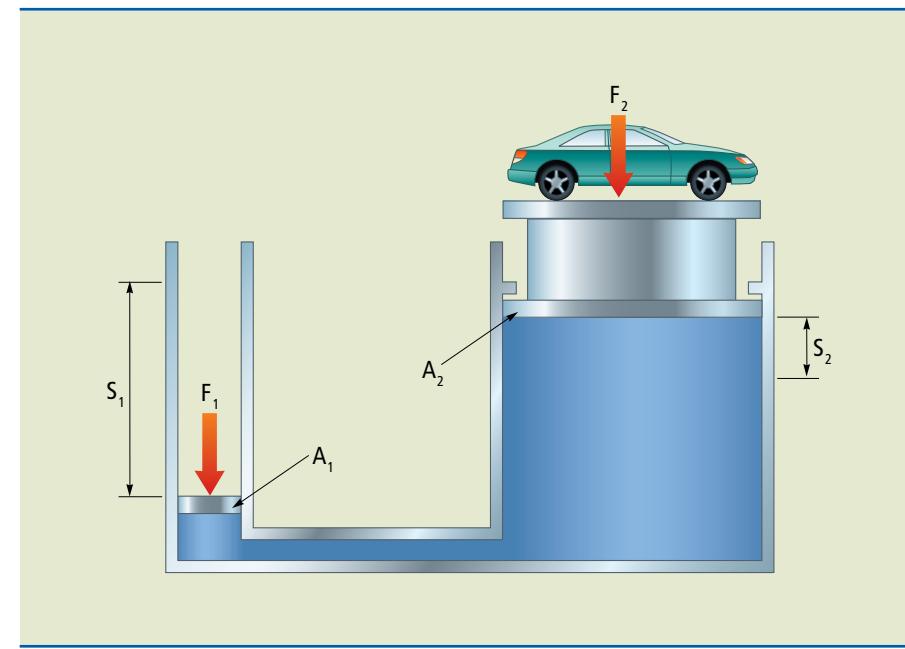
$$F_2 = 2\,000\text{ kgf}$$

$$A_1 = 24\text{ cm}^2$$

$$A_2 = 240\text{ cm}^2$$

$$S_1 = 10\text{ cm}$$

$$\pi = 3,14$$



**Figura 4.8**  
Esquema ilustrativo da prensa.

Solução:

a)  $P_1 = P_2$

[admite-se que os dois pistões estejam à mesma altura]

$$\frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2}$$

$$F_1 = \frac{F_2 \cdot A_1}{A_2}$$

$$F_1 = \frac{2000 \cdot 24}{240} = 200\text{ kgf}$$

b)  $V_1 = V_2$

$$A_1 \cdot S_1 = A_2 \cdot S_2$$

$$24 \cdot 10 = 240 \cdot S_2$$

$$S_2 = \frac{240}{240} = 1\text{ cm}$$

O operador deve bombear 20 vezes para que o automóvel suba 20 cm, pois, em cada bombeamento, o valor de  $S_2$  é de 1 cm.

## 4.4 Fluido hidráulico

O fluido hidráulico é o insumo fundamental para um sistema hidráulico industrial, pois é ele que transmite a energia, lubrifica e funciona como vedação. É, ainda, um dos meios de transferência de calor.

São vários os tipos de fluidos hidráulicos. Eles são fabricados de acordo com as normas DIN 51524 e DIN 51525 e obedecem às siglas HL, HLP e HV, em que:

H: óleo hidráulico.

L: aditivo para aumentar a proteção contra corrosão e/ou prolongar estabilidade.

P: aditivo para reduzir e/ou aumentar habilidade de carregamento de carga.

V: características de temperatura e viscosidade melhoradas.

### 4.4.1 Fluido à base de petróleo

É o fluido mais comum. Seus aditivos são importantes em sua composição e conferem ao óleo características adequadas para uso em sistemas hidráulicos, descritas a seguir.

**Viscosidade é a medida de resistência ao fluxo das moléculas de um líquido quando elas deslizam umas sobre as outras. É o inverso da fluidez.**

#### Índice de viscosidade (IV)

O índice de **viscosidade** indica qual é a variação da viscosidade do fluido em diferentes temperaturas. Por exemplo, se o índice de viscosidade é alto, o fluido sofre pouca mudança de viscosidade em relação à mudança de temperatura.

#### Efeito da temperatura sobre a viscosidade

O óleo, quando em baixas temperaturas, apresenta alta resistência ao escoamento. Com o aumento da temperatura, escoa com mais facilidade. O aumento da temperatura diminui a força de atração molecular no óleo, permitindo escoamento mais fácil. Nos líquidos, conforme a temperatura aumenta, sua viscosidade diminui. O aditivo regulador do IV (índice de viscosidade) minimiza esses efeitos indesejáveis de variação da viscosidade com a temperatura.

#### Inibidores de oxidação

A oxidação do óleo ocorre por causa de uma reação entre o óleo e o oxigênio do ar, o que resulta em baixa capacidade de lubrificação, em formação indesejável de ácido, em geração de partículas de carbono e, ainda, em aumento da viscosidade do fluido.

Fatores que aumentam a oxidação do óleo:

- Alta temperatura do óleo.
- O aumento no fornecimento de oxigênio.
- Catalizadores metálicos, tais como cobre, ferro ou chumbo.

#### Inibidores de corrosão

Esses aditivos protegem as superfícies de metal do ataque de ácidos e material oxidante. Eles formam uma película protetora sobre a superfície do metal, neutralizando o material corrosivo ácido à medida que este vai sendo produzido.

#### Aditivos de extrema pressão ou antidesgaste

Como o nome indica, são usados em situações de alta temperatura e alta pressão, ou seja, em pontos localizados onde essas condições ocorrem.

#### Aditivos antiespumantes

São destinados a impedir que bolhas de ar sejam recolhidas pelo óleo, fato que leva a falhas no sistema hidráulico. Os aditivos inibidores agem combinados com as bolhas de ar, que se desprendem da superfície do fluido e colapsam.

#### Fluidos resistentes ao fogo

O fluido proveniente do petróleo é inflamável, portanto, não deve ser usado em condições de temperaturas elevadas ou perto de chamas. Por essa razão, foram desenvolvidos fluidos resistentes ao fogo, que são: emulsão de óleo em água, fluido de água-glicol e fluido sintético.

**Emulsão de óleo em água** – Consiste em uma mistura de água (elemento dominante) e óleo, que pode variar de 1% a 40%.

**Emulsão de água em óleo ou emulsão invertida** – É também um fluido resistente ao fogo, com cerca de 40% de água e 60% de óleo. Nesse caso, a proporção de óleo é maior; assim, esse fluido tem características de lubrificação melhores do que as emulsões de óleo em água.

**Fluido de água-glicol** – Solução de glicol (anticongelante) e água (60% de glicol e 40% de água).

**Sintético** – Tipo mais caro, costumam ser formados por ésteres de fosfato, hidrocarbonos clorados ou uma mistura de ambos com frações de petróleo.

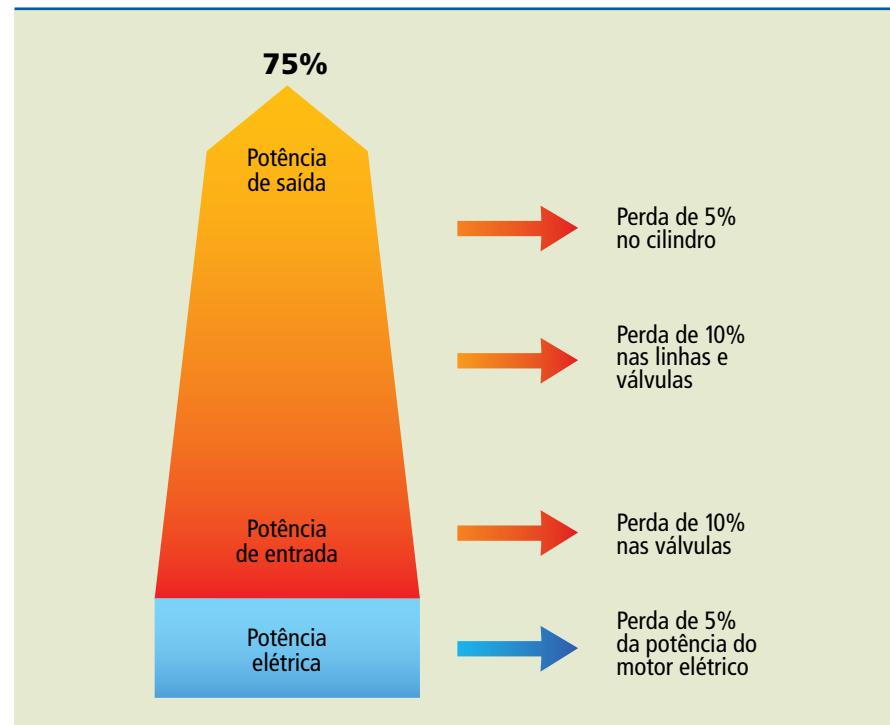
Componentes que operam com esse tipo necessitam de guarnições de material especial.

## 4.5 Potência versus eficiência em sistemas hidráulicos

Estima-se que, nos sistemas hidráulicos, por causa das perdas de carga geradas pelos próprios elementos do circuito (válvulas, curvas, cilindros, instrumentos de medida e a própria tubulação), o aproveitamento final da energia fornecida ao circuito seja por volta de 75% (figura 4.9).

**Figura 4.9**

Representação esquemática dos valores das perdas de energia nos sistemas hidráulicos (os valores são apenas referenciais, variando de sistema para sistema).



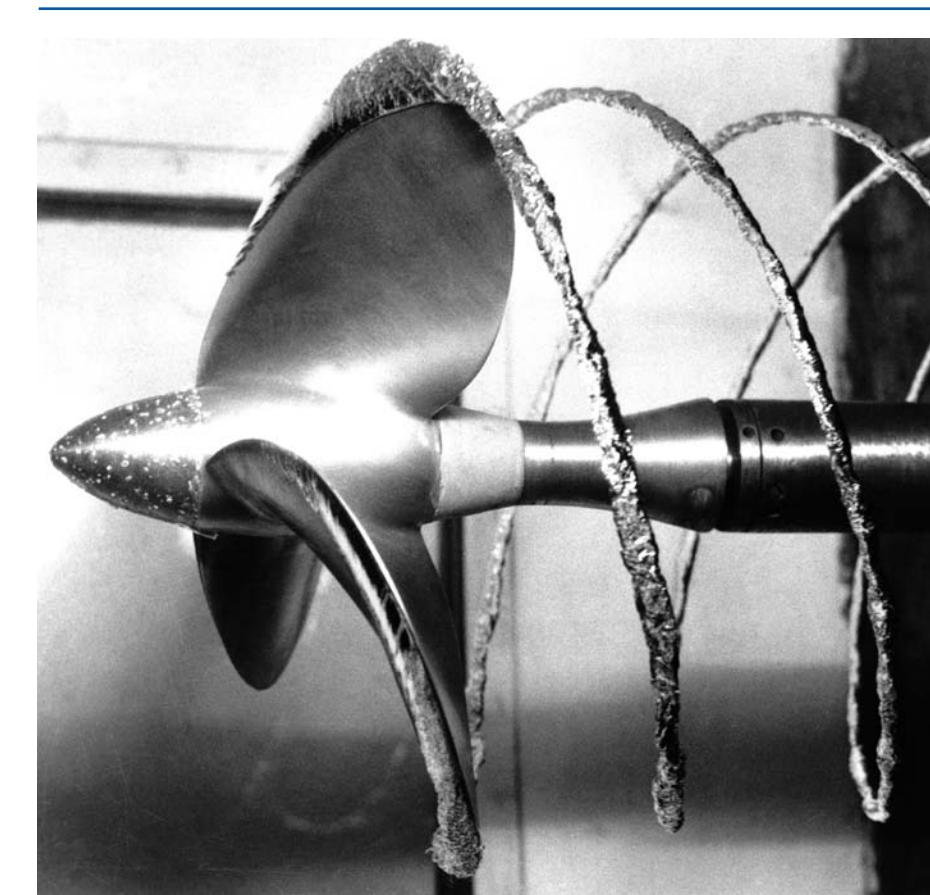
#### 4.5.1 Cavitação

Em uma condição desfavorável, é possível que a pressão de sucção na entrada da bomba atinja valores iguais ou inferiores à pressão de saturação na temperatura de bombeamento (reveja seção 3.4). Nessa condição, o óleo comece um processo de mudança de fase líquido-vapor, formando bolhas de vapor de óleo que adentram a bomba. Já no interior dela, as bolhas de vapor de óleo sofrem compressão pela ação da bomba e retornam à condição de líquido. O colapso das bolhas de vapor de óleo na superfície interna da bomba (implosão) ocorre do modo que elas podem promover retirada contínua de pequenas quantidades de material em um processo altamente danoso à bomba. Esse fenômeno é denominado **cavitação**, ele interfere na lubrificação e destrói a superfície dos metais. A cavitação pode ocorrer em quaisquer regiões em que a pressão atingir valores mais baixos do que a pressão de saturação na temperatura de bombeamento, provocando desgaste, corrosão, destruição de pedaços de rotores, carcaças e tubulações, como se pode ver na figura 4.10.

##### Causas da cavitação

São causas da cavitação:

- Filtro da linha de sucção saturado.
- Respiro do reservatório fechado ou entupido.
- Linha de sucção muito longa.
- Muitas curvas na linha de sucção (elevada perda de carga).
- Estrangulamento na linha de sucção.
- Linha de sucção congelada.

**Figura 4.10**

Exemplo de defeito provocado pela cavitação em atuador.

SCIENCE PHOTO LIBRARY/LATINSTOCK

##### Características de uma bomba em cavitação

Podemos distinguir as seguintes características de uma bomba em cavitação:

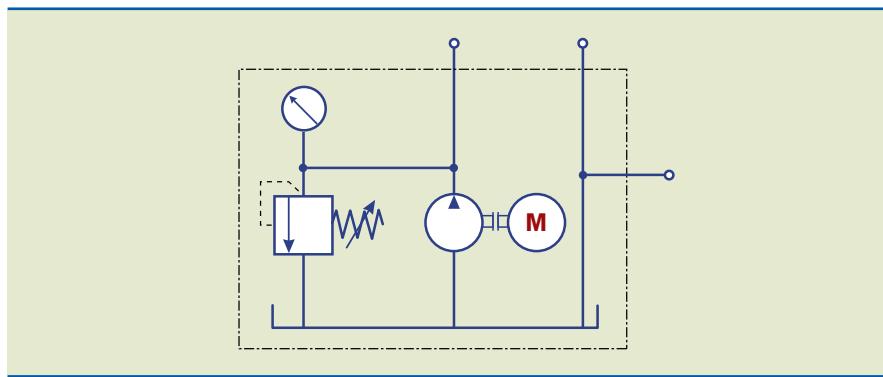
- Queda de rendimento.
- Marcha irregular.
- Vibração e ruído provocados pela implosão das bolhas de vapor.

#### 4.6 Elementos hidráulicos

##### 4.6.1 Grupo de acionamento e reservatório hidráulico

Os reservatórios hidráulicos têm como função armazenar o fluido hidráulico de um sistema. São, em geral, dotados de paredes de aço e têm base abaulada, topo plano com placa de apoio; linhas de sucção, retorno e drenos; plugue do dreno; indicador de nível de óleo; tampa para respiradouro e enchimento; tampa para limpeza e placa deflectora (ou chicana).

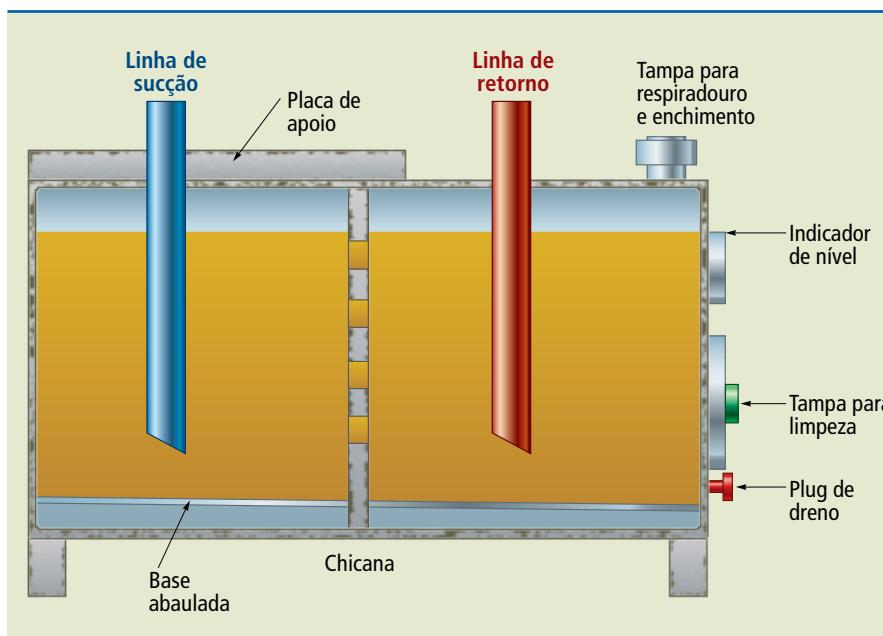
Ver na figura 4.11 o símbolo do reservatório contendo motor elétrico acoplado à bomba hidráulica, manômetro, válvula de alívio, linhas de sucção, pressão e retorno.

**Figura 4.11**

Um corte indicando as características internas de um reservatório típico pode ser visto na figura 4.12.

**Figura 4.12**

Ilustração típica de um reservatório de óleo.



#### Funcionamento de um reservatório hidráulico

Quando o fluido retorna ao reservatório, a chicana impede que vá diretamente à linha de sucção. As linhas de retorno se localizam abaixo do nível do fluido e no lado da chicana oposto à linha de sucção. Impedidas de ir para a linha de sucção, as impurezas maiores sedimentam. O ar sobe à superfície do fluido e faz com que o calor seja dissipado para as paredes do reservatório.

#### Funções do reservatório

São as seguintes as funções de um reservatório:

- Reserva o fluido hidráulico.
- Dissipa o calor.
- Suporta a bomba, motor e outros componentes (ver figura 4.13).

**Figura 4.13**

Reservatórios hidráulicos.



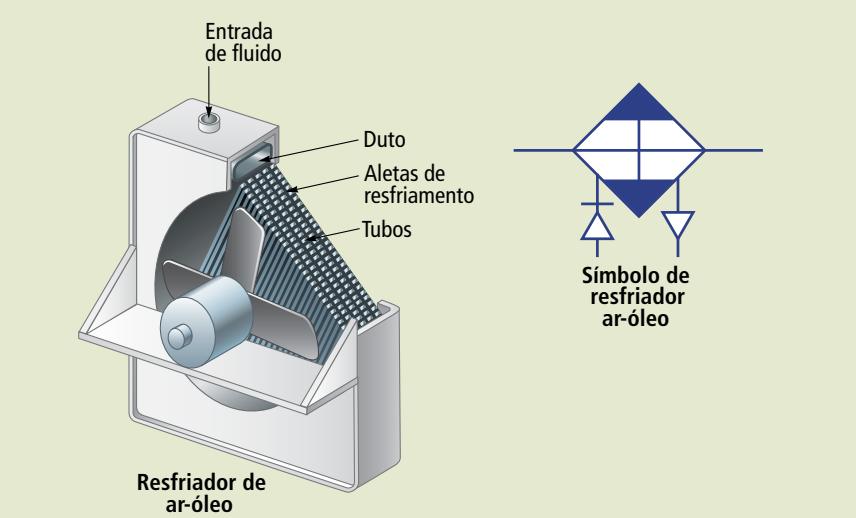
#### 4.6.2 Resfriadores

Os sistemas hidráulicos aquecem porque a perda de energia (perda de carga) se transforma em calor. Parte desse calor é dissipado no reservatório (figura 4.14). Entretanto, se o reservatório não é suficiente para manter o fluido à temperatura normal, ocorre um superaquecimento. A medida corretiva a ser tomada nesses casos é a utilização de resfriadores ou trocadores de calor.

Os trocadores mais comuns são do tipo água-óleo e ar-óleo.

**Figura 4.14**

Ilustração de um dissipador de calor.



### Resfriadores a ar

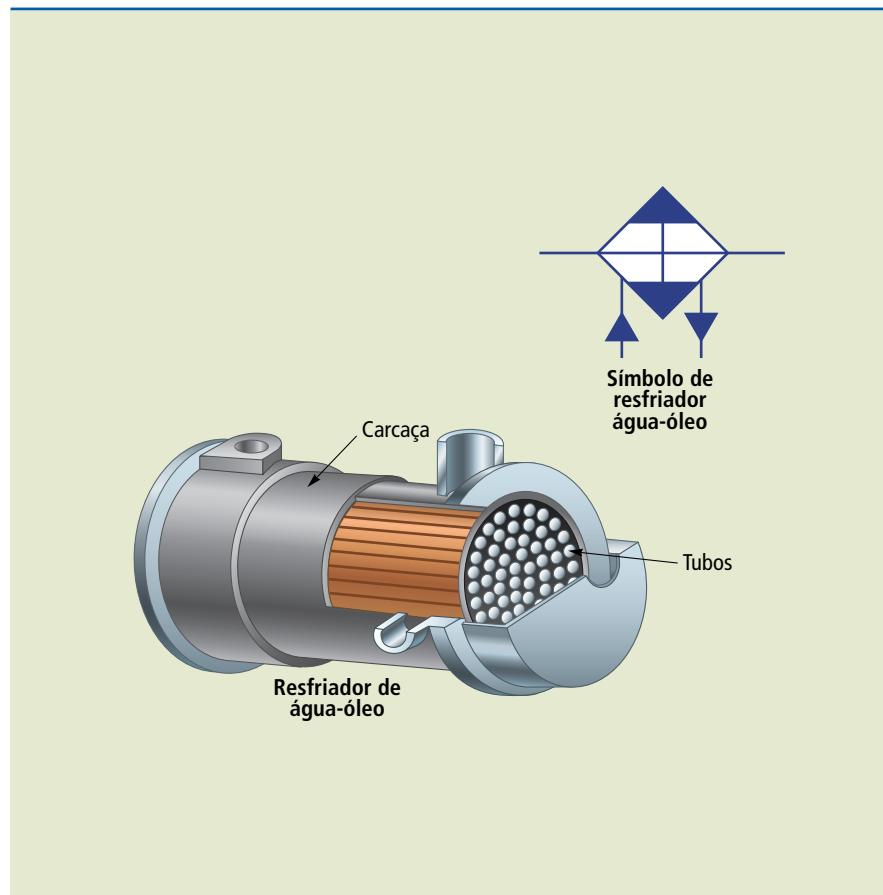
No resfriador a ar, a troca de calor ocorre de forma forçada, pois um ventilador é utilizado para soprar o ar através de tubos aletados. A utilização deste tipo de resfriador se dá em instalações industriais onde a água não é disponívei facilmente.

### Resfriadores a água

Esses trocadores de calor consistem basicamente em um feixe de tubos encaixados em um invólucro metálico, e o fluido do sistema hidráulico é bombeado através do invólucro e sobre os tubos, que são refrigerados por água fria.

**Figura 4.15**

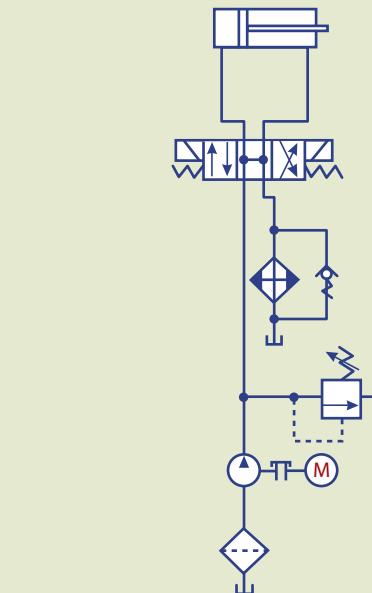
Representação esquemática de um resfriador do tipo água-óleo.



### Resfriadores no circuito

Os resfriadores, em geral, operam em baixa pressão, o que exige posicioná-los em linha de retorno ou dreno do sistema ou sua instalação em sistema de circulação.

Para preservar os resfriadores quanto a possíveis picos de pressão, esses são ligados ao sistema em paralelo com uma válvula de retenção de pressão de ruptura (figura 4.16).

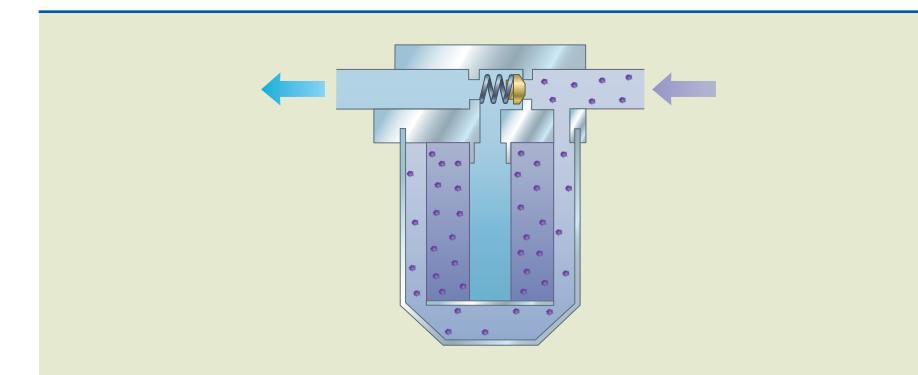


**Figura 4.16**

Representação de um circuito com sistema de resfriamento.

### 4.6.3 Filtros hidráulicos

Os elementos que contaminam o fluido estão sempre presentes no sistema hidráulico, e, na maioria das vezes, causam o mau funcionamento dos componentes e do próprio sistema. O processo de filtragem mecânica exige um elemento que, colocado na linha, é capaz de realizar a retenção de materiais particulados (figura 4.17).



**Figura 4.17**

Filtro hidráulico.

A contaminação dos fluidos interfere no bom desempenho do fluido hidráulico, causando os seguintes problemas:

- Interferência na transmissão de energia, vedando pequenos orifícios nos componentes hidráulicos. Nessa condição, a ação das válvulas seria imprevisível, improdutiva e, sobretudo, insegura.
- As partículas de sujeira interferem no resfriamento do líquido, porque formam um sedimento que prejudica a transferência de calor para as paredes do reservatório.

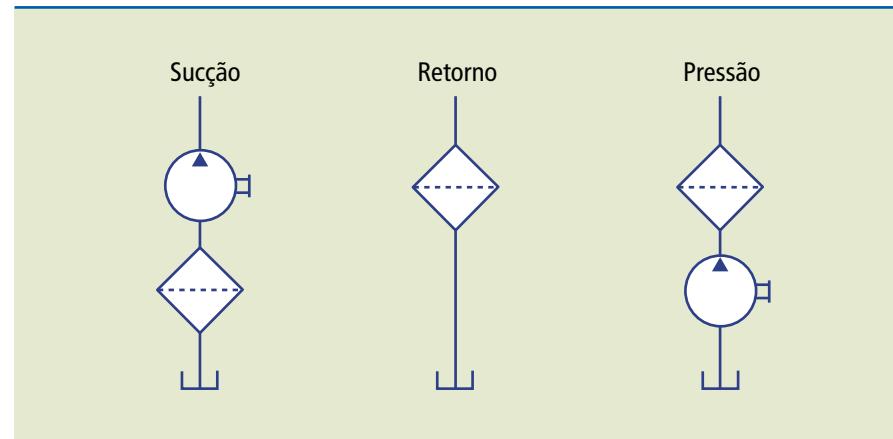
- Interfere na lubrificação, causando desgaste excessivo, lentidão nas respostas, operações não sequenciadas, falha prematura do componente e queima da bobina do solenoide. É o maior problema de contaminação em um sistema hidráulico.

#### 4.6.4 Tipos de filtragem

São três os tipos de filtragem, definidos pela posição no sistema de filtragem: sucção, retorno e pressão (ver figura 4.18).

**Figura 4.18**

Indicação da posição de filtro em um sistema hidráulico.



#### Filtros de sucção

Existem dois tipos de filtro de sucção: interno e externo.

##### Filtros de sucção internos

São os filtros mais simples (ver figura 4.19) e mais utilizados. Sua instalação é feita dentro do reservatório hidráulico, imerso no fluido, impedindo a passagem de partículas grandes.

**Figura 4.19**

Filtro de sucção interno.



Vantagens:

1. Protegem a bomba da contaminação do reservatório.
2. São baratos

Desvantagens:

1. Sua manutenção é difícil, principalmente quando o fluido está aquecido.
2. Não possuem indicador de saturação.
3. Não protegem os elementos do sistema das partículas geradas pela operação da bomba.
4. Podem prejudicar a bomba se não estiverem dimensionados corretamente e bloquear a passagem do fluido se não conservados adequadamente.”

#### Filtros de sucção externos

Instalados na linha de sucção, fora do reservatório, podem ser instalados acima ou na lateral dos reservatórios.

Vantagens:

1. Protegem a bomba, pois filtram as impurezas depositadas no reservatório.
2. Possuem indicador que mostra quando o elemento filtrante está sujo.
3. Podem ser trocados sem necessidade de desmontagem da linha de sucção do reservatório.

Desvantagens:

1. Podem prejudicar a bomba hidráulica caso não dimensionados de forma adequada ou não conservados.
2. Os elementos do sistema não ficam protegidos de partículas geradas pela bomba.

#### Filtros de linha de retorno

Como o nome indica, esse tipo de filtro (figura 4.20) está posicionado no circuito de retorno, próximo do reservatório.

Vantagens:

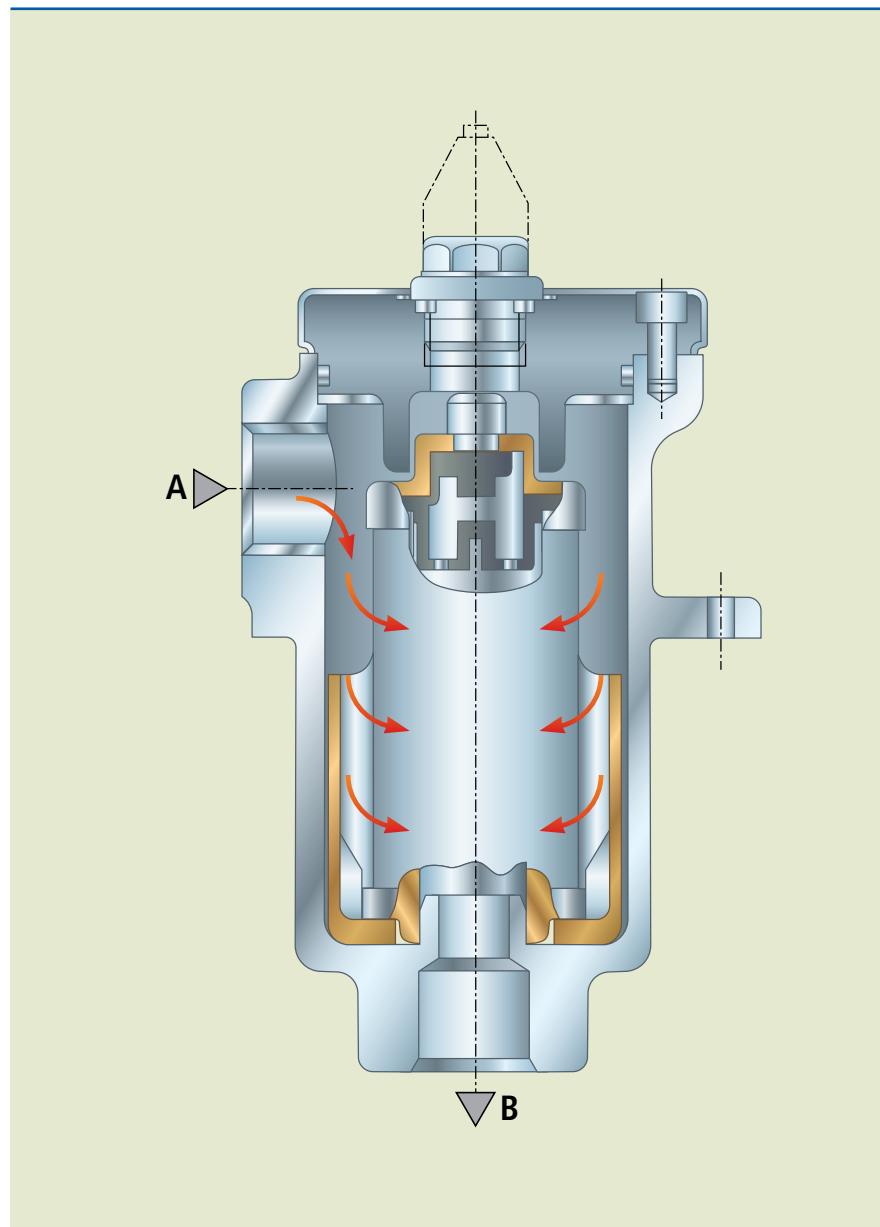
1. Retêm partículas provenientes do sistema antes que elas entrem no reservatório.
2. Aproveitando-se da pressão do sistema para impulsionar o fluido através do elemento filtrante – este tipo de fluido pode reter partículas finas.

Desvantagens:

1. Não há proteção direta para os componentes do circuito.
2. Pode ocorrer dano em alguns componentes do sistema por causa da contra-pressão gerada pelo filtro.

**Figura 4.20**

Filtro de linha de retorno.



Pode ser encontrado em uma versão duplex, cuja característica é a filtragem contínua, realizada em duas ou mais câmaras de filtro com válvulas que permitem o processo ininterrupto. Quando um componente necessita de manutenção, a válvula duplex é acionada de fora para desviar o fluxo para a câmara oposta do filtro, deixando livre o elemento sujo para que possa ser substituído, enquanto o fluxo continua a passar pelo outro filtro, prevenindo qualquer bloqueio.

#### Filtros de pressão

Seu posicionamento é no circuito, mais exatamente entre a bomba e um componente do sistema. Entretanto, pode também ser posicionado entre os componentes do sistema.

#### Vantagens

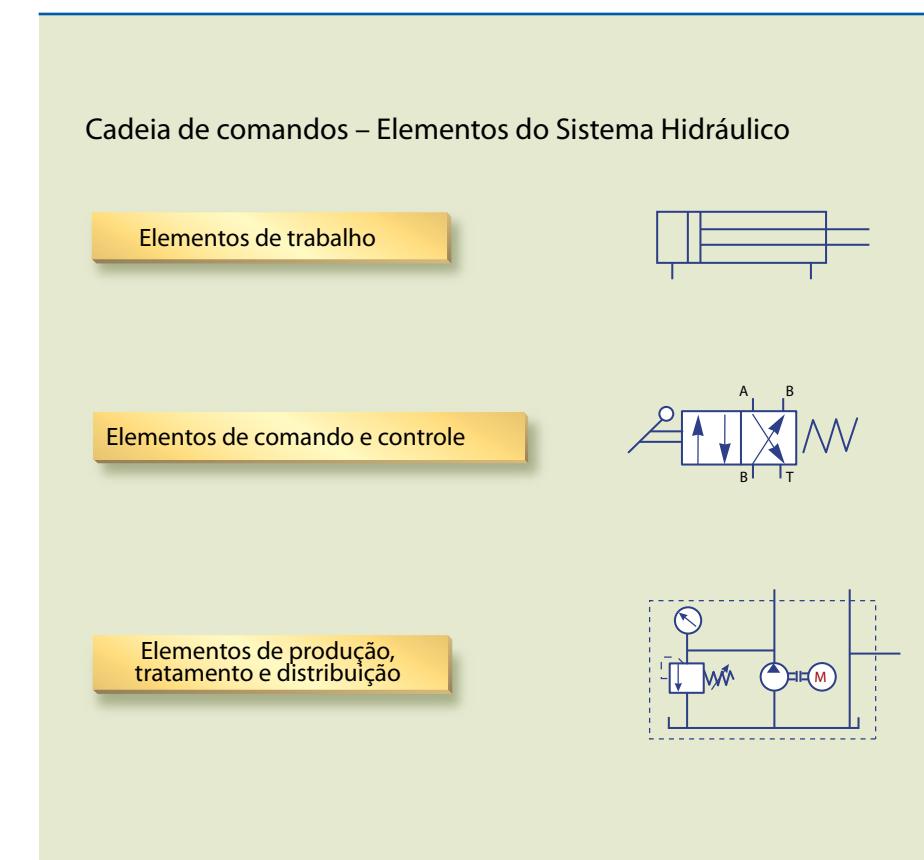
1. Podem filtrar partículas finas.
2. Protegem um componente específico contra contaminação por partículas finas.

#### Desvantagem:

Custo elevado, pois a carcaça de um filtro de pressão deve ser projetada para resistir a alta pressão, choques hidráulicos e diferenciais de pressão.

#### 4.6.5 Cadeia de comandos

Em um sistema hidráulico, os atuadores são os elementos responsáveis para executar o trabalho hidráulico. Já os elementos de comando e de controle são encarregados de fornecer o fluido hidráulico para promover o avanço ou recuo dos atuadores, uma vez que recebem o fluido do elemento de produção, tratamento e distribuição (figura 4.21).



**Figura 4.21**  
Representação dos elementos de trabalho, de comando e controle e dos elementos de produção, tratamento e distribuição.

#### Atuadores hidráulicos

São os elementos hidráulicos responsáveis por converter a energia de trabalho em energia mecânica.

Os atuadores hidráulicos podem ser divididos basicamente em dois tipos:

1. Lineares, que podem ser de simples ação ou de dupla ação (figura 4.22):

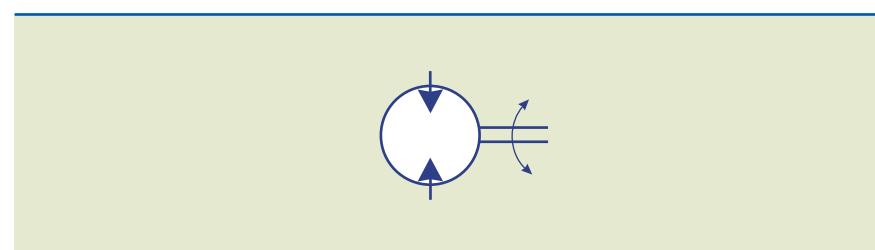
**Figura 4.22**

Atuadores hidráulicos lineares: a) de simples ação; b) de dupla ação.



**Figura 4.23**

Atuador hidráulico rotativo.



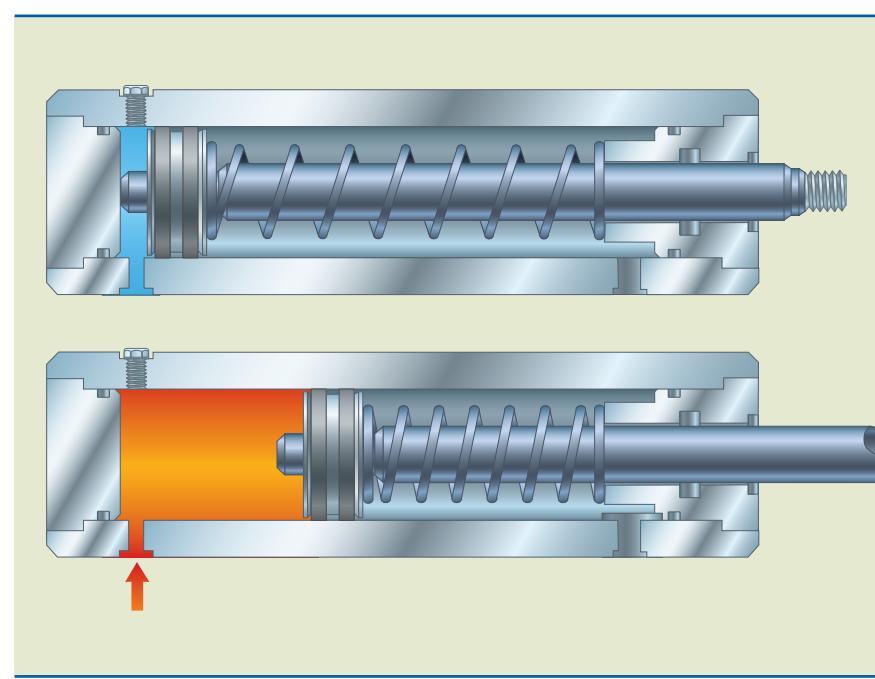
#### Atuadores de simples ação

**Atuadores de simples ação** – Um cilindro no qual a pressão de fluido é aplicada em somente uma direção para mover o pistão.

**Atuador de simples ação e retorno por mola** – Um cilindro no qual uma mola recua o conjunto do pistão (figura 4.24).

**Figura 4.24**

Atuador de simples ação.

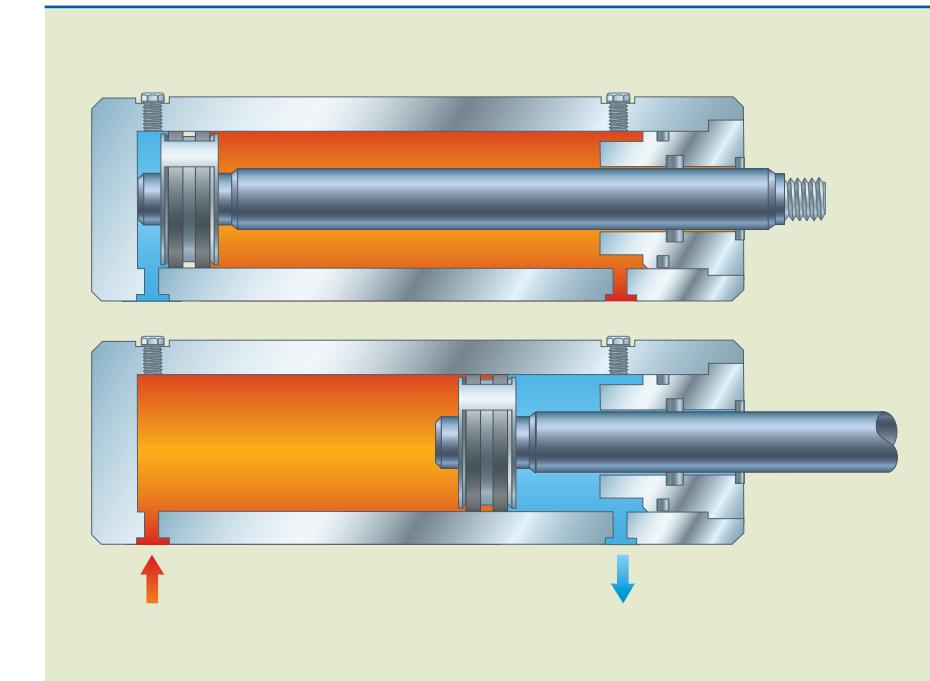


#### Atuadores de dupla ação

É cilindro de dupla ação com haste em um lado (figura 4.25). Em alguns casos, o êmbolo do cilindro tem um ímã permanente que pode ser usado para operar um sensor de proximidade.

**Figura 4.25**

Atuador de dupla ação.



**Choque hidráulico** – O trabalho hidráulico move o cilindro e, se este encontra um obstáculo (final de curso de um pistão, por exemplo), a inércia do líquido do sistema é transformada em choque, denominado choque hidráulico. Choques exageradamente intensos podem causar dano ao cilindro

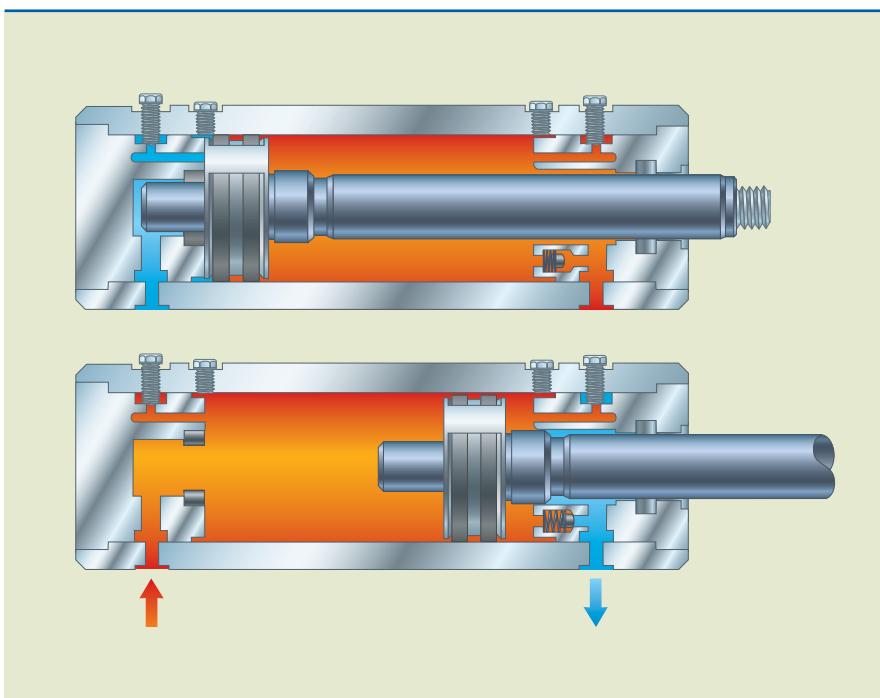
**Amortecimento** – Diminui o movimento do cilindro antes do impacto no final de seu curso. Os amortecedimentos podem ser instalados em ambos os lados de um cilindro (figura 4.26).

O movimento do cilindro é controlado pelas cargas de pressão conectadas. O amortecedor pode ser regulado com dois parafusos de ajuste.

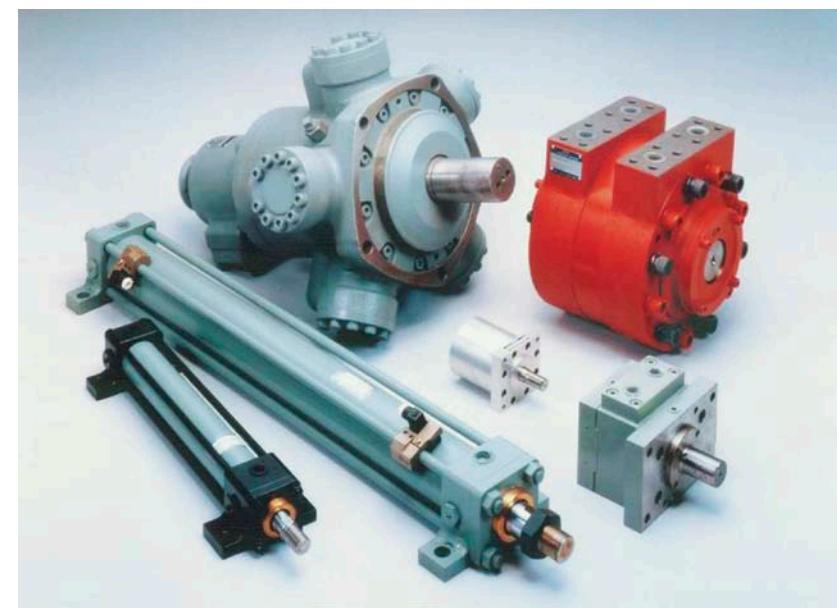
Uma válvula de agulha para fazer o controle de fluxo e um plugue ligado ao pistão auxiliam o amortecimento. Quando o atuador chega próximo do final de seu curso, o batente bloqueia a saída total do fluido e este tem, então, de passar pela válvula de controle de vazão. Nesse momento, algum fluxo escapa pela válvula de alívio (conforme sua regulagem). O fluido que continua contido no fim de curso do atuador é expelido através da válvula de controle de vazão, retardando, assim, o movimento do pistão. Essa válvula determina a taxa de desaceleração, evitando o choque das partes internas do atuador. No sentido inverso, o fluxo passa pela linha de bypass da válvula de controle de vazão onde está a válvula de retenção ligada ao cilindro.

**Figura 4.26**

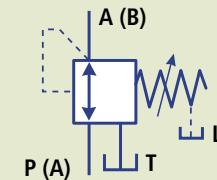
Cilindro de dupla ação com haste passante e amortecedor na posição final de curso.

**Figura 4.28**

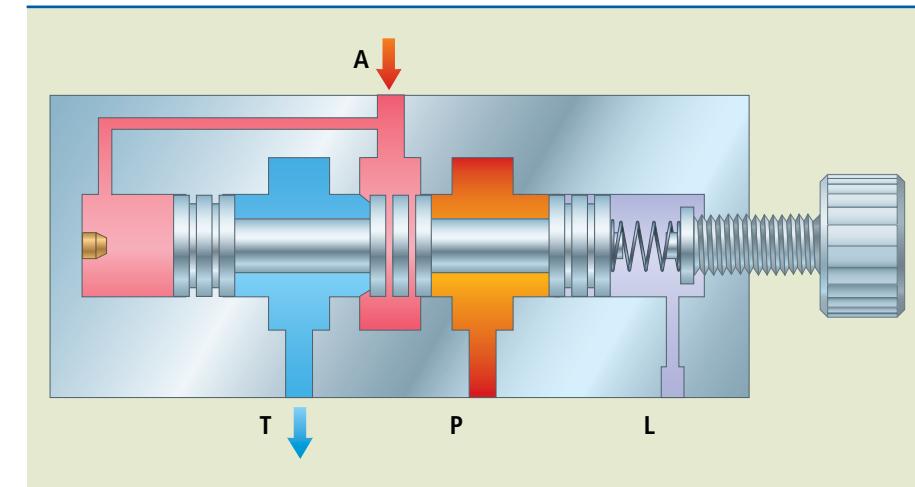
Atuadores hidráulicos.

**Figura 4.29**

Símbolo de uma reguladora de pressão com três vias.

**Figura 4.30**

Exemplo de uma válvula reguladora de pressão.

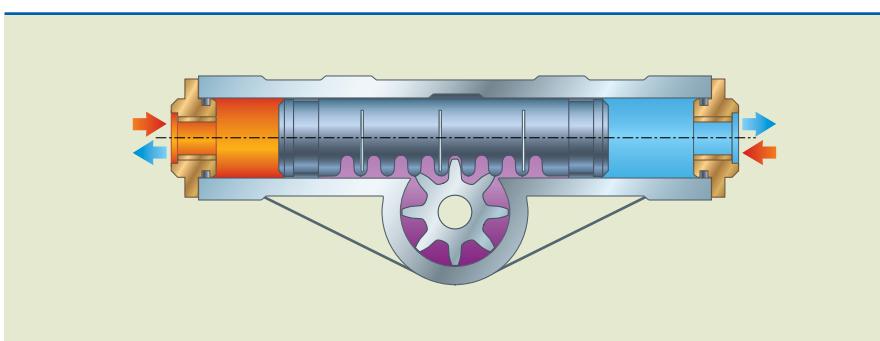


### Atuadores rotativos

Operam com o princípio de pinhão e cremalheira, transformando o movimento linear do êmbolo em um movimento rotativo do eixo do pinhão (figura 4.27).

**Figura 4.27**

Esquema representativo de um atuador rotativo.



### Vedações

As vedações devem existir em toda a extensão do pistão do cilindro e também na haste, para garantir o funcionamento dos pistões sem vazamentos e sem perda de pressão. Os pistões do atuador são vedados com as guarnições elásticas ou anéis de vedação de ferro fundido. Os anéis de pistão são duráveis, entretanto, pouco eficazes, pois permitem vazamento na ordem 15 a 45 cm<sup>3</sup> por minuto em condições de operação normal. Já as guarnições tipo U elásticas não vazam em condições normais, mas são menos duráveis.

Alguns cilindros são equipados com guarnições com formato em V ou em U, que podem ser fabricadas de couro, poliuretano, borracha nitrílica ou viton.

## 4.6.6 Válvulas de controle de pressão

As válvulas do tipo controladoras de pressão (exemplos nas figuras 4.29 e 4.30) são usadas na maioria dos sistemas hidráulicos industriais.

Função de uma válvula de controle de pressão:

- Limita a pressão máxima de um sistema.
- Regula a pressão no circuito quando esta é reduzida momentaneamente.
- atua como reguladora de pressão em atividades que envolvem mudanças de pressão na operação.

Essas válvulas são classificadas de acordo com o tipo de conexão, com o tamanho e a faixa de operação. Podem assumir várias posições, entre totalmente fechadas a totalmente abertas.

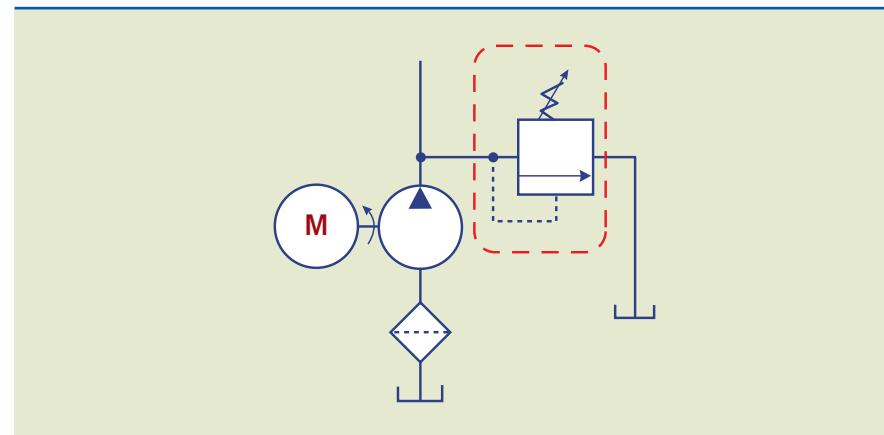
De acordo com suas funções, temos válvulas:

- De segurança.
- De sequência.
- De descarga.
- Redutoras de pressão.
- De frenagem.
- De contrabalanço.

#### Válvula limitadora de pressão, ou de segurança

Não é interessante que a pressão no sistema atinja valores superiores à pressão de trabalho. Para que essa pressão possa ser controlada, utiliza-se uma válvula de pressão normalmente fechada, conectada à pressão do sistema e ao tanque (figura 4.31). Esta é regulada para um nível predeterminado de pressão. Quando a pressão atinge valores superiores a essa pressão, o fluxo de fluido é desviado para o tanque. Esse tipo de controle é conhecido como válvula limitadora de pressão ou válvula de alívio do sistema ou, ainda, válvula de segurança.

**Figura 4.31**  
Representação esquemática de uma parte de um circuito contendo uma válvula de segurança.



Outras funções das válvulas reguladoras de pressão normal fechada:

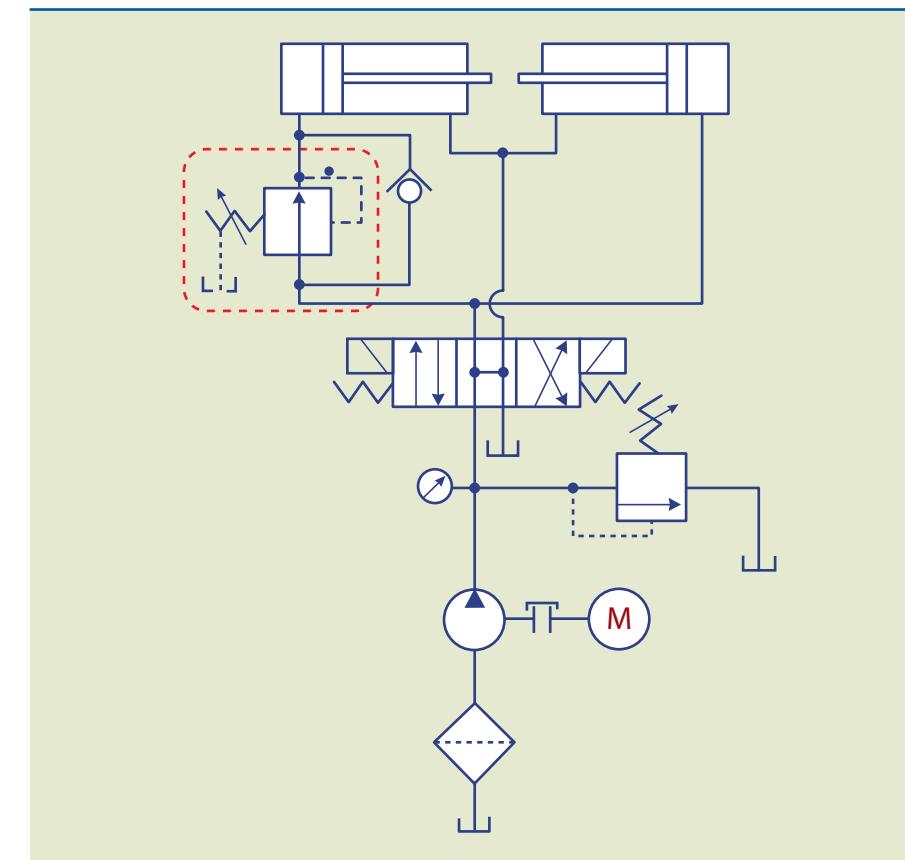
- Fazer com que uma operação ocorra antes de outra, para obedecer a uma ordem sequencial.
- Contrabalançar forças mecânicas externas que atuam no sistema.

#### Válvula de sequência

É a válvula de controle de pressão normalmente fechada (figura 4.32), que faz com que uma operação ocorra antes da outra.

#### Exemplo:

Em um circuito com operações de fixação de peças e posterior usinagem, o cilindro da morsa deve avançar antes do cilindro da broca. Nesse caso, uma válvula de sequência é posicionada antes do atuador da broca. A mola na válvula de sequência não permitirá que o carretel interligue as vias primárias e secundárias antes que a pressão atinja valores maiores que a pressão calibrada na mola da válvula. Dessa forma, o fluxo para o cilindro da broca é bloqueado e o cilindro da morsa avançará primeiro. No momento que o cilindro entra em contato com a peça, a pressão é aumentada a fim de vencer a resistência. Esse aumento de pressão desloca o carretel na válvula de sequência; assim, o fluxo vai para o cilindro da broca, executando a furação.



**Figura 4.32**  
Representação esquemática de um circuito contendo uma válvula de sequência.

#### Válvula de contrabalanço

Para equilibrar ou contrabalançar um peso, pode-se usar uma válvula de controle de pressão normalmente fechada (figura 4.33).

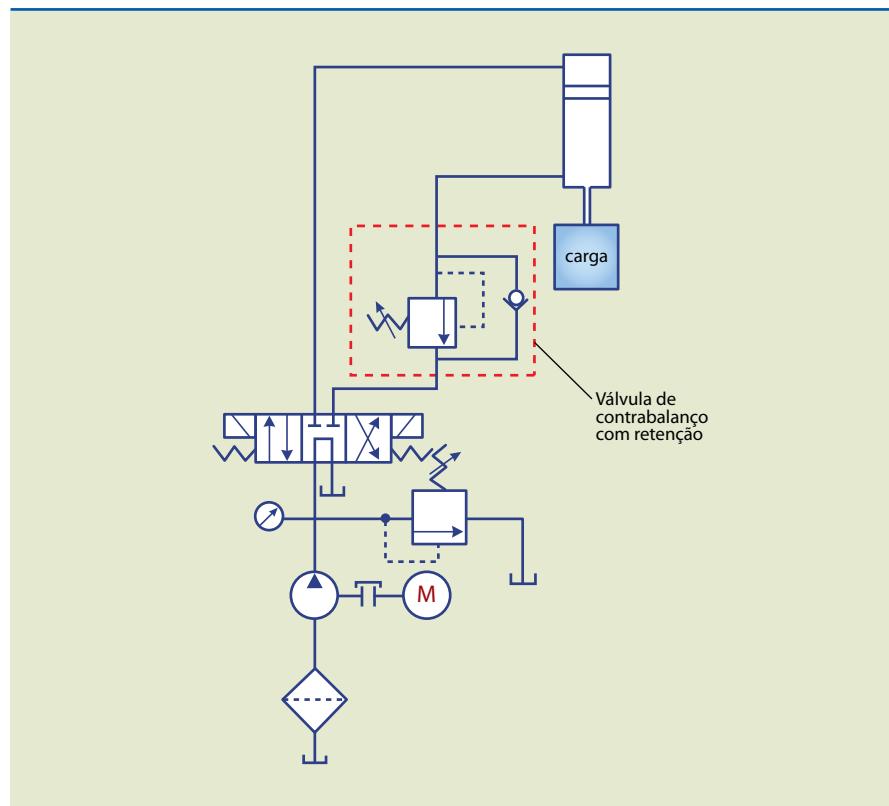
Utilizamos como exemplo típico o circuito hidráulico de uma prensa.

Quando a válvula direcional envia o fluxo para avançar o atuador, o peso fixado à haste descerá de forma incontrolável, pois o fluxo da bomba não é suficiente para manter a carga na posição elevada. Neste caso, ocorre a necessidade de se instalar uma válvula de pressão normalmente fechada abaixo do cilindro da prensa. Assim, o carretel da válvula não conectará as via principal e a secundária até que a pressão seja maior do que a pressão desenvolvida pelo peso, ou seja, até que a pressão do fluido atue no lado traseiro do pistão.

Dessa forma, o peso é contrabalanceado em todo sentido descendente.

**Figura 4.33**

Exemplo de circuito contendo uma válvula de contrabalanço com retenção.

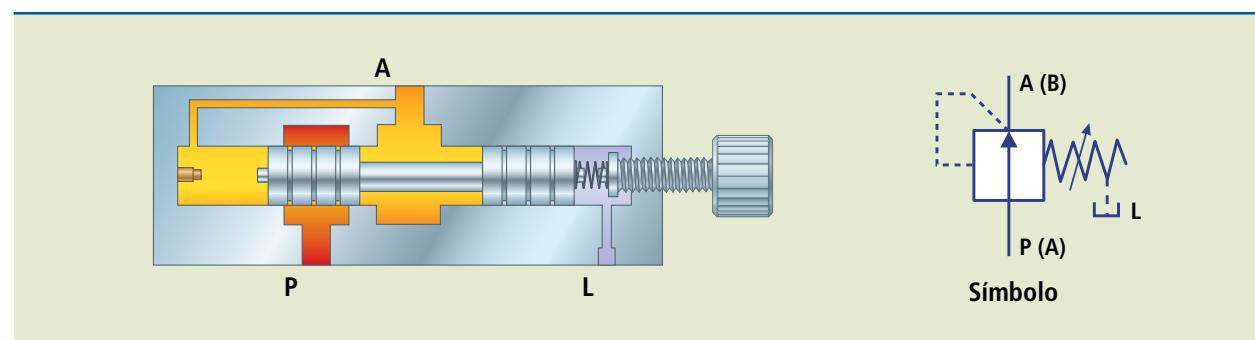


**Figura 4.34**

Representação esquemática e simbologia de uma válvula normalmente aberta.

#### Válvula de pressão normalmente aberta

Uma válvula normalmente aberta (figura 4.34) tem a via primária e a secundária interligadas, e a pressão na base do carretel é transmitida pela via secundária.



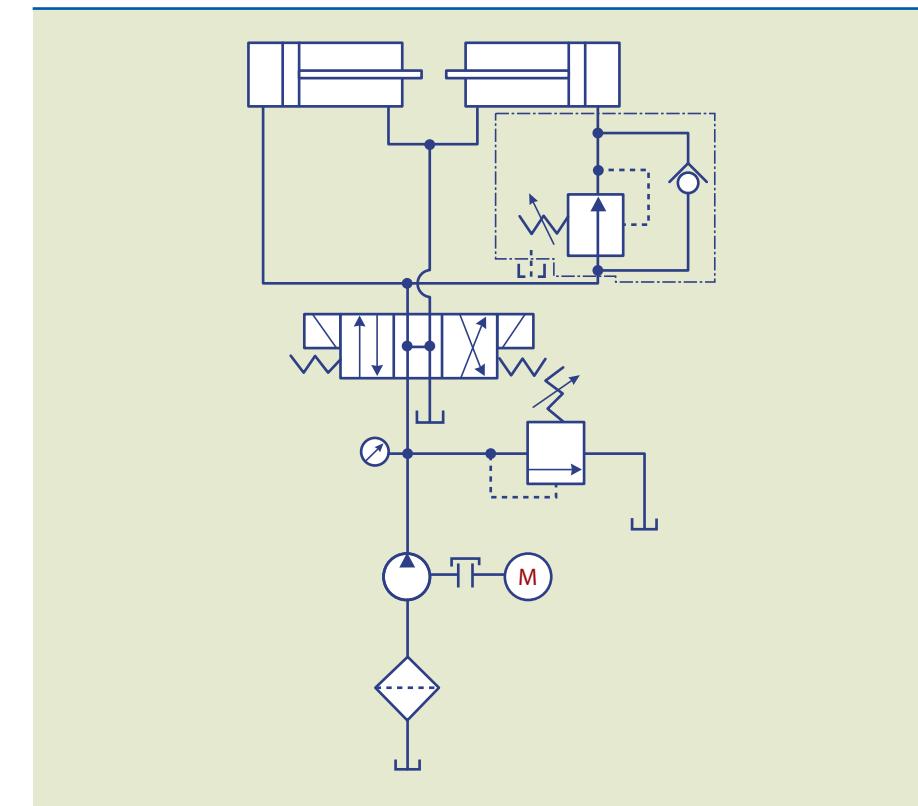
#### Válvula redutora de pressão no circuito

É uma válvula de controle de pressão normalmente aberta que opera sentindo a pressão do fluido depois de sua passagem através da válvula. A pressão atingida é igual à pré-ajustada na válvula, de modo que o carretel que atua fechando ou abrindo as vias das válvulas fique parcialmente fechado, restringindo o fluxo. Entretanto, toda restrição em fluidos hidráulicos é transformada em calor. Esse é um dos motivos pelo qual o fluido e alguns elementos hidráulicos se aquecem. Se a pressão cai depois da válvula, o carretel se abre e permite que a pressão aumente de novo.

É usada quando se quer a aplicação de uma força de menor intensidade. Ver como exemplo o circuito da figura 4.35. No circuito, o atuador da direita deve aplicar uma força menor do que o atuador da esquerda. Uma válvula redutora de pressão colocada logo em seguida ao atuador da direita permite que o fluxo vá para o atuador até que a pressão atinja a da regulagem da válvula. Nesse momento, o carretel da válvula éacionado, causando uma restrição na referida linha do circuito e o excesso de pressão, depois da válvula, é transformado em calor. Assim, o atuador trabalha com a pressão reduzida.

**Figura 4.35**

Representação esquemática de um circuito contendo uma válvula redutora de pressão no circuito.



#### Válvulas de controle direcional

Essas válvulas contam com um corpo com vias internas que são abertas e bloqueadas momentaneamente por uma parte móvel. Nas válvulas direcionais, como na maior parte das válvulas hidráulicas industriais, o carretel é responsável pela abertura e fechamento dessas vias. Por esse motivo, as válvulas de carretel

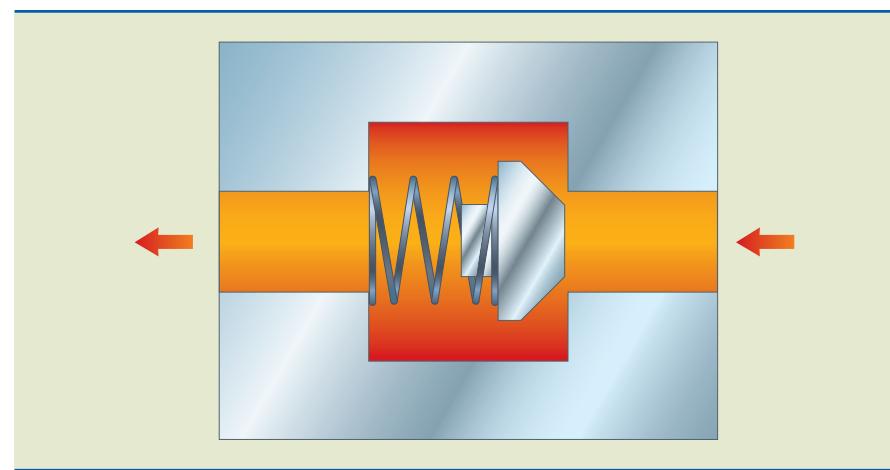
são as válvulas direcionais mais usadas em hidráulica industrial, pois são de fácil construção.

#### Válvula de retenção

Restringe a passagem do fluido em um sentido (figuras 4.36 e 4.37).

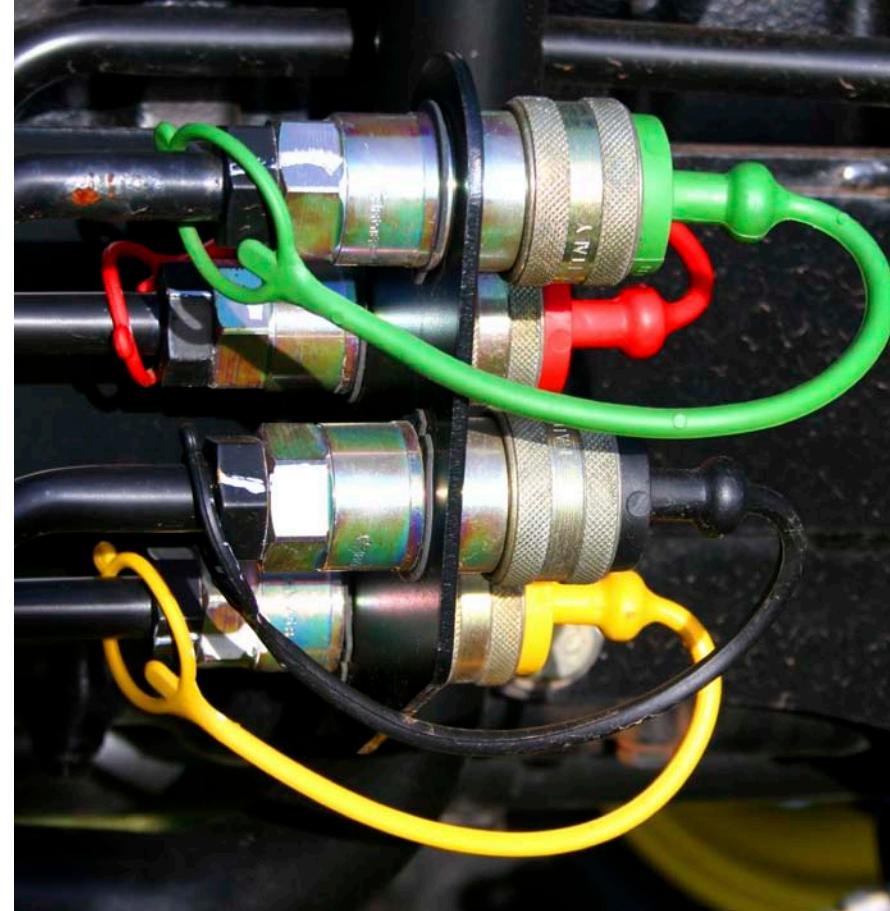
**Figura 4.36**

Esquema representativo de uma válvula de retenção.



**Figura 4.37**

Válvula de retenção.

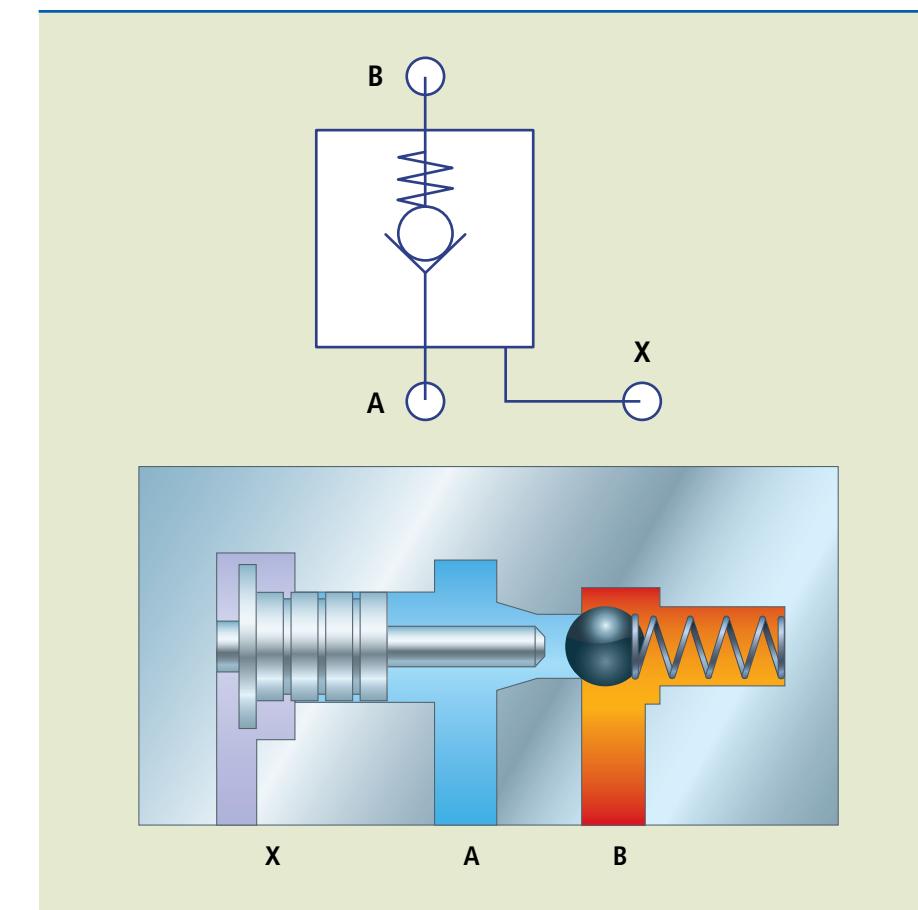


#### Válvula de retenção pilotada

Se a pressão de entrada for maior que a pressão de saída, a válvula de retenção abre. Caso contrário, ela fecha. Além disso, a válvula de retenção pode ser aberta através de uma linha de controle, permitindo fluxo em ambos os sentidos (figura 4.38).

**Figura 4.38**

Esquema representativo de uma válvula de retenção pilotada.

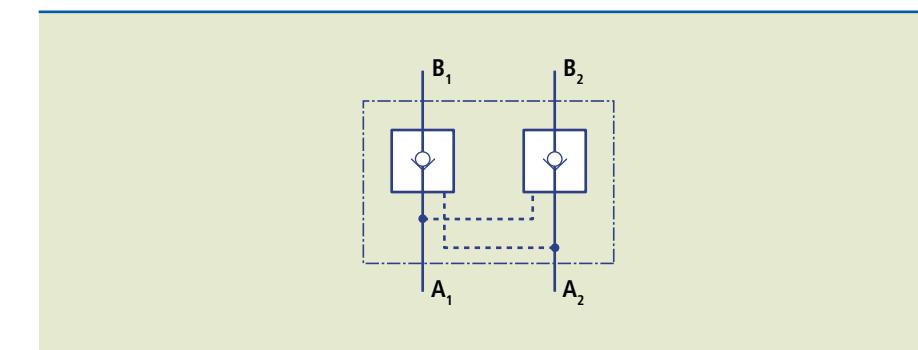


#### Válvula de retenção dupla

Esta válvula (figuras 4.39, 4.40 e 4.41) é composta por duas válvulas de retenção, construídas e montadas em uma única carcaça, operadas por piloto.

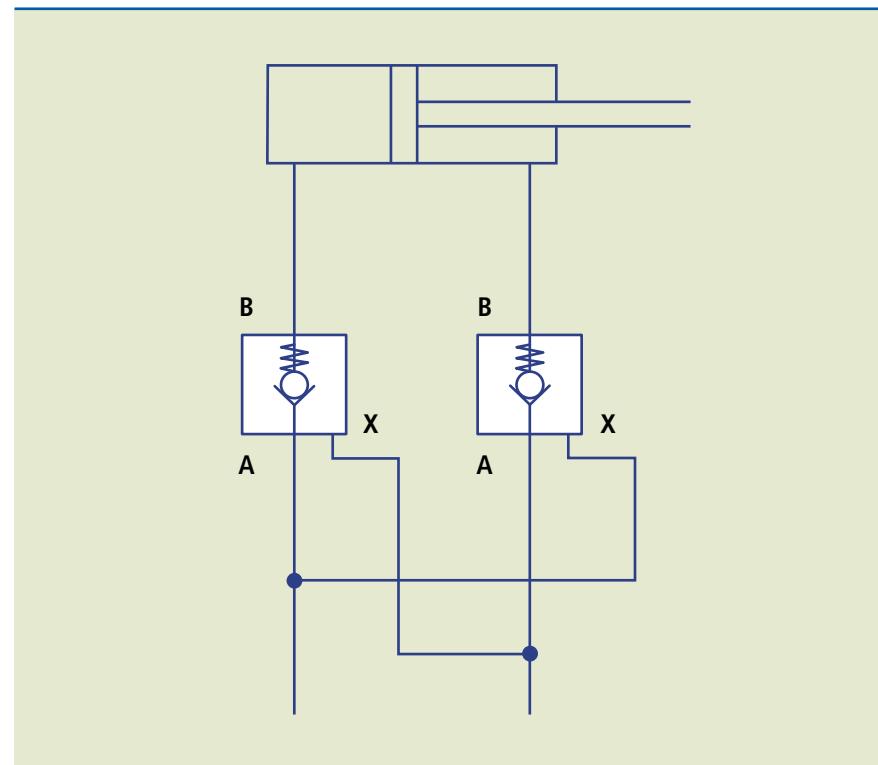
**Figura 4.39**

Simbologia de representação de uma válvula de retenção dupla.

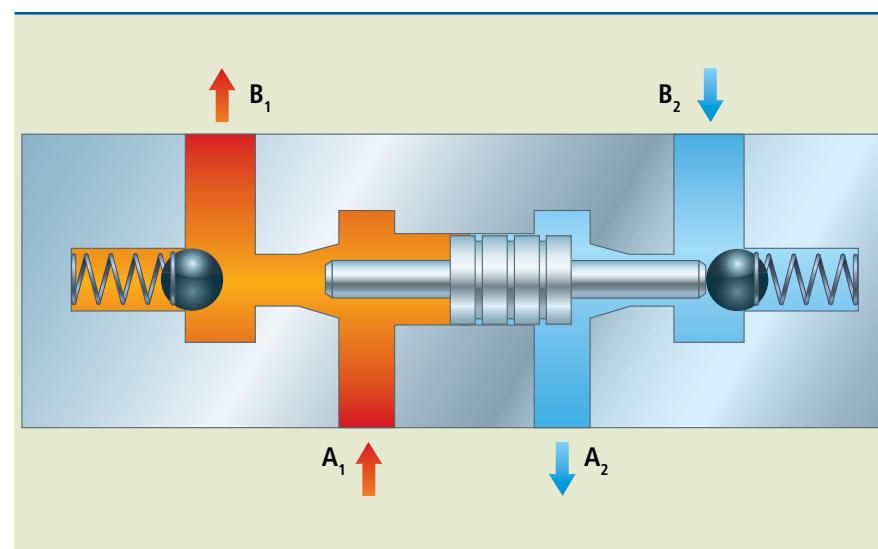


**Figura 4.40**

Representação esquemática de parte de um circuito que utiliza uma válvula de retenção dupla.

**Figura 4.41**

Esquema ilustrativo de uma válvula de retenção dupla.



#### 4.6.7 Identificação de válvula de controle direcional

As válvulas de controle direcional são representadas com símbolos gráficos (figura 4.42). Para identificação da simbologia, devemos considerar:

- Número de posições.
- Número de vias.
- Posição normal.
- Tipo de acionamento.

Símbolo de Válvulas Direcionais	Norma DIN/ISO 1219
	Número de posições da válvula
	A quantidade de traços indica o número de vias
	Setas indicam a direção (sentido) do fluxo do óleo Ts representam bloqueios dos fluxos

**Figura 4.42**

Simbologia para as válvulas direcionais.

#### Número de posições

As válvulas são representadas por quadrados que indicam o número de posições ou manobras distintas que elas podem assumir. Uma válvula de controle direcional possui no mínimo dois quadrados, ou seja, realiza no mínimo duas manobras.

#### Número de vias

Esse valor corresponde ao número de conexões úteis que uma válvula pode ter (figura 4.43).

Podemos encontrar vias de passagem, vias de bloqueio ou a combinação de ambas. Para fácil compreensão do número de vias de uma válvula de controle direcional, podemos considerar apenas a identificação de um quadrado.

#### Posição normal

A posição da válvula se divide em normal fechada e em normal aberta (figuras 4.43 e 4.44). Para determinar essa posição, deve ser levado em consideração o quadrado à direita da válvula.

**Figura 4.43**

Simbologia para posições e conexões das válvulas de controle direcional.

Posições e conexões		
	2/2	2 vias por 2 posições normalmente aberta
	2/2	2 vias por 2 posições normalmente fechada
	3/2	3 vias por 2 posições normalmente fechada
	3/2	3 vias por 2 posições normalmente aberta
	4/2	4 vias por 2 posições

**Figura 4.44**

Simbologia para posições e conexões das válvulas de controle direcional.

Posições e conexões		
	5/2	5 vias por 2 posições
	4/3	4 vias por 3 posições centro fechado
	4/3	4 vias por 3 posições centro aberto para tanque
	4/3	4 vias por 3 posições centro tandem
	5/3	5 vias por 3 posições centro fechado

A tabela 4.1 indica como devem ser relacionadas as conexões das válvulas direcionais segundo a norma DIN/ISO 1219.

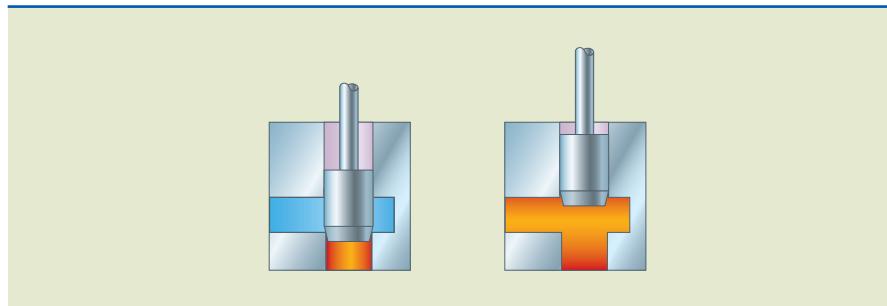
Identificação das conexões	
Conexão	DIN/ISO 1219
Pressão	P
Exaustão	R (3/2 vias)
Exaustão	R, S (5/2 vias)
Sinal de saída	B,A

#### Acionamento de válvulas direcionais

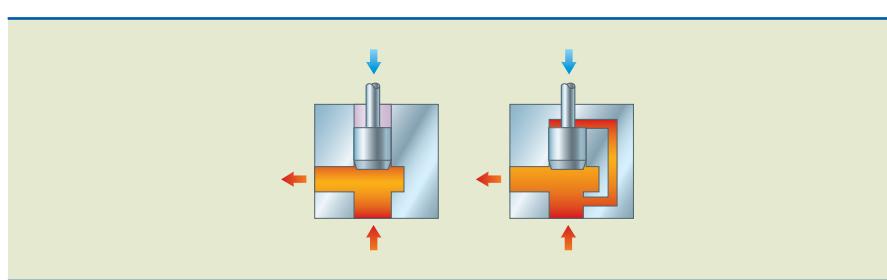
A movimentação do carretel é capaz de desobstruir passagens, interligando câmaras no interior das válvulas e permitindo o escoamento do fluido no sentido desejado. Como exemplo de movimentação dos carretéis, ver as figuras 4.45, 4.46 e 4.47.

**Tabela 4.1**

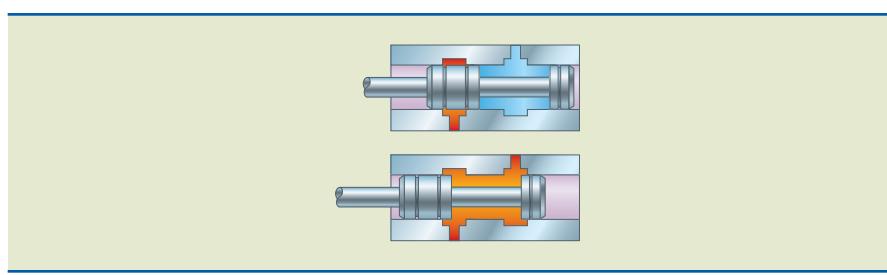
Indicação das conexões segundo a norma DIN/ISO 1219

**Figura 4.45**

Exemplo 1 de movimentação do carretel.

**Figura 4.46**

Exemplo 2 de movimentação do carretel.

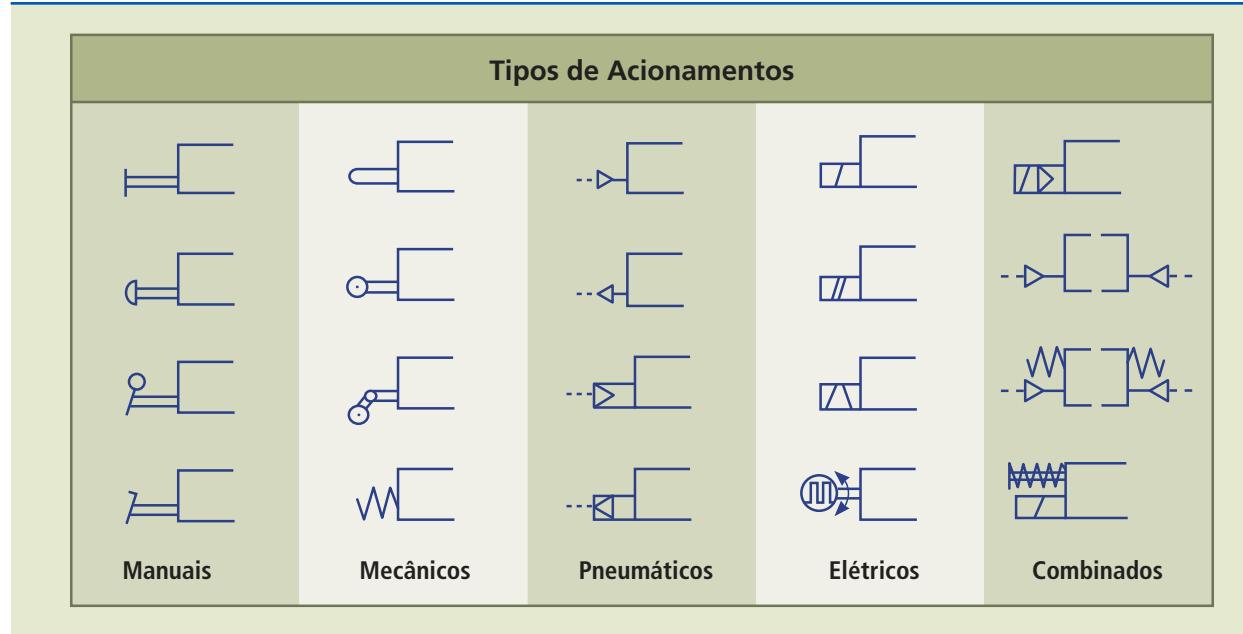
**Figura 4.47**

Exemplo 3 de movimentação do carretel.

**Figura 4.48**

Simbologia para indicação dos acionamentos nos esquemas hidráulicos.

A movimentação do carretel das válvulas pode ser realizada utilizando esforço manual (esforço físico de um operador) ou, ainda, acionadores mecânicos, pneumáticos, elétricos ou combinados. A simbologia para indicação dos acionamentos nos esquemas hidráulicos é representada na figura 4.48.

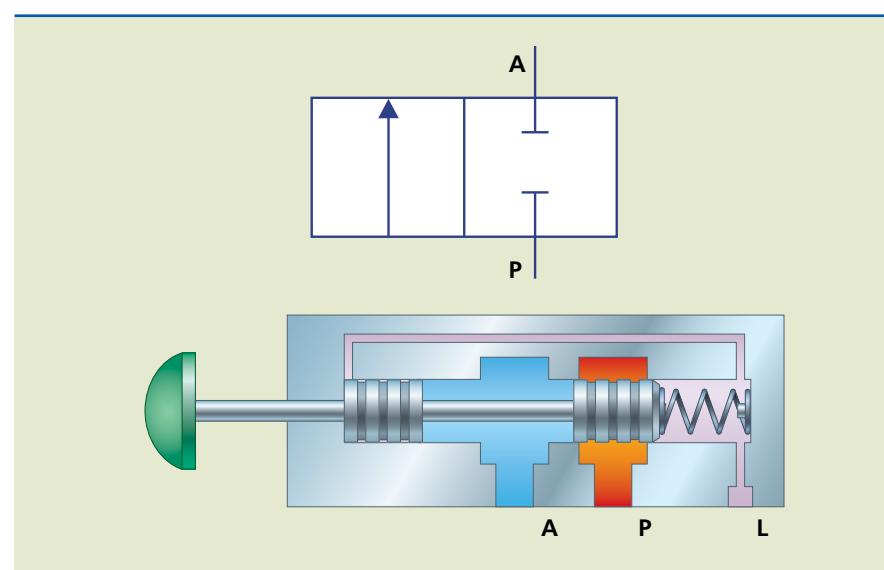
**Válvula direcional de duas posições por duas vias**

Esse tipo de válvula direcional consiste em duas passagens conectadas e desconectadas de acordo com a posição do carretel.

Uma válvula de duas vias executa uma função liga-desliga que pode ser usada em muitos sistemas, como trava de segurança e para isolar ou conectar várias partes do sistema (figura 4.49).

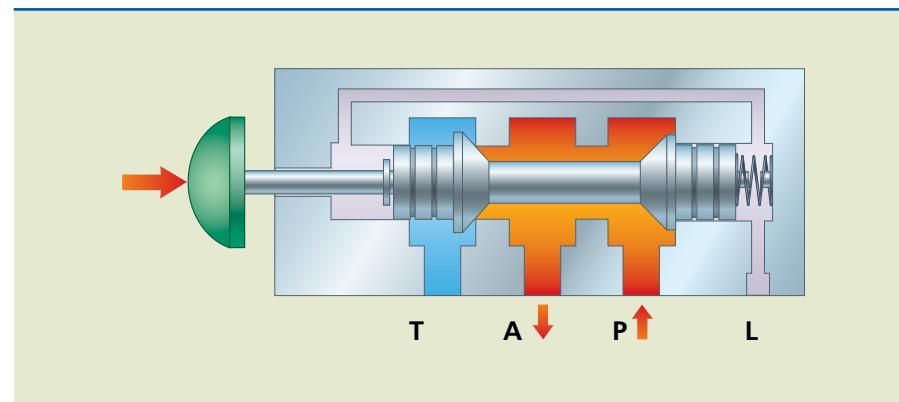
**Figura 4.49**

Válvula direcional de duas posições por duas vias.

**Válvula direcional de duas posições por três vias**

Esse tipo de válvula possui três passagens dentro de um corpo de válvula (figura 4.50):

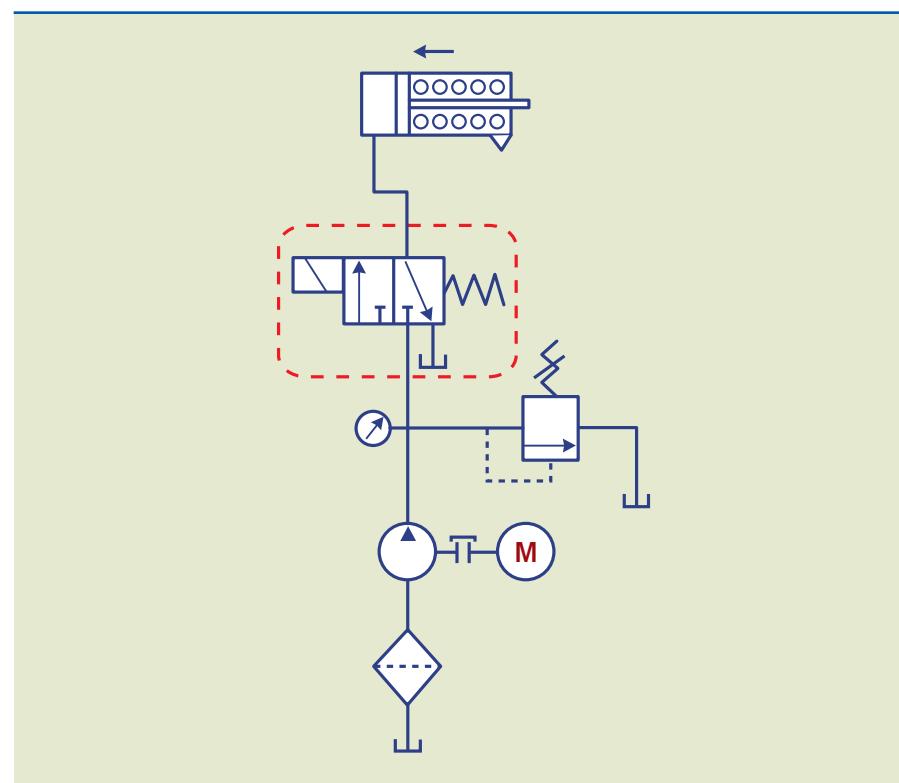
- Via de pressão.
- Via de tanque.
- Via de utilização.



**Figura 4.50**  
Válvula direcional de duas posições por três vias.

A função da válvula direcional de duas posições por três vias é pressurizar e esvaziar alternadamente um orifício do atuador. É usada para operar atuadores de simples ação, como cilindros com retorno por mola (figura 4.51). Em geral, não são encontradas em aplicações hidráulicas industriais.

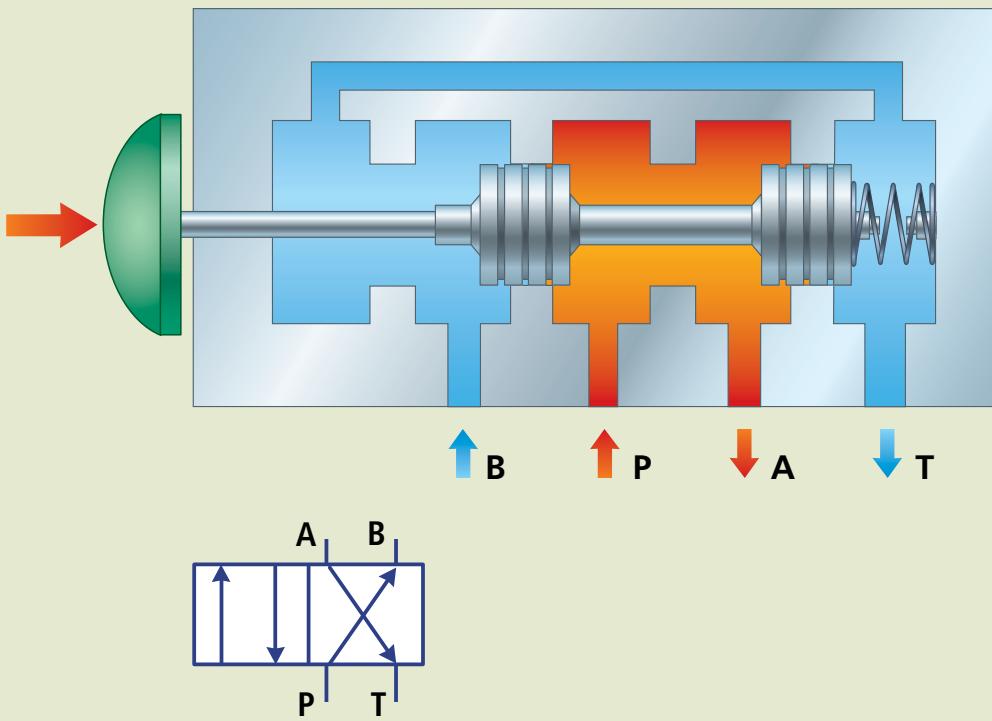
**Figura 4.51**  
Círculo hidráulico  
contendo uma válvula  
direcional de duas  
posições e três vias.



### Válvula direcional de duas posições por quatro vias

**Figura 4.52**

Válvula direcional de duas posições por quatro vias.

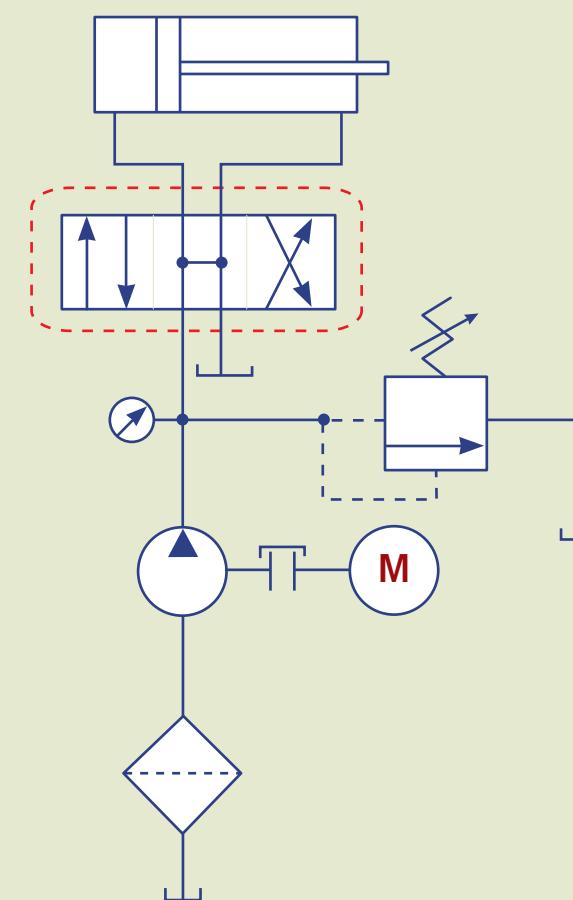


### Válvula direcional de três posições por quatro vias

As válvulas pneumáticas são providas de carretel interno que pode parar em posições intermediárias, e, por esse motivo, são usadas com frequência na indústria móvel. Já as válvulas hidráulicas industriais de quatro vias são de três posições, sendo duas extremas e uma posição central. As posições extremas estão relacionadas ao movimento e à direção que o atuador executa, e a posição do centro da válvula deve atender a necessidade do sistema. É por esse motivo que válvulas com vários tipos de centro são fabricadas. As mais conhecidas são: centro aberto, centro fechado, tandem, centro aberto negativo e centro aberto positivo. Algumas estão representadas nas figuras 4.53, 4.54, 4.55, 4.56.

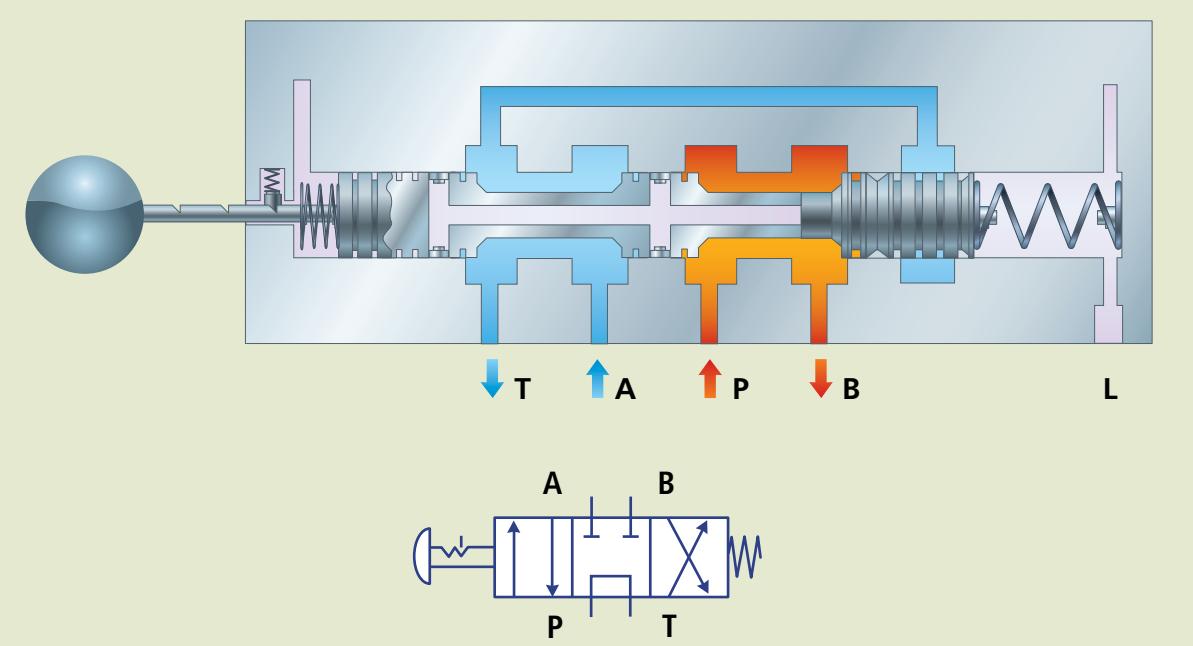
**Figura 4.53**

Círculo contendo uma válvula de três posições e quatro vias com centro aberto.



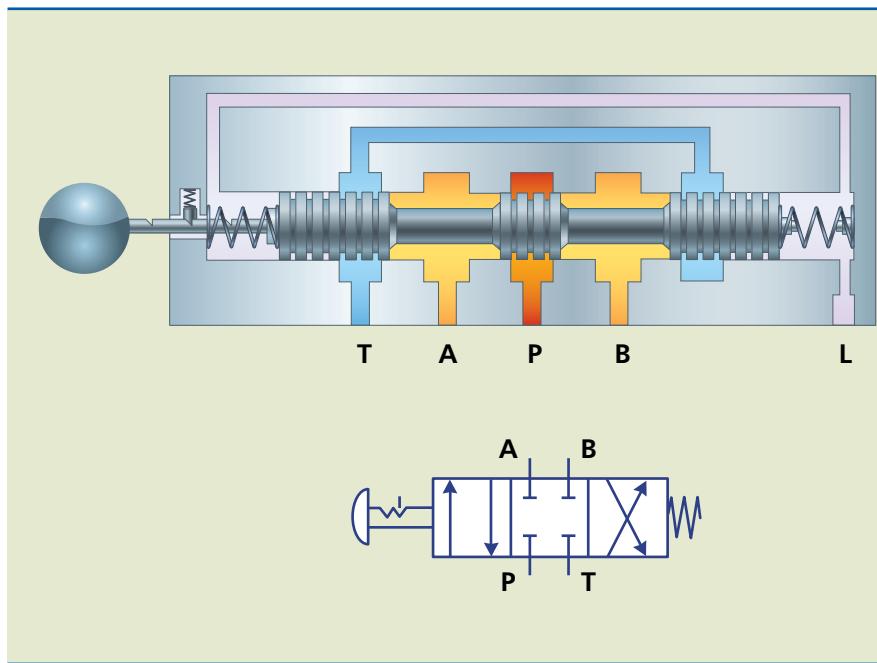
**Figura 4.54**

Válvula de três posições e quatro vias com centro despressurizado (tandem).

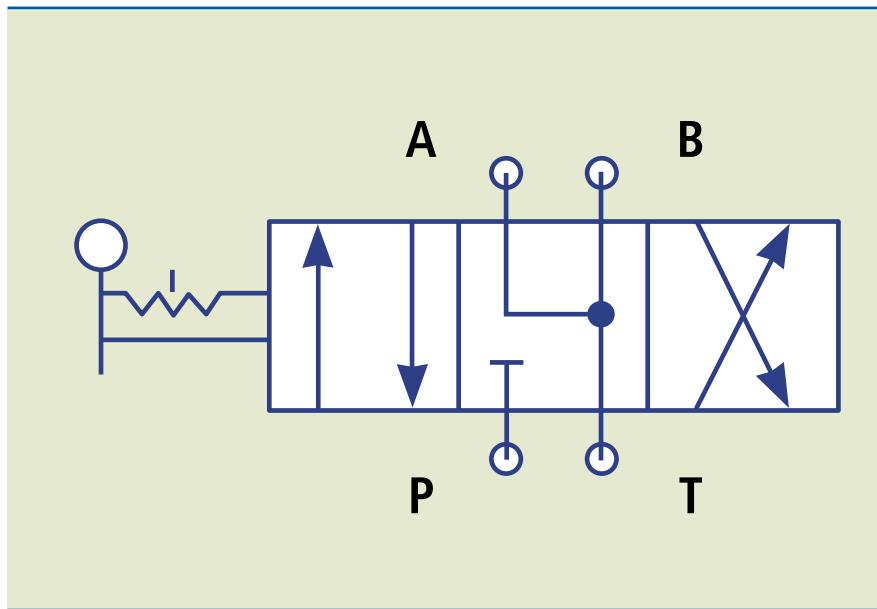


**Figura 4.55**

Válvula de três posições e quatro vias com centro fechado.

**Figura 4.56**

Válvula de três posições e quatro vias com A e B com retorno para tanque.



#### 4.6.8 Acumuladores hidráulicos

##### Funções dos acumuladores

São funções básicas dos acumuladores (figuras 4.57, 4.58 e 4.59):

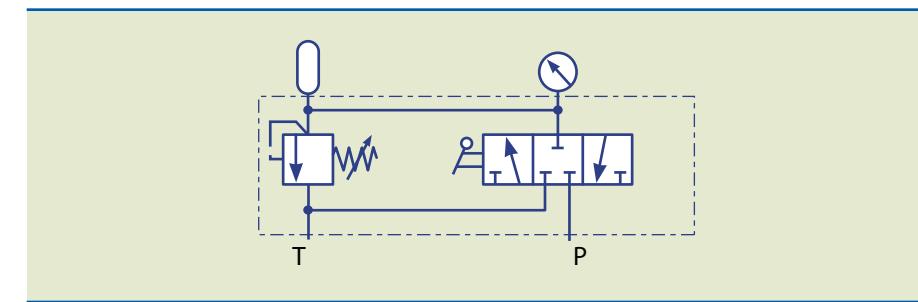
- Armazenamento de energia.
- Operação de emergência.
- Atenuação de golpes de pressão.
- Manutenção de pressão constante.
- Compensação de vazão.

**Figura 4.57**

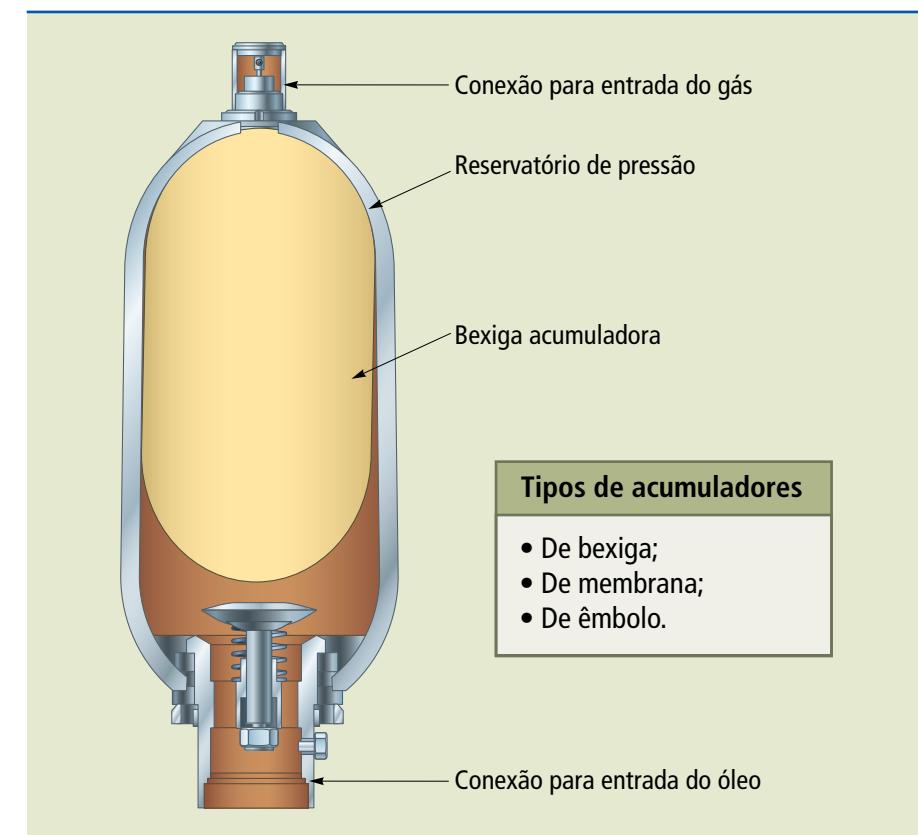
Acumulador hidráulico.

**Figura 4.58**

Símbolo do acumulador.

**Figura 4.59**

Esquema ilustrativo de um acumulador hidráulico e seus vários tipos.



### 4.6.9 Símbologia hidráulica

**Figura 4.60**

Símbologia hidráulica (1).

	Linha de pressão
	Linha piloto
	Linha de dreno
	Linha de contorno. Delimita um conjunto de funções em um único corpo
	Conector
	Linha flexível
	União de linhas
	Linhas cruzadas não conectadas
	Direção de fluxo
	Reservatório aberto à atmosfera
	Linha terminando abaixo do nível de fluido
	Linha terminando acima do nível de fluido

A símbologia utilizada em hidráulica pode ser vista nas figuras 4.60 a 4.64.

**Figura 4.61**

Símbologia hidráulica (2).

	Linha sob carga
	Plugue ou conexão bloqueados
	Restrição fixa
	Restrição variável
	Bomba simples, deslocamento fixo
	Bomba simples, deslocamento variável
	Bomba reversível, dois sentidos de fluxo
	Motor oscilante
	Cilindro de simples ação com retração por mola
	Cilindro de ação simples com avanço por mola
	Cilindro de dupla ação

**Figura 4.62**

Símbologia hidráulica (3).

	Acumulador por gás com membrana
	Acumulador por gás com pistão
	Filtro
	Aquecedor na linha
	Regulador de temperatura sem representação das linhas de fluxo do meio refrigerante
	Regulador de temperatura (as setas indicam que o calor pode ser introduzido ou dissipado)
	Intensificador de pressão
	Pressostato
	Válvula de retenção sem mola
	Válvula de retenção com mola
	Válvula de retenção pilotada para abrir
	Válvula de retenção pilotada para fechar
	Válvula de retenção dupla ou geminada
	Válvula agulha

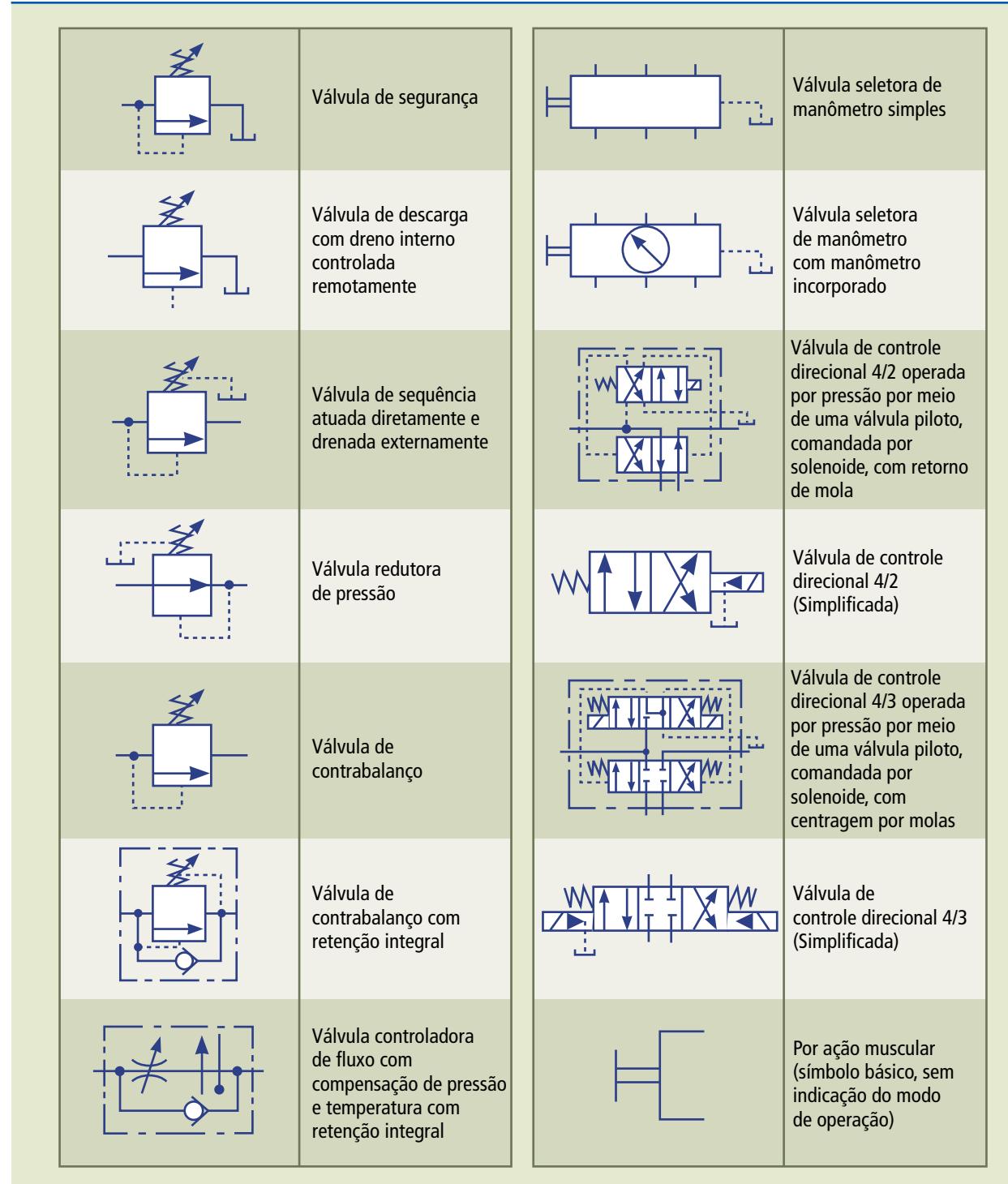
**Figura 4.63**

Símbologia hidráulica (4).

	Componente básico de válvula
	Válvula de passagem única, normalmente fechada
	Válvula de passagem única, normalmente aberta
	Duas conexões bloqueadas
	Dois direções de fluxo
	Dois direções de fluxo interligados
	Uma direção de fluxo em tandem e dois bloqueios
	Válvula desaceleradora normalmente aberta
	Quatro conexões bloqueadas
	Passagem de fluxo bloqueada na posição central
	Válvula direcional duas posições, três vias
	Válvula direcional duas posições, quatro vias
	Válvula direcional três posições, quatro vias (centro aberto)
	Válvula de posicionamento infinito (indicado por barras horizontais de centro fechado)

**Figura 4.64**

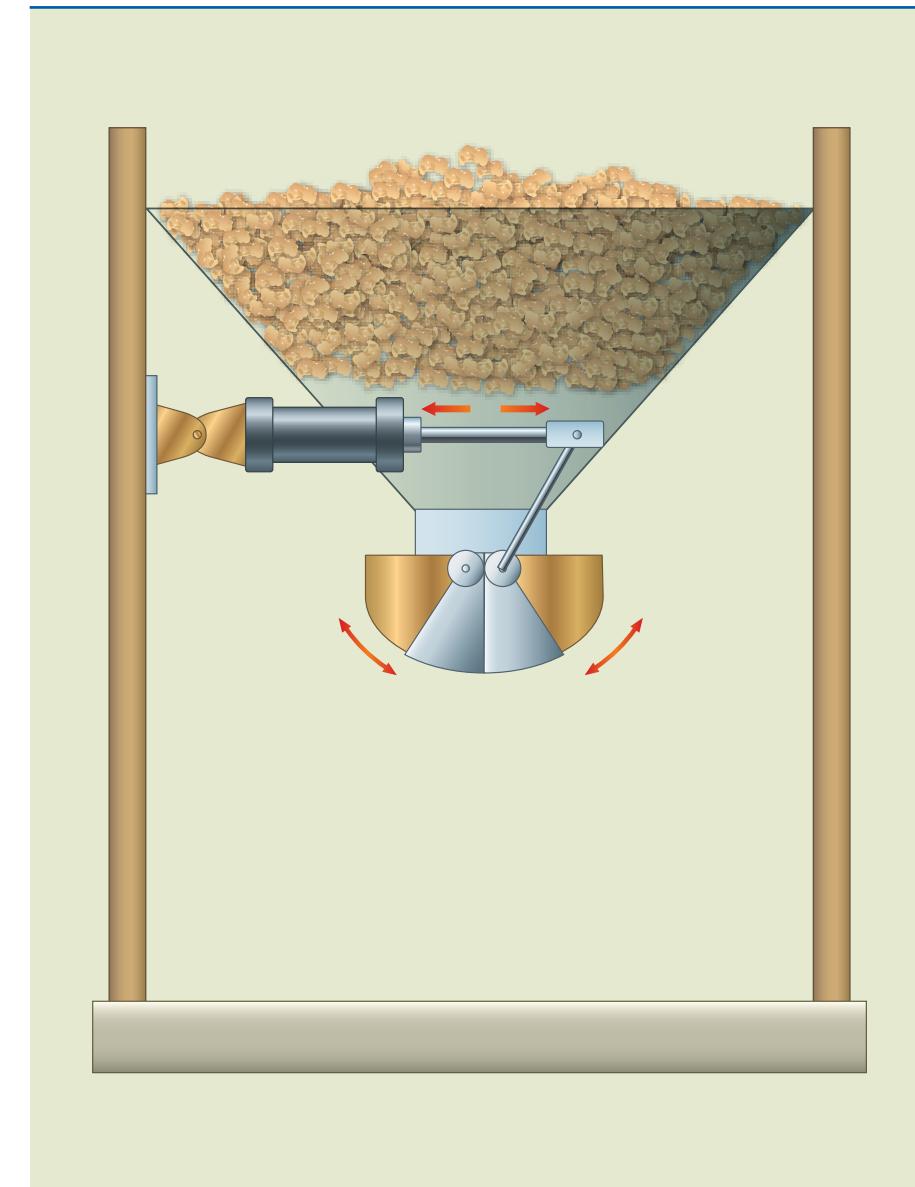
Símbologia hidráulica (5).



## 4.7 Circuitos hidráulicos práticos

### Exercícios de treinamento FESTO

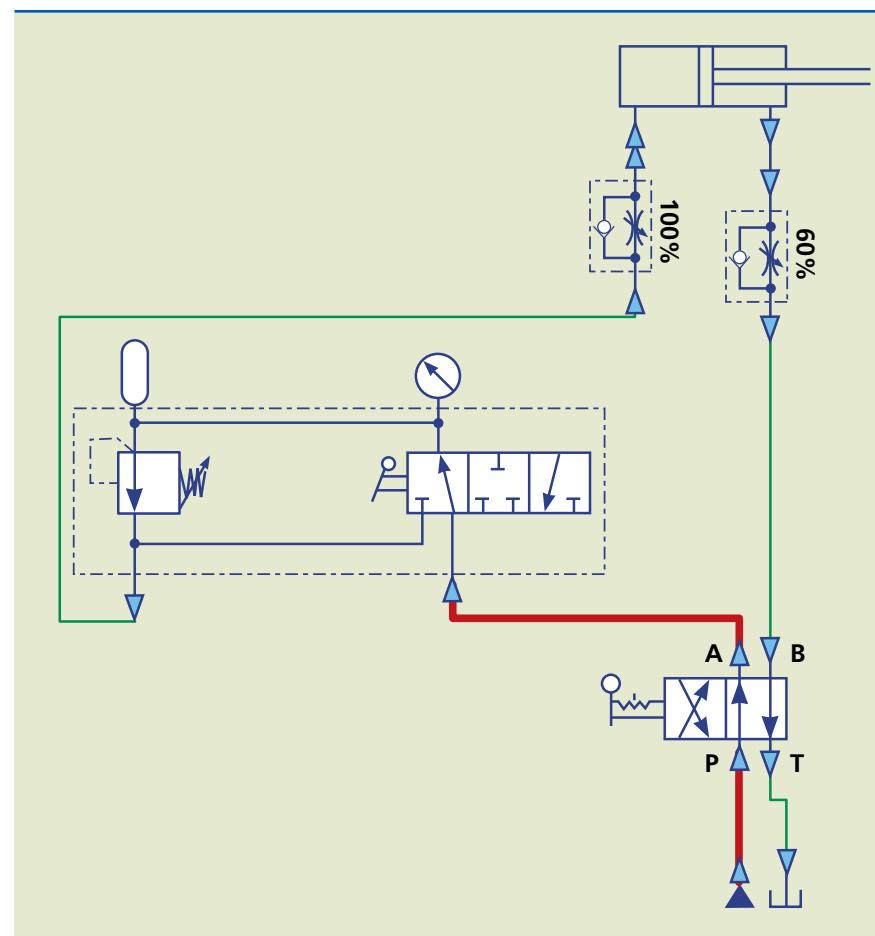
1. Uma indústria de rações realiza a dosagem em suas embalagens através de um silo controlado por atuador hidráulico de dupla ação. O acionamento do dispositivo de abertura é feito com o recuo do atuador, comandado pelo acionamento de um botão. Ao chegar ao início de curso, o atuador permanece nessa posição por 5 segundos, após o qual avança novamente, fechando o silo. Elaborar o circuito hidráulico de trabalho para esse dispositivo (ver figura 4.65).

**Figura 4.65**

Sistema para dosagem de embalagens.

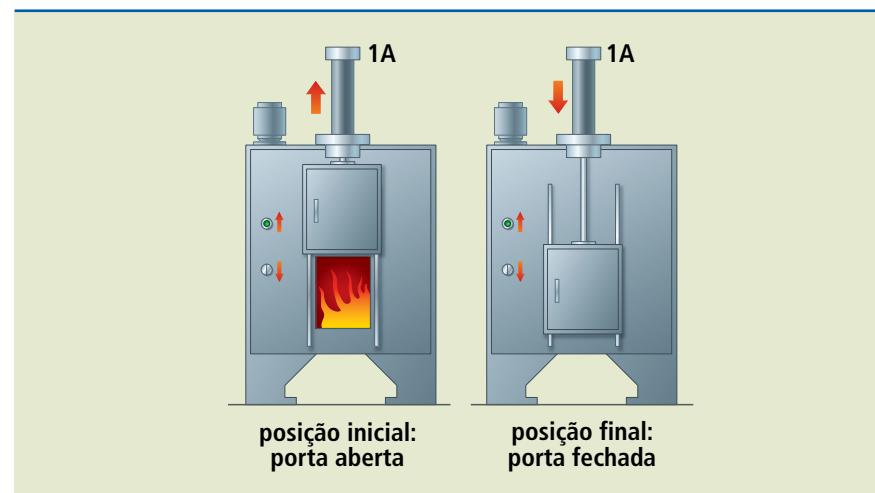
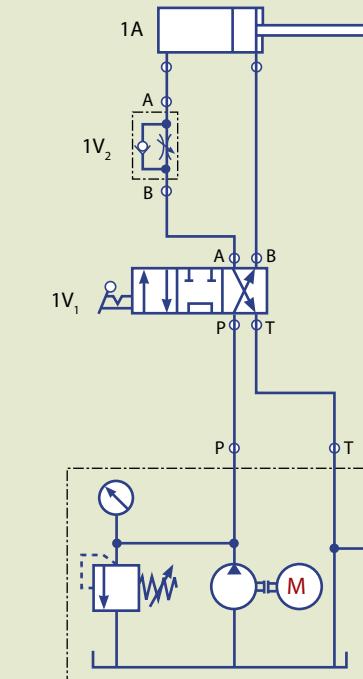
*Solução:*

**Figura 4.66**  
Círculo hidráulico  
(solução).



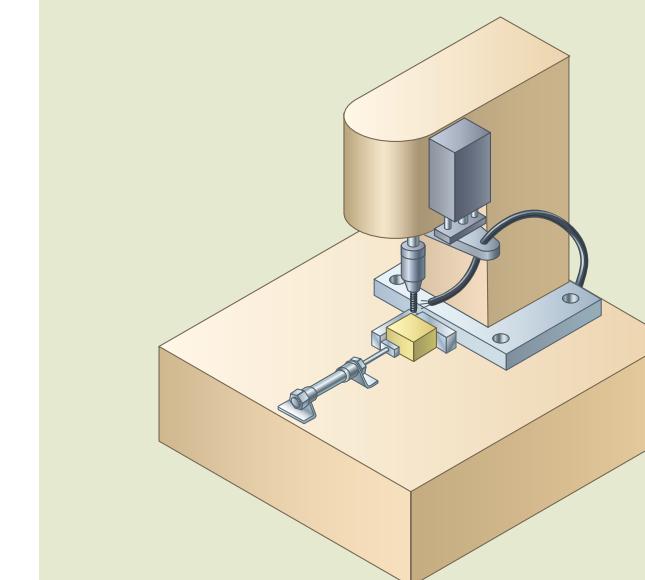
2. Um dispositivo controla a abertura e o fechamento de uma porta de forno, utilizando um cilindro hidráulico de dupla ação. Desenvolver um circuito hidráulico para comandar o fechamento e a abertura total ou parcial da porta (ver figura 4.67).

**Figura 4.67**  
Dispositivo de abertura e fechamento de uma porta de forno.

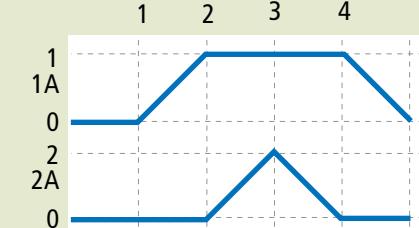
*Solução:*

3. Uma furadeira (figura 4.69) funciona com a utilização de dois pistões hidráulicos de dupla ação, o primeiro fixa a peça a ser furada, e o segundo avança empurrando a broca de furação assim que a peça esteja totalmente fixada. Elaborar um circuito hidráulico, utilizando a resolução com válvulas de sequência.

**Figura 4.68**  
Círculo hidráulico  
(solução).



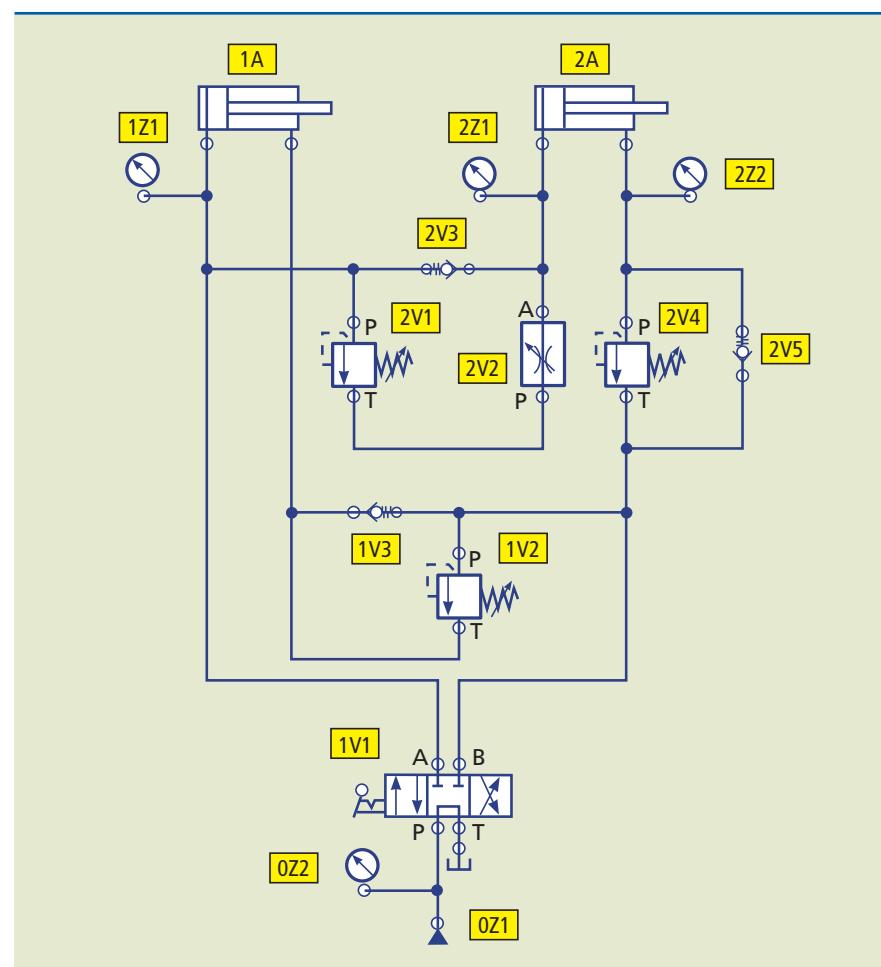
**Diagrama Trajeto Passo**



*Solução:*

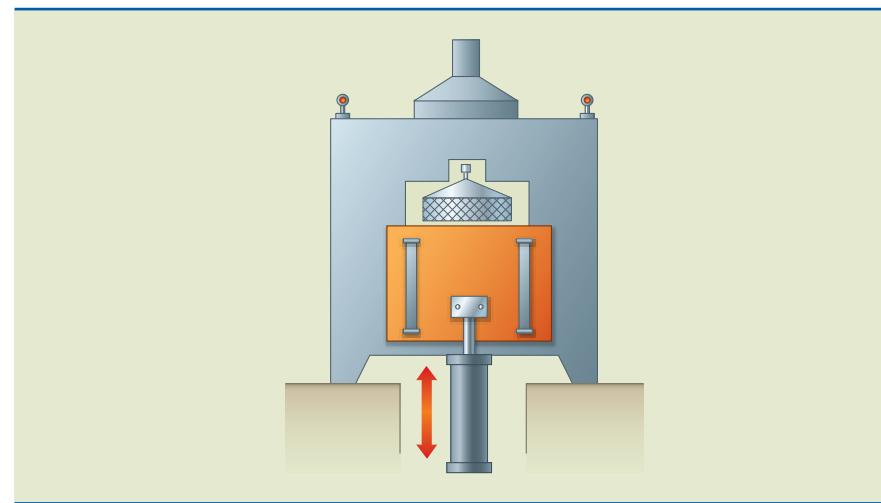
## **Figura 4.70**

Círculo hidráulico  
(solução).



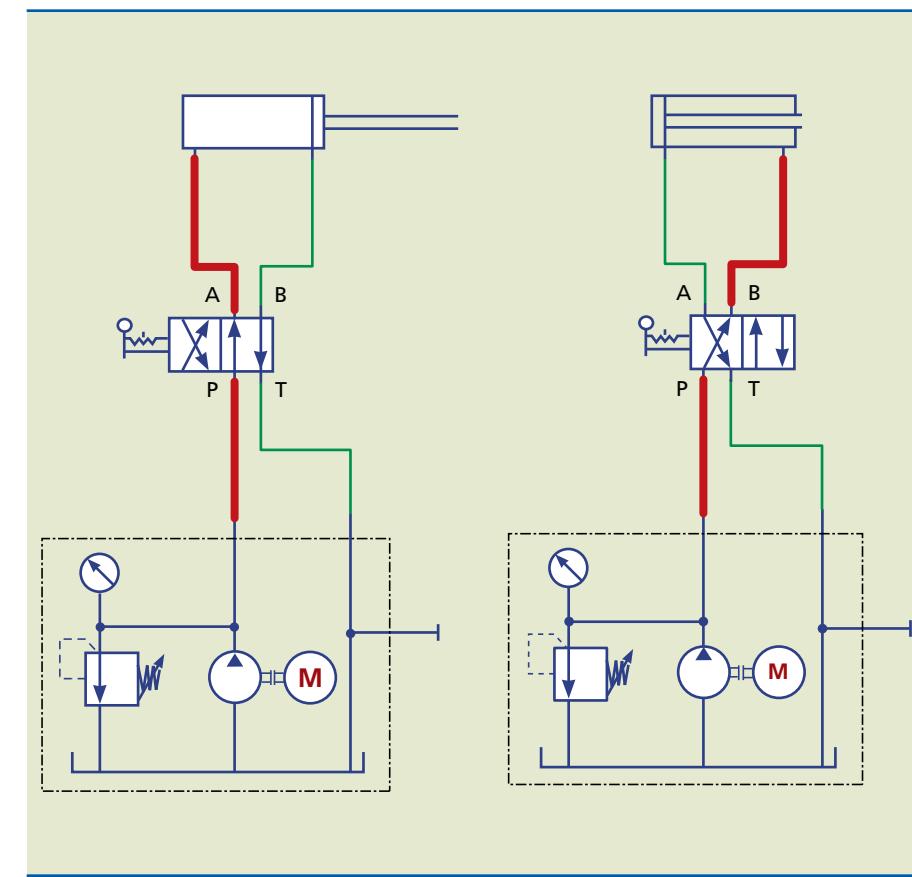
4. Para abrir e fechar a porta de um forno de tratamento térmico (figura 4.71) utiliza-se um cilindro de dupla ação. Este deverá ser controlado por uma válvula direcional. No desacionamento, promove-se retorno e, no acionamento, o avanço

## Figura 4.71



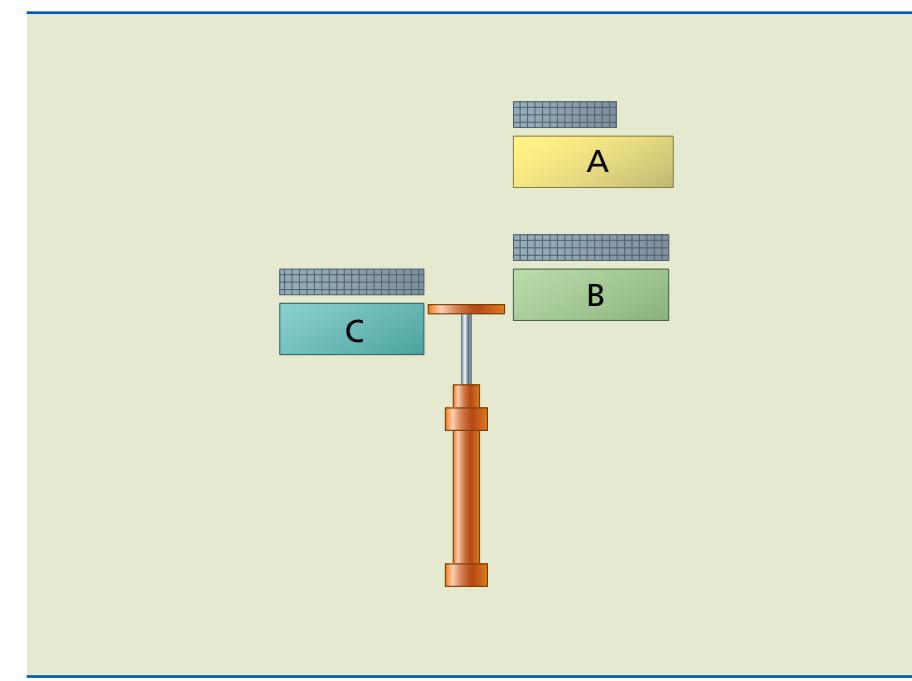
## Figura 4.72

### Círculo hidráulico (solução).

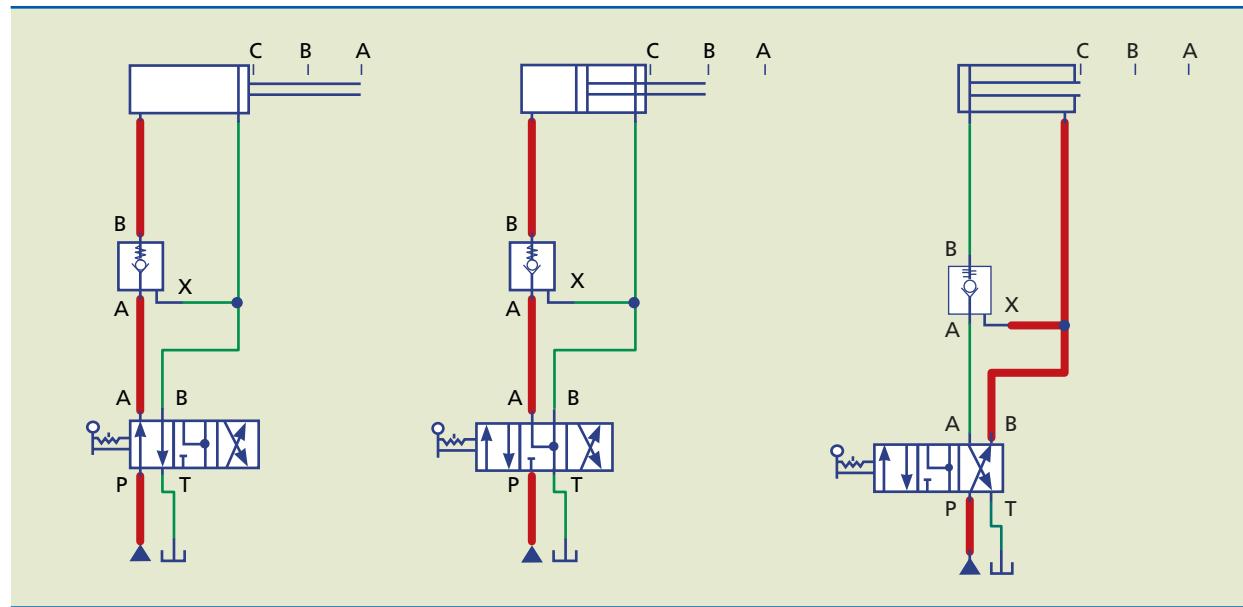


**5.** Um elevador de carga (figura 4.73) deverá transportar volumes de grande peso da linha de produção da plataforma A, para o estoque B ou C. Durante a retirada do material, a plataforma deve ficar hidráulicamente fixada.

## Figura 4.73



*Solução:*



**Figura 4.74**

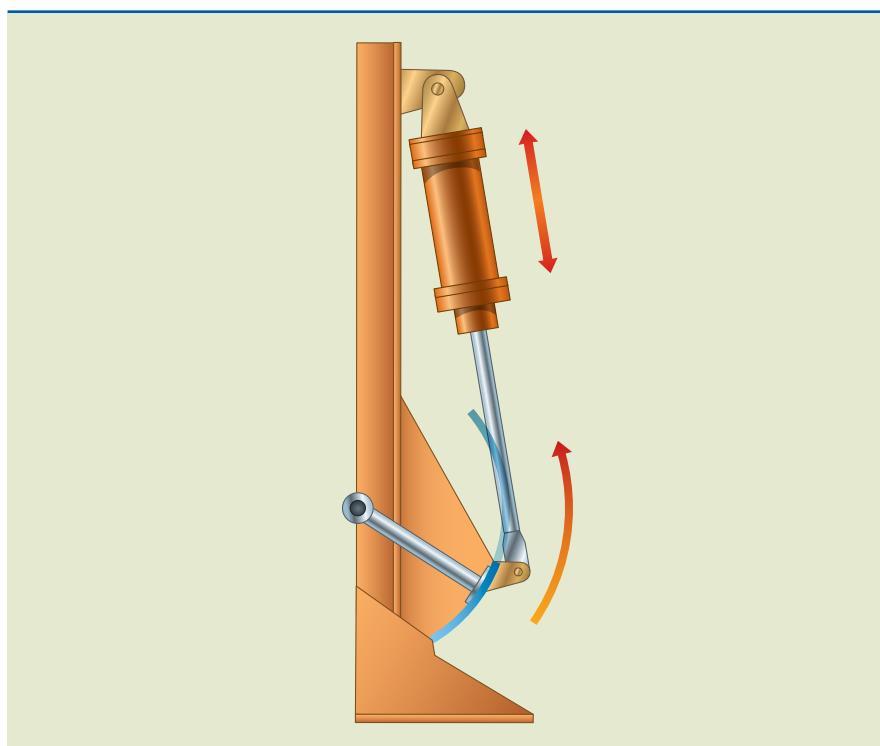
Círculo hidráulico  
(solução).

6. Em um forno de tratamento térmico (figura 4.75), o movimento de abertura e fechamento da porta é realizado por meio de um cilindro hidráulico de dupla ação.

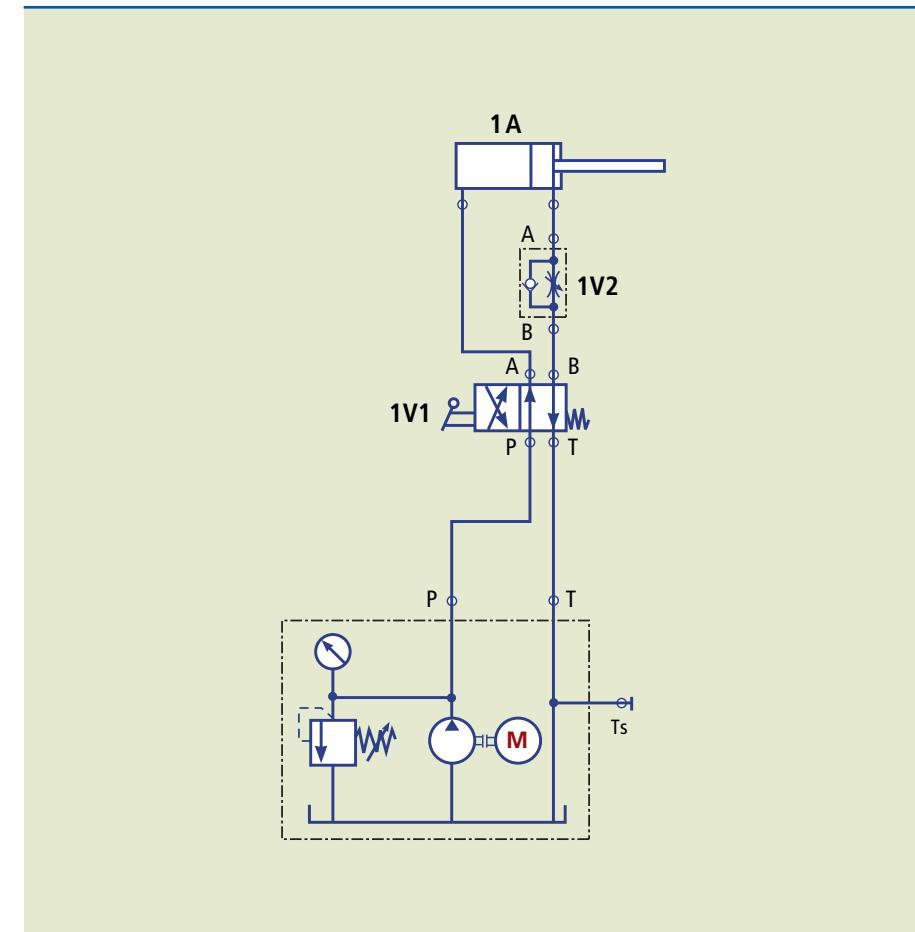
A abertura da porta (com o recuo do pistão) deve ser em velocidade normal, e o fechamento deve ser executado lentamente, de forma a não promover impacto durante o processo.

**Figura 4.75**

Porta de forno.



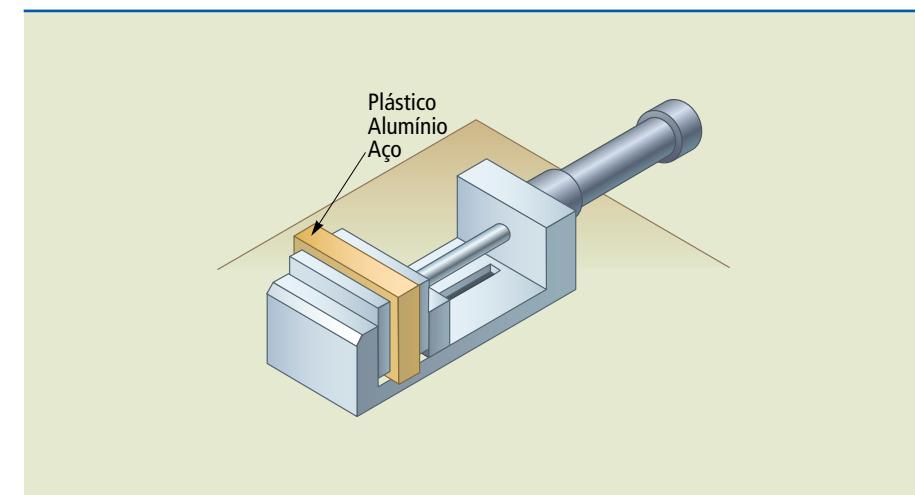
*Solução:*



**Figura 4.76**

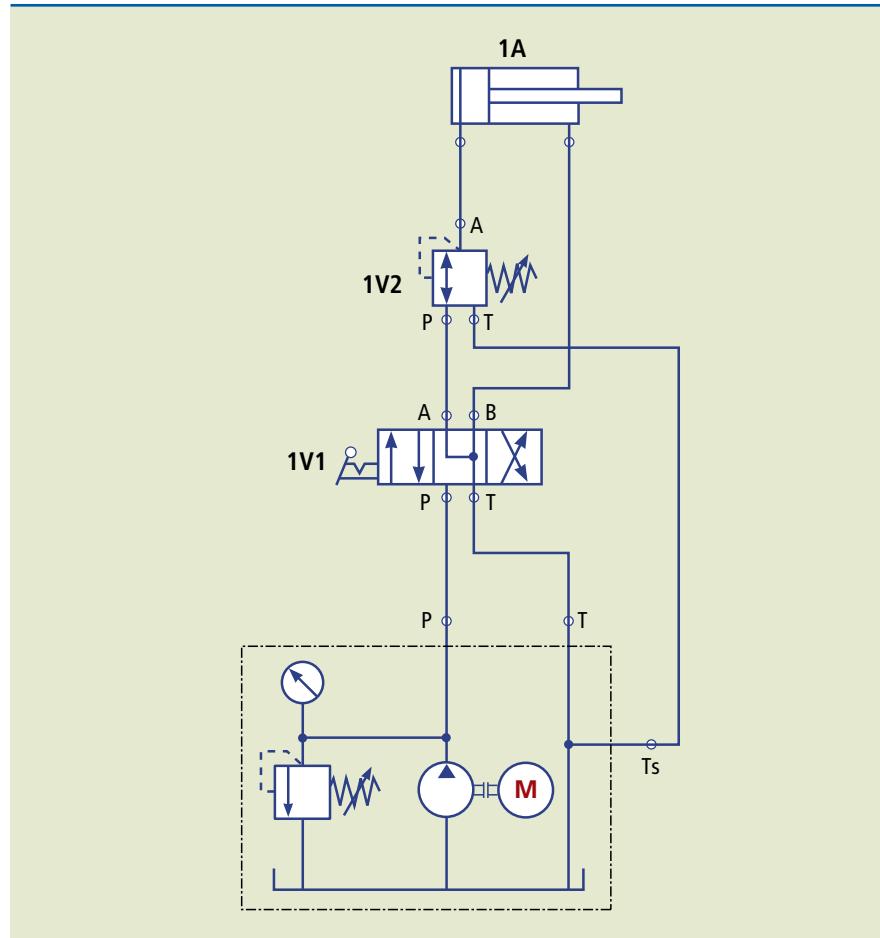
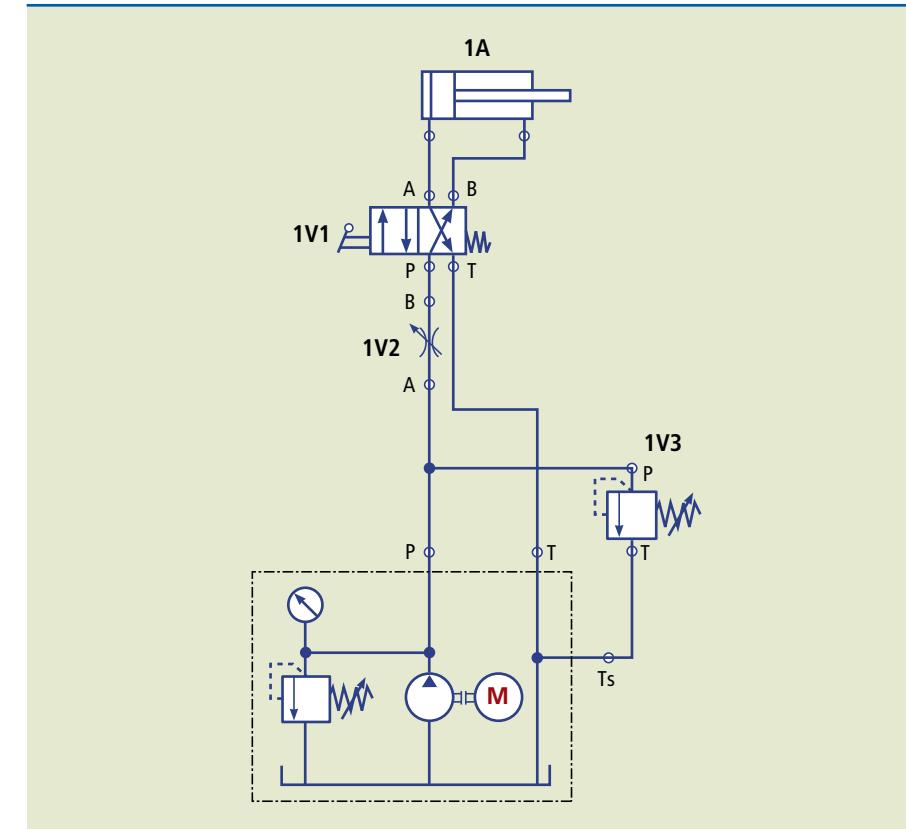
Círculo hidráulico  
(solução).

7. Uma morsa (figura 4.77) é utilizada para fixar peças de diferentes materiais. Essas peças deverão ser furadas e retrabalhadas com alargadores. Como a morsa vai prender vários tipos de materiais com durezas diferenciadas, a pressão de fixação deverá ser regulada em função do material da peça.



**Figura 4.77**

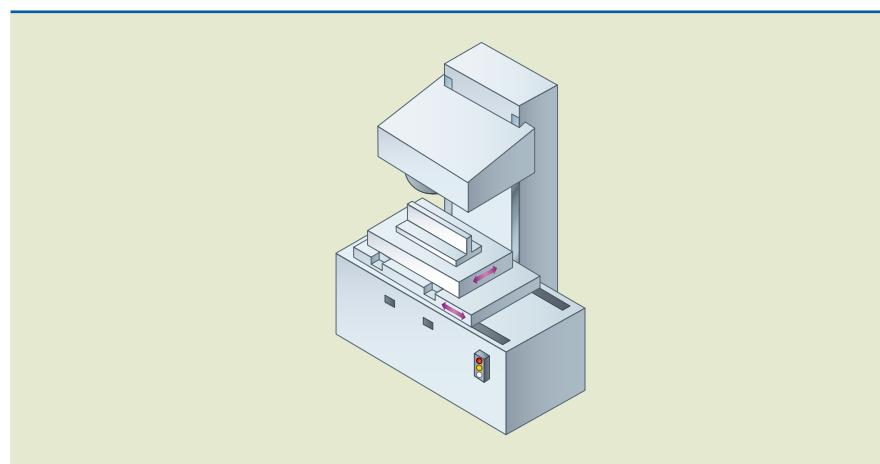
Morsa.

*Solução:***Figura 4.78**Círculo hidráulico  
(solução).*Solução:***Figura 4.80**Círculo hidráulico  
(solução).

- 8.** Uma máquina usada para retificar (figura 4.79) tem o movimento da mesa realizado por um cilindro hidráulico. Durante o processo, não pode existir alteração de velocidade de movimento da mesa, o que pode acontecer em função da resistência ao corte inerente do processo no momento da usinagem. Por esse motivo, as velocidades de avanço e retorno deverão ser compensadas quanto à pressão.

**Figura 4.79**

Retífica.



# **Capítulo 5**

## **Pneumática**

---



**A**pneumática, além de se ocupar da dinâmica e dos fenômenos físicos relacionados com os gases e com o vácuo, é a responsável pela conversão da energia “produzida” pelo ar em energia mecânica.

A pneumática é um sistema que funciona com ar comprimido e conta com tubulações e válvulas cuja função é transformar a pressão do fluido em força mecânica para transmitir movimento controlado.

Em razão da alta compressibilidade do ar, a pneumática é utilizada para transmitir movimento em equipamentos que necessitam de pequenos esforços na operação. O grego Ktesíbios fundou a Escola de Mecânicos, no século III a.C., em Alexandria, tornando-se o precursor da técnica de usar o ar comprimido para tocar um instrumento musical, o órgão. Tal invento, por falta de investimentos e material adequado, foi esquecido ao longo do tempo. A máquina a vapor, inventada na primeira Revolução Industrial por James Watt, deu início à produção industrial de inúmeros equipamentos pneumáticos que aumentam a cada dia.

Hoje as operações industriais são realizadas automaticamente. A aplicação de tecnologias como automação pneumática, hidráulica, informática, elétrica, eletrônica, mecatrônica, robótica está cada vez mais presente no ambiente industrial e no cotidiano do ser humano.

Podemos citar como aplicação de atuação da força pneumática a abertura e o fechamento de portas, máquinas pneumáticas de furar e de parafusar, freios, motores pneumáticos, injetoras de plástico, pequenas prensas de impacto, pistolas para pintura, a robótica na manufatura e outras aplicações.

Apesar de não possuir forma, podemos notar a presença do ar em todos os lugares na Terra. A composição principal do ar é constituída por 78% de nitrogênio, 21% de oxigênio e 1% de outros gases tais como argônio, neônio, hélio, hidrogênio, resíduos de dióxido de carbono etc.

A camada de ar atmosférico que envolve a Terra se mantém por efeito da ação da gravidade. Na hidráulica, o fluido nos circuitos é o óleo; na pneumática, o fluido usado é o ar. A seguir, alguns termos normalmente utilizados para indicar propriedades do ar.

**Compressibilidade** – É o fenômeno que ocorre quando um volume de ar fica submetido a um aumento de pressão, como em um pistão pneumático. Nesse caso, a compressão feita pelo êmbolo causa diminuição de volume.

**Expansibilidade** – O ar ocupa o espaço físico em que é colocado. Portanto, por causa de sua qualidade de expansão, seu volume é variável: se adapta a qualquer recipiente onde é colocado.

**Lei geral dos gases perfeitos** – É possível reduzir o volume de um gás, aplicando-lhe certa pressão. O estado de um gás é determinado por meio de três grandezas: pressão, volume e temperatura.

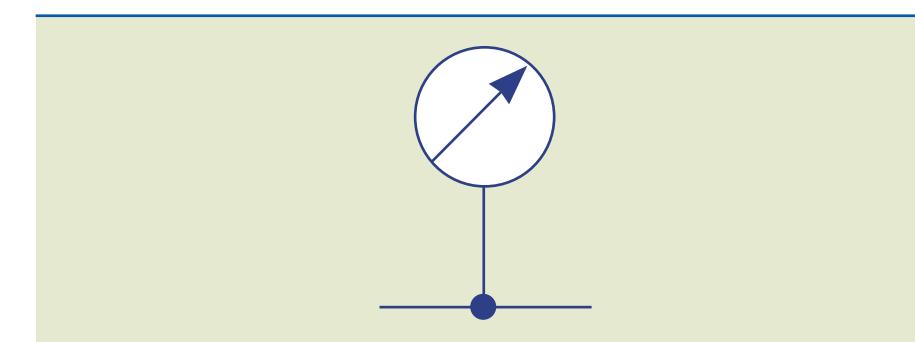
Quando se comprime um gás, eleva-se sua temperatura.

Ao contrário, quando o ar comprimido se expande, ao aliviarmos sua pressão, ocorre um forte resfriamento.

A equação geral do estado dos gases leva em conta a variação de temperatura, por causa do aumento ou diminuição da pressão com a compressão/descompressão. A equação de estado para os gases perfeitos foi vista no capítulo 3, seção 3.3, equação 3.5.

**Dispositivo de medição de pressão** – O valor da pressão é indicado por um manômetro, sendo mais usado o tipo “tubo de Bourdon” (aplicação semelhante à vista em hidráulica). A simbologia utilizada nos circuitos pneumáticos é mostrada na figura 5.1.

Para evitar que os manômetros sofram avarias por oscilações e choques abruptos de pressão, a pressão é conduzida até o manômetro por meio de um estrangulamento em sua conexão de entrada. Outra maneira bastante comum de gerar um amortecimento na pressão é pelo uso de um fluido para esse fim, geralmente, a glicerina.



**Figura 5.1**

Simbologia para indicação do manômetro.

Os sistemas pneumáticos possuem elementos que filtram e limpam o ar que será utilizado.

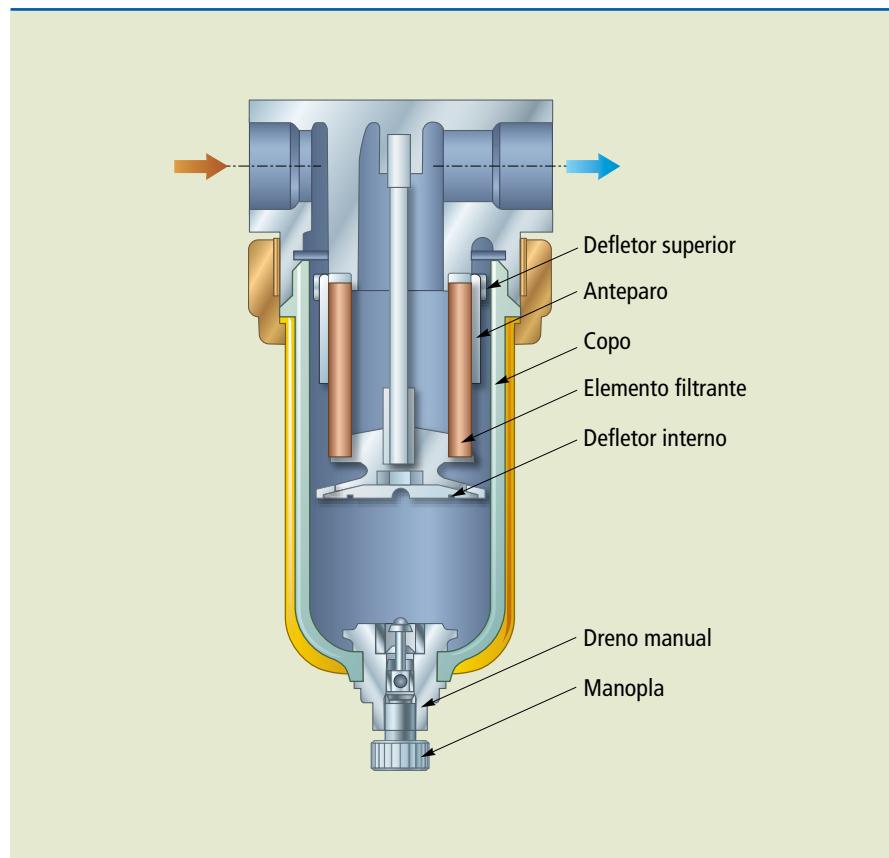
Na preparação do ar comprimido a ser utilizado no sistema, encontramos três elementos básicos: filtro, regulador de pressão e lubrificador.

As impurezas encontradas no ar são partículas de sujeira, poeiras ambientais, poeiras provenientes do processo produtivo, ferrugem, restos de óleo, umidade etc. Essas impurezas, em muitos casos, ocasionam falhas nas instalações e desgastes nos elementos pneumáticos.

## 5.1 Filtro de ar comprimido

O filtro tem função de reter as partículas de impureza bem como a água condensada presentes no ar (figura 5.2).

**Figura 5.2**  
Representação esquemática de um filtro para pneumática.



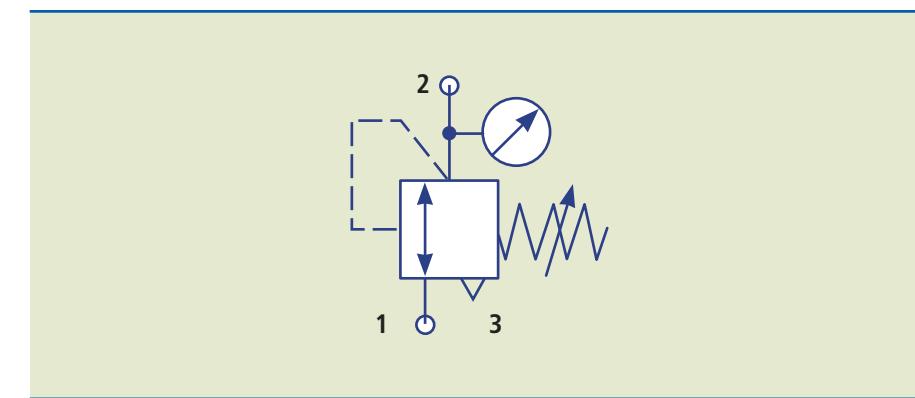
O ar comprimido, quando entra no copo do filtro, é forçado a movimentar-se por meio de canais que irão direcioná-lo, girando-o, e por meio de “rasgos direcionais”. Com isso, por meio da força centrífuga, separam-se as impurezas maiores, bem como as gotículas de água, que por ação gravitacional depositam-se no fundo do copo. O líquido acumulado no fundo do copo deve ser retirado quando atinge a marca do nível máximo. Se isso não ocorrer, o líquido será arrastado novamente pelo ar que passa. Para eliminar o líquido do fundo do copo, basta abrir o dreno no fundo dele.

Existem alguns filtros que possuem dreno automático.

Com o tempo, o acúmulo dessas partículas impede a passagem do ar; por isso, o elemento filtrante deve ser limpo ou substituído em intervalos regulares.

## 5.2 Regulador de pressão

A função do regulador de pressão ou válvula reguladora (figura 5.3) é manter a pressão de trabalho (pressão secundária), independentemente das flutuações da pressão da rede (pressão primária). Quando o consumo de ar aumenta, a pressão de trabalho cai e a mola abre a válvula.



**Figura 5.3**  
Simbologia representativa da válvula reguladora de pressão.

A pressão de trabalho deve manter-se constante, mesmo que a pressão do compressor de ar ou o consumo nos pontos de trabalho faça com que ela oscile. Portanto, para que a pressão de trabalho seja constantemente regulada, usa-se um piloto submetido à esta, que entra em ação a fim de regular a pressão ao valor desejado.

Por exemplo: com o aumento da pressão na área de trabalho, o piloto entra em ação e o fluxo de ar comprimido é desviado para o escape. Com isso, a seção de passagem do ar na válvula diminui gradativamente ou se fecha, sendo cortado o suprimento de ar na linha de alimentação do sistema pneumático. Quando o consumo do ar aumenta, a pressão diminui e a força exercida pela mola reabre a válvula fazendo com que o ar penetre no sistema pneumático novamente.

## 5.3 Lubrificador de ar comprimido

O lubrificador tem a finalidade de abastecer os elementos pneumáticos. A lubrificação é necessária para garantir um desgaste mínimo dos elementos móveis e manter em valores mínimos as forças de atrito e proteger os aparelhos contra a corrosão.

Os elementos de lubrificação pneumática são projetados segundo o princípio de Venturi (visto no capítulo 2, seção 2.4). De acordo com esse princípio, a diminuição do diâmetro da tubulação por onde passa o ar (garganta) ocasiona aumento de sua velocidade e queda de pressão na seção em que a área é menor. O lubrificador contém um reservatório de óleo conectado com a menor seção do Venturi. A pressão menor na garganta do Venturi faz com que o óleo seja admitido nessa seção e arrastado pela corrente principal de ar. Com isso, o Venturi lubrificador começa a funcionar, empurrando o óleo lubrificante para as linhas de utilização do trabalho.

## 5.4 Unidade de condicionamento

A unidade de condicionamento de ar comprimido é uma combinação de um filtro de ar comprimido, um regulador de pressão e um lubrificador em um conjunto único que facilita a manutenção do sistema pneumático, ou seja, limpeza do ar.

## 5.5 Compressores de ar

Compressores são máquinas utilizadas para elevar a pressão de ar proveniente da atmosfera até a pressão de trabalho requerida para execução de trabalho dos atuadores pneumáticos.

### 5.5.1 Compressores de deslocamento positivo

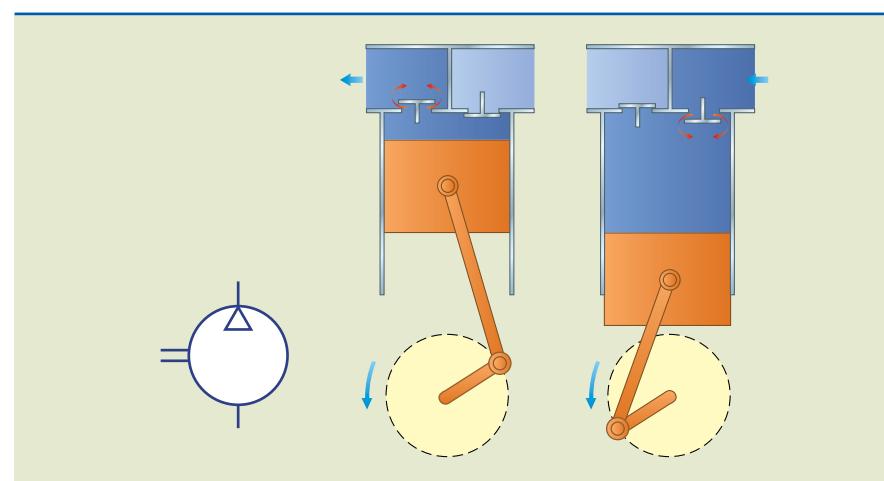
O princípio de funcionamento desses compressores baseia-se na redução do volume do ar. Quando a pressão ideal do ar é atingida, cessar sua admissão e sua compressão e, se não for possível parar a máquina, o excesso de pressão escapa para a atmosfera a fim de aliviar o sistema pneumático, evitando o colapso do compressor. Encontramos dois tipos de compressores de deslocamento positivo: os rotativos e os alternativos.

### 5.5.2 Compressores de deslocamento dinâmico

Nos compressores de deslocamento dinâmico, o aumento de pressão é obtido por meio de conversão de energia cinética em energia de pressão, durante a passagem do ar através das palhetas do compressor. O ar admitido entra em contato com os impulsos do rotor, dotados de alta velocidade. O ar é acelerado nesse sistema e atinge elevadas velocidades. Em outra fase, o seu escoamento é retardado por meio de difusores, provocando uma elevação de pressão. Os tipos podem ser: ejetor, radial e dinâmico.

### 5.5.3 Tipos de compressores

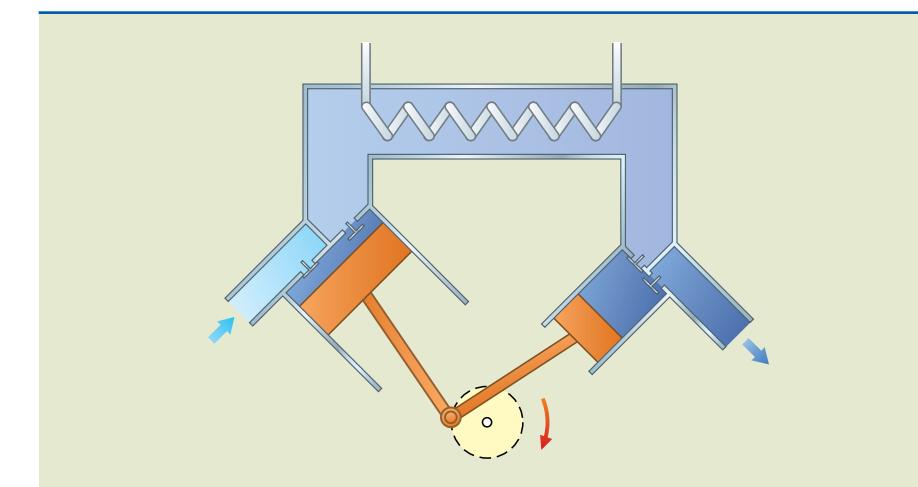
#### Compressor monoestágio de pistões



**Figura 5.4**  
Símbologia e representação esquemática do funcionamento de um compressor com um único estágio de compressão.

Nesse tipo de compressor (figura 5.4), na admissão, o ar é aspirado pela válvula de admissão que abre a passagem do ar atmosférico, por meio de um filtro; logo, a aspiração ocorre durante o recuo do pistão. Quando o pistão avança, a válvula de admissão fecha, o ar que se encontra dentro do pistão é comprimido durante todo o curso de avanço do pistão. Durante a compressão, a válvula de escape se abre e o ar é direcionado para o vaso de pressão (reservatório de ar comprimido). No processo de compressão, ocorre diminuição de volume, aumento de pressão e um indesejável aumento de temperatura. Esse aumento de temperatura deverá ser minimizado pelo sistema de refrigeração, que conta com dissipadores de calor (aleias) e ventilador destinados para esse fim. Esse tipo de compressor é atualmente o mais usado e sua lubrificação é feita na parte inferior dos pistões. Os pistões são acionados por uma árvore de manivelas (eixo virabrequim) que salpica o óleo nas partes móveis interiores.

#### Compressor multiestágio de pistões



**Figura 5.5**  
Representação esquemática do funcionamento de um compressor de dois estágios de compressão.

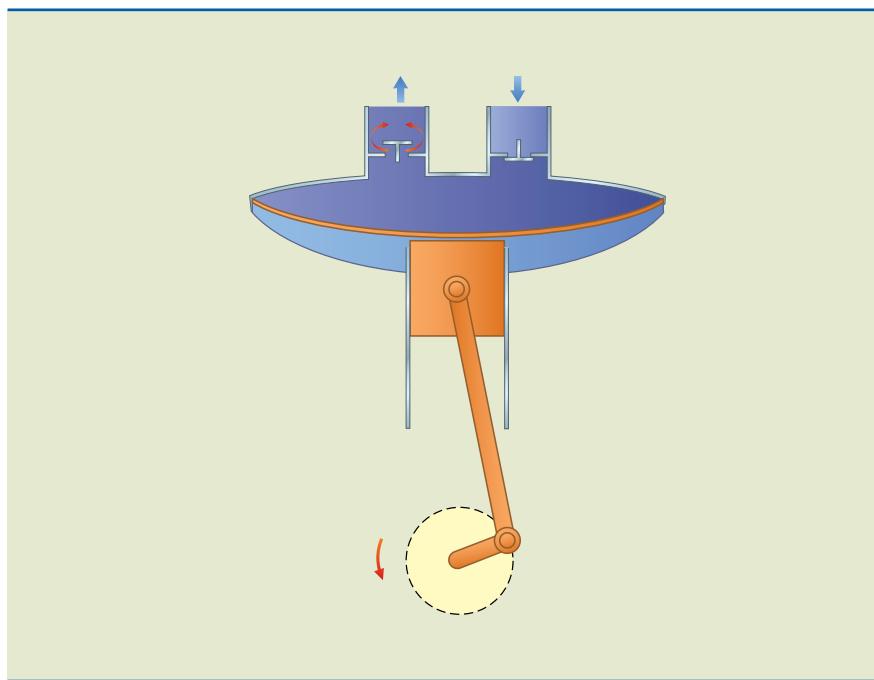
Quando há necessidade de comprimir o ar e atingir pressões relativamente mais elevadas, são necessários dispositivos com diversas etapas sucessivas de compressão. O artifício é a utilização de estágios em série, ou seja, um após o outro. Na figura 5.5, pode ser visto um compressor com dois estágios. O ar aspirado é comprimido no primeiro pistão e novamente comprimido pelo segundo pistão. A refrigeração intermediária é feita pelo aquecimento resultante da compressão. Existem configurações em que se usam mais de dois estágios de compressão.

#### Compressor de membrana (diafragma)

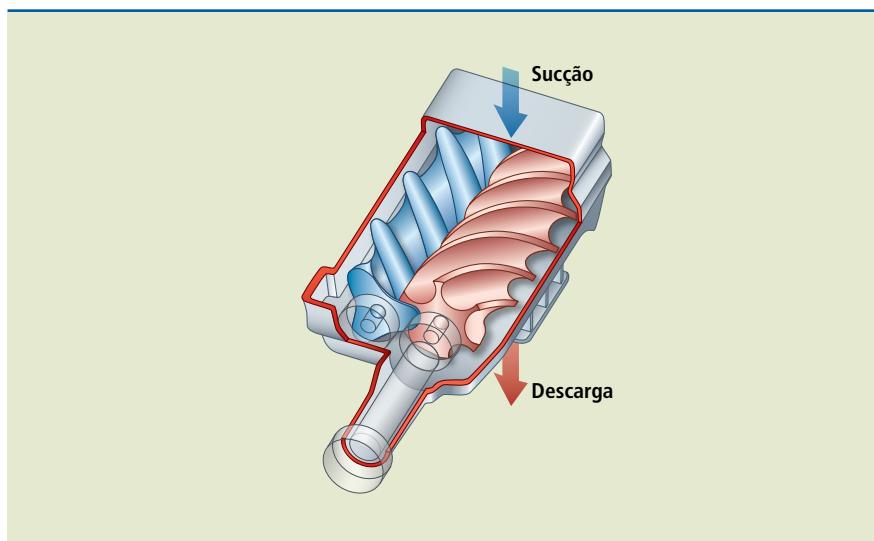
Esse tipo pertence ao grupo de compressores de pistão (figura 5.6). O pistão fica separado da câmara de sucção e compressão por uma membrana, e o mecanismo mantém o ar comprimido isento de contaminação provocada pela lubrificação das partes deslizantes. Esse ar, portanto, fica sempre livre de resíduos de óleo provenientes do compressor; por esse motivo, tais compressores são largamente empregados na indústria alimentícia, farmacêutica e química.

**Figura 5.6**

Representação esquemática do funcionamento de um compressor de membrana.

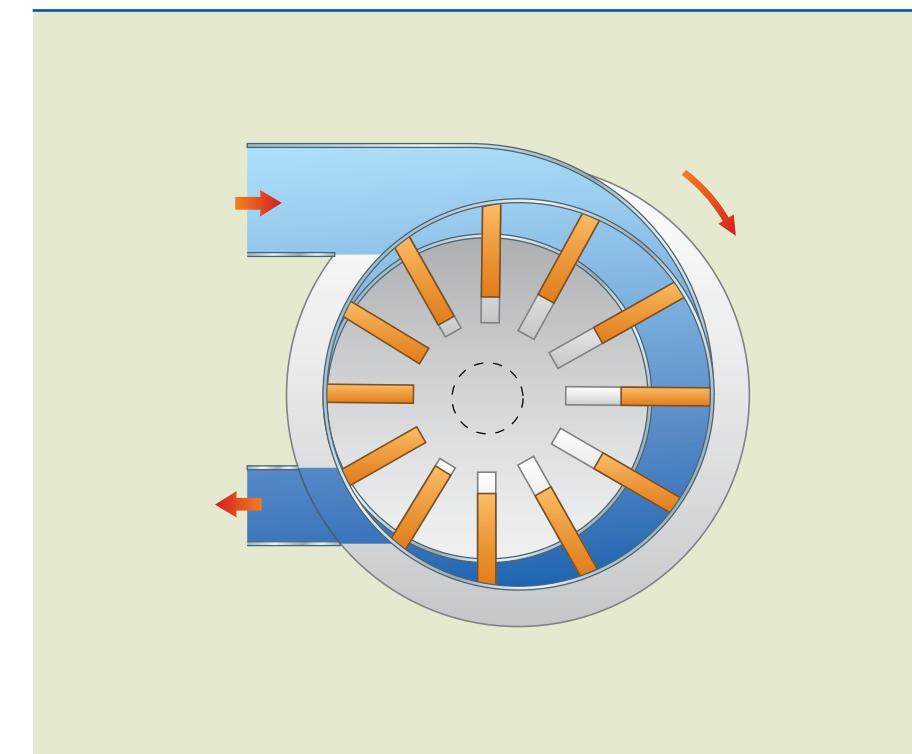
**Compressor de parafusos****Figura 5.7**

Representação esquemática de um compressor de parafusos.



Os compressores de parafusos (figura 5.7) são compressores rotativos dotados de dois eixos de rotação que funcionam conforme o princípio do deslocamento contínuo do ar. Esse mecanismo impede a formação de golpes e oscilações de pressão. Como esses compressores não possuem válvulas de aspiração e de pressão, exigem pouca manutenção. Permitem altas rotações e são de pequenas dimensões. Entretanto, consomem maior potência quando comparados com os compressores de pistões.

Os compressores desse tipo são construídos para operar sem lubrificação, garantindo um suprimento de ar isento de óleo.

**Compressor de palhetas****Figura 5.8**

Representação esquemática de um compressor de palhetas.

O compressor de palhetas é do tipo rotativo, de um eixo que opera conforme o princípio de deslocamento (figura 5.8). Possui uma carcaça cilíndrica, com aberturas de entrada e saída, e um rotor alojado excentricamente, contendo as palhetas. Nesse compressor, a rotação diminui o volume do compartimento que contém o ar durante a rotação, aumentando a pressão.

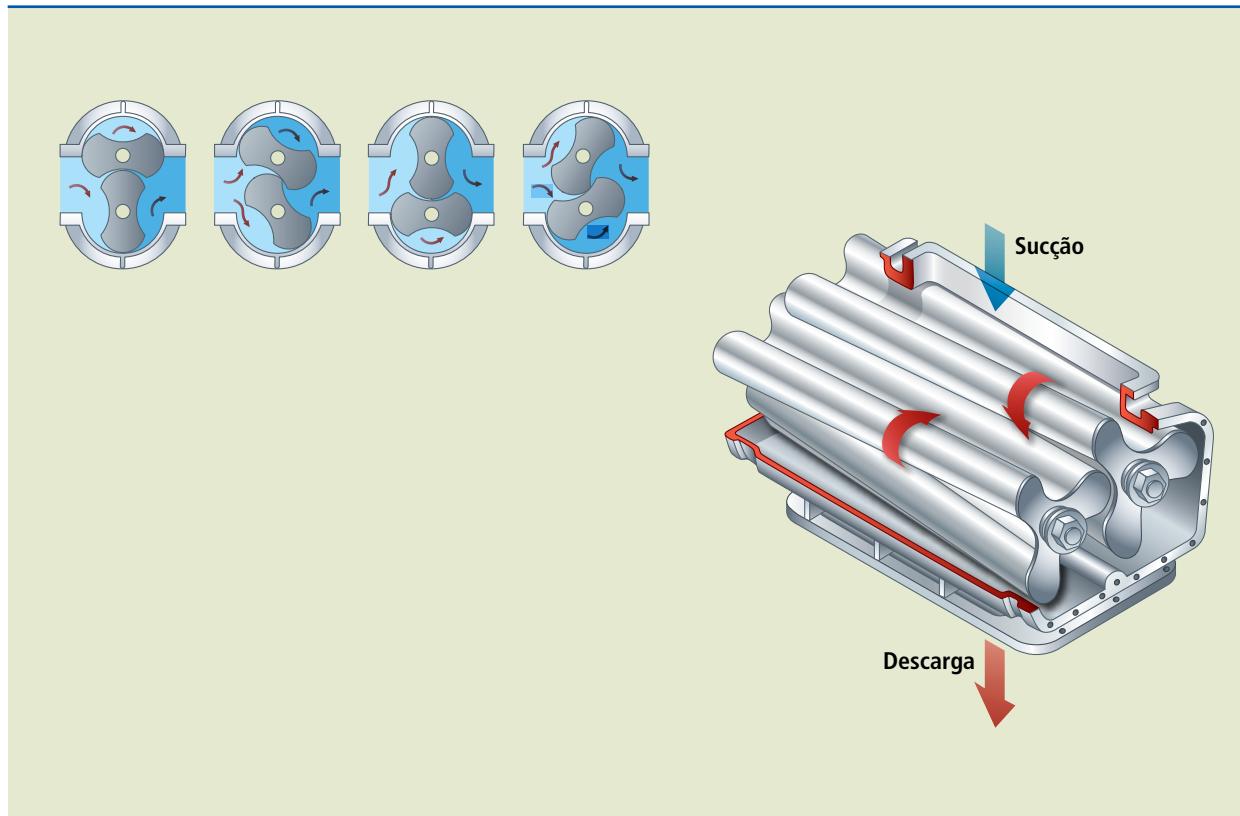
Quando o rotor entra em movimento, as palhetas são expulsas de seus compartimentos pela força centrífuga e forçadas contra a carcaça. Em razão da excentricidade, no local em que gira o rotor há um aumento de área na sucção e uma diminuição na pressão.

Esses compressores ocupam pouco espaço e seu funcionamento é contínuo e equilibrado no que diz respeito ao fornecimento uniforme de ar. A lubrificação é feita por injeção de óleo.

**Compressor de lóbulos (root)**

Nesse compressor (figura 5.9), o ar é transportado sem alteração de volume. A compressão efetua-se pelos cantos de duas células rotativas, em que o ar é forçado a passar para o outro lado do compressor, e então é enviado para uma câmara fechada para receber a pressão. Esse compressor é capaz de enviar grande volume de ar e é utilizado quando o ambiente tem alta necessidade de vazão. Um bom exemplo de sua aplicação são as cabines pressurizadas de aeronaves. Contudo, possui baixa capacidade de compressão.

Trata-se de um sistema isento de contaminação, pois o acionamento sincronizado das células rotativas entre a carcaça do compressor dispensa lubrificação no seu interior.



**Figura 5.9**

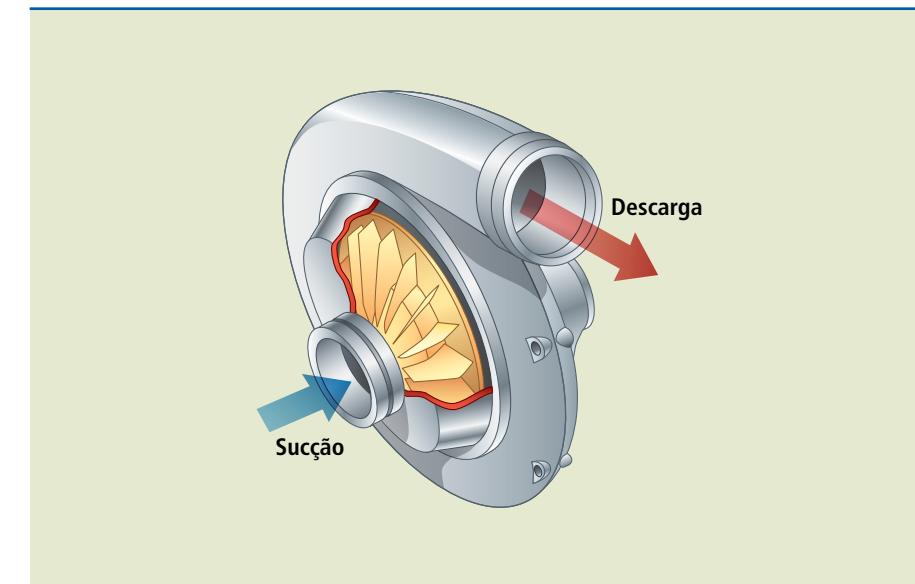
Detalhe do funcionamento e perspectiva em corte de um compressor de lóbulos.

#### Compressor axial

O compressor axial é adequado para grandes vazões de ar. Possui um ou mais rotores destinados a movimentar o ar, transformando essa energia de movimento em pressão. O ar movimenta-se em direção ao próprio sentido do eixo do compressor, axialmente, e dirige-se para o lado de saída com grande carga de volume e pressão. Se os rotores forem colocados em série, o poder de compressão e de fluxo será muito maior e o conjunto fornecerá ar comprimido a grande número de equipamentos. É encontrado em grandes indústrias, em razão da grande demanda de ar necessária para acionar diversos e numerosos equipamentos pneumáticos.

#### Compressor radial (centrífugo)

Esse compressor (figura 5.10) é adequado para grandes vazões de ar. Os compressores tipo radiais também são máquinas de fluxo. Neles, a energia cinética também é convertida em pressão. A aspiração é feita axialmente, e o ar é posteriormente conduzido para a saída, no sentido radial, ou seja, 90° em relação ao eixo. Para alcançar pressões maiores nesse tipo de compressores, são necessários vários estágios de compressão.



**Figura 5.10**

Compressor do tipo radial.

#### 5.5.4 Vazão de ar dos compressores

A vazão de ar é a quantidade de ar que está sendo fornecida pelo compressor escolhido para operar os equipamentos pneumáticos.

Por exemplo: uma grande indústria ou uma aeronave de porte que necessita de inúmeros componentes pneumáticos utiliza normalmente compressores de fluxo tipo axial ou radial. Já um pintor de veículos de uma pequena oficina mecânica precisa apenas de um compressor tipo pistão monoestágio.

“Pressão de regime” é a pressão fornecida pelo compressor, a do reservatório ou a de uma rede distribuidora. “Pressão de trabalho” é a pressão demandada nos pontos de trabalho.

Um sistema pneumático básico constitui-se de compressor, reservatório e ponto de trabalho.

#### 5.5.5 Regulagem e acionamento dos compressores

O acionamento dos compressores ocorre conforme a disponibilidade de energia do usuário, podendo ser por motor elétrico (mais comum em instalações industriais) ou motor de combustão. Quando a estação é móvel, emprega-se um motor de combustão (em geral, alimentado por gasolina ou óleo diesel).

Para combinar o volume de fornecimento com o ar consumido, é importante que se faça a regulagem dos compressores. Dois valores preestabelecidos: a pressão máxima e a mínima. Encontramos muitas técnicas de regulagem, desde o fechamento da sucção do ar até o fechamento de fornecimento de pressão. Entretanto, na prática, a forma mais utilizada é a regulagem intermitente, pois permite que o compressor funcione em dois campos: fornecimento em carga e em parada total.

A regulagem intermitente conta com motor elétrico que é desligado por um pressostato quando o ar produzido atinge a pressão máxima regulada, e o compressor para, então, de fornecer pressão, mantendo a carga já produzida em seu reservatório. À medida que o volume de ar vai sendo consumido e a pressão atinge um valor mínimo, também preestabelecido, o pressostato liga de novo, o motor elétrico e o compressor começar a trabalhar outra vez, fornecendo a pressão necessária para encher novamente o reservatório.

### 5.5.6 Lugar de montagem dos compressores

Os compressores devem ser montados em um ambiente fechado, com proteção acústica, pois produzem muito ruído. O mantenedor de funcionamento do compressor deve utilizar protetor auricular.

O ambiente deve ser bastante ventilado e o ar deve ser seco, fresco e livre de impurezas. Em indústrias de grande porte, a instalação deve possuir sistema de alarme sonoro que deverá acionar quando ocorrer falha em algum compressor, acionando automaticamente outro compressor para que o suprimento de ar comprimido não seja comprometido.

### 5.5.7 Manutenção do compressor

Essa é uma tarefa primordial dentro do setor industrial. É importante seguir as instruções recomendadas pelo fabricante para todo e qualquer equipamento. É essencial também que um plano semanal de manutenção seja previsto, e nele deverá estar especificada a verificação do nível de lubrificação em pontos destinados a essa ação, principalmente, nos mancais do compressor, motor e cárter.

Nesse mesmo período, são previstas a limpeza do filtro de ar e a verificação da válvula de segurança para comprovação de sua condição real de funcionamento.

A água acumulada no tanque do compressor deve ser drenada semanalmente quando seu uso é constante e diariamente, quando é muito constante.

### 5.5.8 Refrigeração dos compressores

O ar resultante da compressão pode aumentar muito sua temperatura, assim, torna-se necessária a adoção de sistema de diminuição dessa.

Em compressores de pequeno porte, na parte externa do cabeçote há elementos chamados aletas, que são superfícies estendidas cuja função é aumentar a área de troca de calor com o ar ambiente. Normalmente, nessas condições (convecção natural), as aletas são suficientes para dissipar o calor. Já em compressores maiores, há necessidade de um ventilador para dissipar o calor nas aletas (convecção forçada). Entretanto, quando se trata de uma estação de compressores com elevada potência de acionamento, a refrigeração a ar é insuficiente. Nesses casos, os compressores devem ser equipados com refrigeração à água.

### Resfriador posterior

O resfriador posterior é um trocador de calor e tem como finalidade resfriar o ar comprimido.

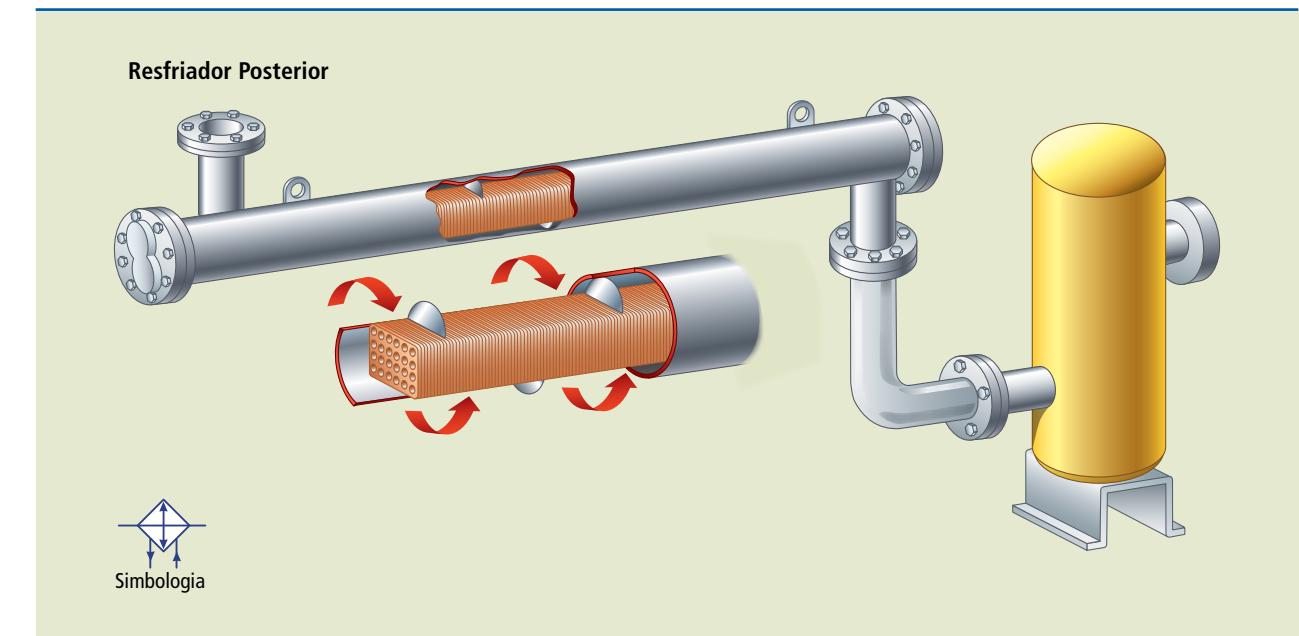
A umidade presente no ar comprimido é prejudicial ao sistema pneumático. Supondo que a temperatura de descarga de uma compressão seja de aproximadamente 130 °C, à medida que essa temperatura diminui, a água se condensa no sistema de distribuição, causando sérios problemas.

Uma das maneiras de resolver esse problema nas instalações de ar comprimido é o resfriador posterior, que fica localizado entre a saída do compressor e o reservatório. Nessa zona, o ar comprimido atinge sua maior temperatura. Esse resfriamento permite reduzir de 75% a 90% do vapor de água contido no ar e vapores de óleo, evitando também que a linha de distribuição dilate pelo aumento de temperatura de descarga do ar.

Um resfriador posterior (figura 5.11) é constituído basicamente de duas partes:

- Um corpo em geral cilíndrico onde se alojam feixes de tubos, formando no interior do corpo uma espécie de colmeia.
- Um separador de condensado dotado de dreno.

**Figura 5.11**  
Resfriador e reservatório de ar comprimido.

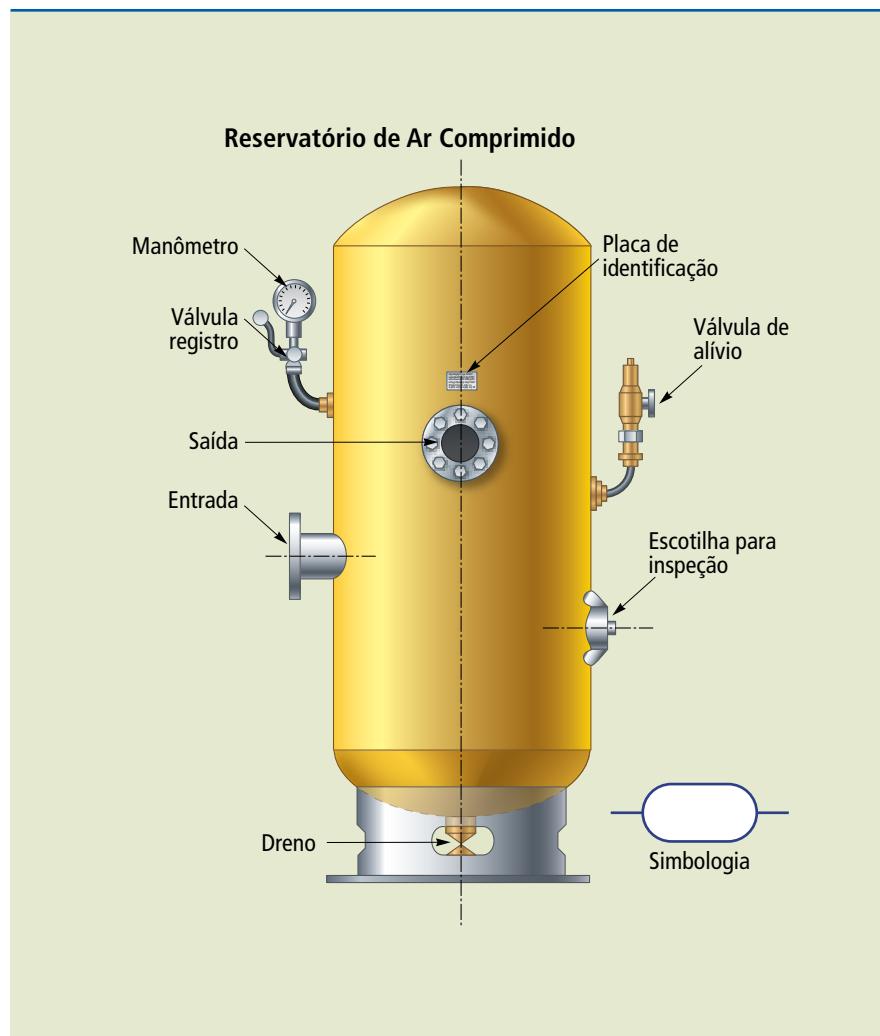


### 5.6 Reservatório de ar comprimido

O reservatório de ar comprimido (figura 5.12) tem a função de estabilizar a distribuição do ar comprimido. Ele elimina as oscilações de pressão na distribuição quando há consumo momentâneo de ar e tem a função de garantir a reserva do ar comprimido.

A grande superfície do reservatório refrigera o ar suplementar e parte da umidade do ar se separa na superfície de troca de calor.

## Figura 5.12

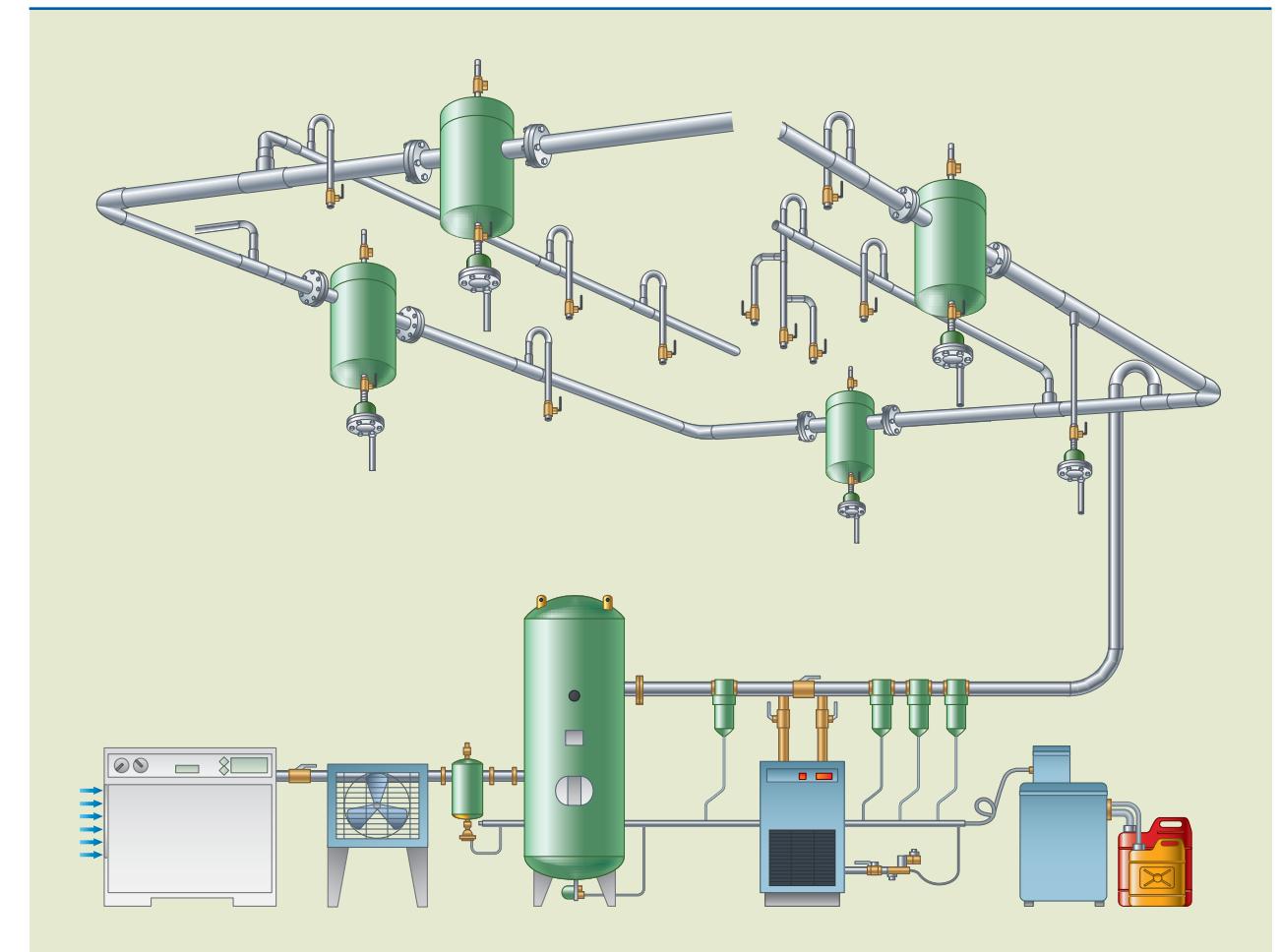


A água encontrada nos reservatórios de ar comprimido é resultante da condensação do vapor de água (que está presente no ar atmosférico) pelo processo de compressão. A água, mais pesada, repousa no fundo do tanque e deve ser constantemente eliminada por intervenção manual ou de modo automático.

## 5.7 Rede de distribuição do ar comprimido

Provocada pela sempre crescente racionalização e automatização das instalações industriais, cada máquina e cada dispositivo requerem uma quantidade de ar específica. Sendo assim, o diâmetro das tubulações deve ser capaz de alimentar os pontos de distribuição e garantir uma carga de ar necessária para manter a pressão de trabalho adequada em cada ponto de utilização.

A figura 5.13 mostra um exemplo de rede de distribuição de ar comprimido.



**Figura 5.13**  
Exemplo esquemático de uma rede de distribuição de ar comprimido.

Na escolha do diâmetro da tubulação, deve-se considerar:

- Volume corrente (vazão).
  - Comprimento da rede.
  - Queda de pressão admissível.
  - Pressão de trabalho.
  - Número de pontos de estrangulamento da rede.

As redes de distribuição têm arquiteturas definidas como:

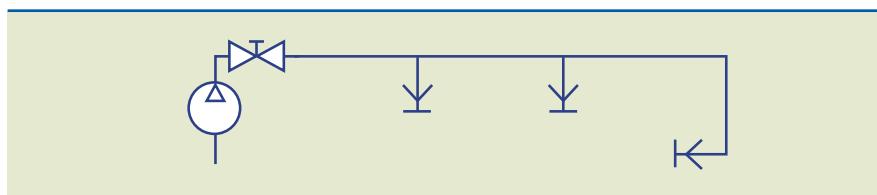
- Rede de distribuição em circuito aberto.
  - Rede de distribuição em circuito fechado.
  - Rede de distribuição combinada.

### 5.7.1 Rede de distribuição em circuito aberto

Consiste em uma única tubulação para fornecer a pressão. O ar do compressor atua em toda a extensão da tubulação, a qual possui, em posições estratégicas, os pontos de distribuição do ar. A figura 5.14 mostra uma representação esquemática de um trecho de um circuito aberto.

**Figura 5.14**

Representação esquemática de uma rede de distribuição em circuito aberto.



A montagem das tubulações deve ser em declive de 1% a 2% na direção do fluxo por causa da formação de água condensada.

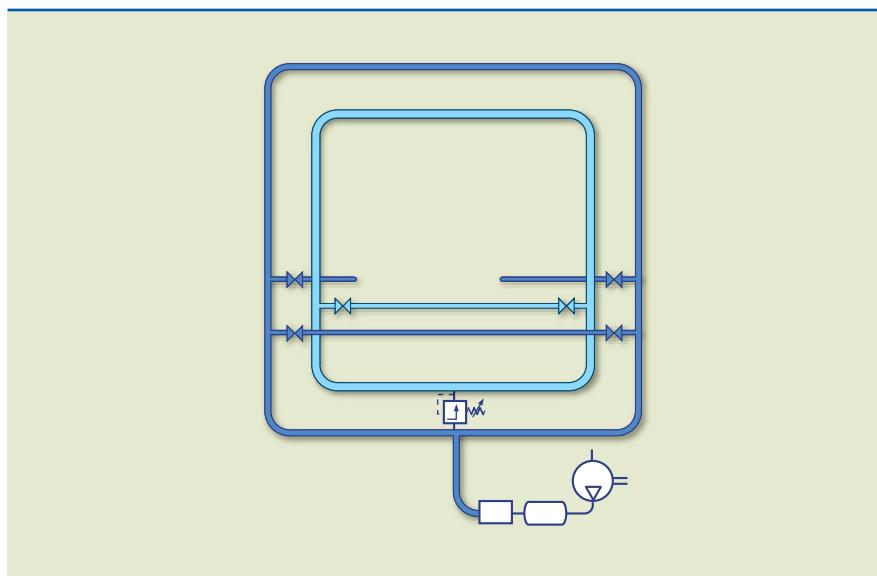
Em tubulações horizontais, os ramais de tomadas de ar devem ser instalados na parte superior do tubo principal.

Para drenar a água condensada na tubulação, devem ser instaladas derivações constituídas com drenos, localizadas na parte inferior da tubulação principal.

### 5.7.2 Rede de distribuição em circuito fechado

**Figura 5.15**

Representação esquemática de um exemplo de circuito fechado.



Geralmente, as tubulações principais das instalações pneumáticas são montadas em circuito fechado (figura 5.15). Partindo da tubulação principal, são instaladas as ligações em derivação.

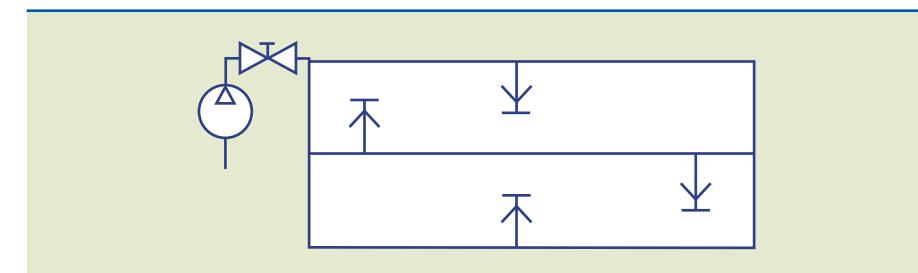
Nos casos em que se consome muito ar comprimido, é aconselhável esse tipo de montagem que gera uma alimentação uniforme, pois o ar flui em ambas as direções.

### 5.7.3 Rede de distribuição combinada

Uma rede de distribuição combinada (figura 5.16) também é uma instalação em circuito fechado. Por possuir ligações longitudinais e transversais, oferece a possibilidade de utilizar o ar em qualquer posição.

**Figura 5.16**

Representação esquemática de uma rede de distribuição combinada.



Nesse tipo de construção, as válvulas de fechamento dão a possibilidade de bloquear determinadas linhas de ar comprimido quando estas não estão sendo usadas ou quando se tem a necessidade de manutenção ou reparo.

## 5.8 Elementos pneumáticos

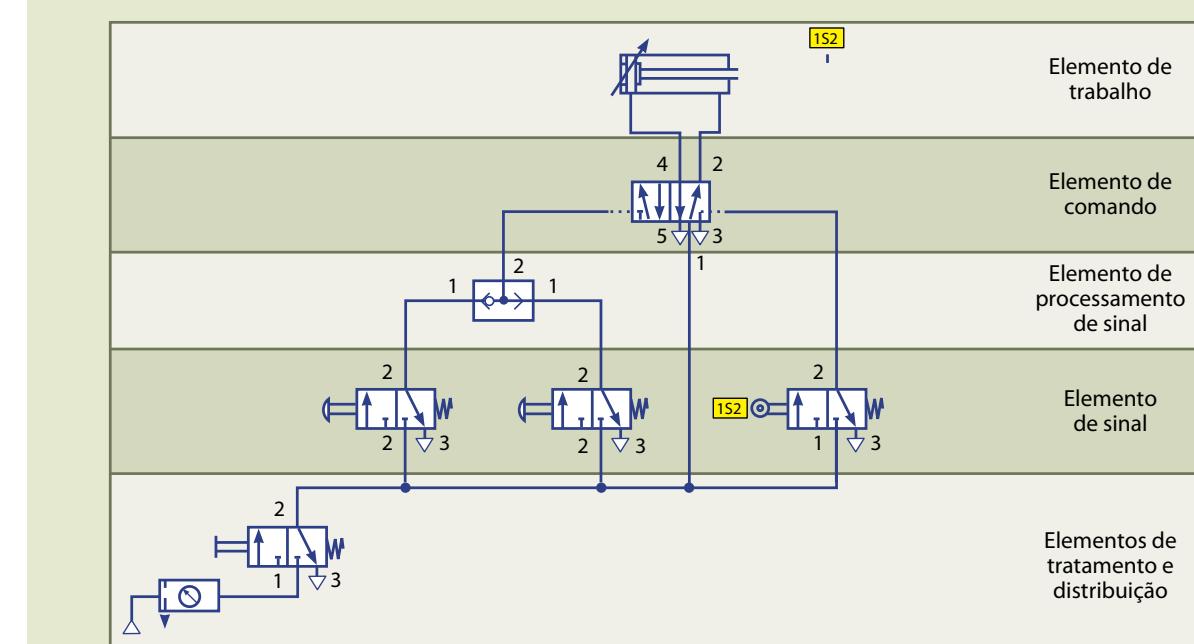
### 5.8.1 Cadeia de comando

Da mesma forma que ocorre em um sistema hidráulico, os atuadores são os elementos responsáveis para executar o trabalho pneumático. Os elementos de comando e de controle são encarregados de fornecer o ar comprimido para promover avanço ou recuo dos atuadores, uma vez que recebem o ar do elemento de produção, tratamento e distribuição.

A hierarquia de distribuição dos componentes pneumáticos é semelhante à do sistema hidráulico, recebendo também a denominação de cadeia de comando. Uma cadeia de comando pneumática é exemplificada pela figura 5.17.

**Figura 5.17**

Representação dos elementos essenciais em um circuito pneumático.



## 5.8.2 Válvula redutora de fluxo variável com retenção

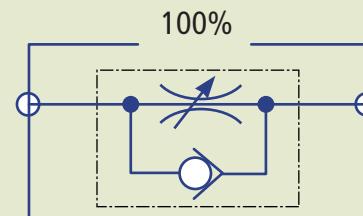
A válvula reguladora de fluxo unidirecional é constituída de uma válvula de fluxo e de uma válvula de retenção (figura 5.18).

A válvula de retenção não permite que a vazão flua em determinado sentido. O escoamento principal ocorre através da válvula de fluxo, e a passagem do ar é ajustada por um parafuso. No sentido oposto, a vazão ainda pode acontecer através da válvula de retenção, também conhecida como válvula reguladora de velocidade.

Essas válvulas são utilizadas para a regulagem de velocidades tanto em motores pneumáticos quanto em atuadores.

**Figura 5.18**

Simbologia de uma válvula redutora de fluxo variável com retenção.



### Regulagem da entrada do ar (regulagem primária)

A regulagem de fluxo é feita somente em um sentido de pressão, para a unidade acionada, ou seja, para o atuador pneumático. O retorno do ar através da válvula de retenção é livre.

### Regulagem de exaustão (regulagem secundária)

Essa é feita na exaustão do ar, isto é, na linha de retorno proveniente do cilindro pneumático. Na entrada da pressão, a válvula de retenção permite fluxo livre do ar.

A válvula reguladora de fluxo melhora muito o avanço dos cilindros pneumáticos, por esse motivo é comum encontrá-las em suas linhas de atuação.

## 5.8.3 Válvulas limitadoras de pressão

São as válvulas que limitam a pressão no circuito pneumático e atuam em caso de problemas no regulador de pressão. Por isso, são também chamadas de válvulas de alívio.

Devem estar reguladas para valores acima da pressão de trabalho do regulador, pois, em caso de falha, entram, em funcionamento, limitando a pressão no circuito. O excesso de ar é então liberado para a atmosfera.

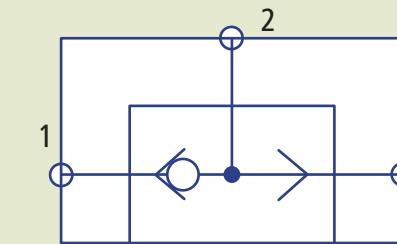
## 5.8.4 Válvula alternadora (função lógica “OU”)

Também chamada válvula de comando duplo ou válvula de dupla retenção, essa válvula tem duas entradas, 1 e 1, e uma saída 2 (figura 5.19). Entrando ar comprimido na 1 (direita), a esfera fecha a entrada 1 (esquerda) e o ar flui de 1 para 2. Em sentido contrário, quando o ar flui de 1 (esquerda) para 2, a entrada 1 (direita) é fechada.

Essa válvula é utilizada quando se quer pilotar uma válvula por dois pontos diferentes, prática constante em situações de emergência.

**Figura 5.19**

Representação esquemática de uma válvula alternadora.

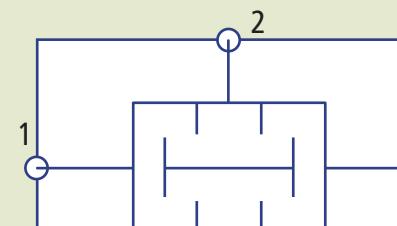


## 5.8.5 Válvula de simultaneidade (função lógica “E”)

É comutada com base no ar comprimido que entra nas duas conexões de entrada 1 e sai através da conexão de saída 2. Caso as duas conexões de entrada comecem a receber ar comprimido, a conexão com a menor pressão prevalece e é usada (função lógica “E”). É muito utilizada em locais onde há necessidade de o operador ficar com as duas mãos ocupadas, como no caso de prensas.

**Figura 5.20**

Representação esquemática de uma válvula de simultaneidade.



## 5.9 Atuadores pneumáticos

São elementos capazes de converter a energia contida no ar comprimido em trabalho.

A energia fornecida pelo ar comprimido é convertida em força ou torque que é transmitida à carga que se quer movimentar. Portanto, os atuadores são ligados mecanicamente à carga a ser movimentada.

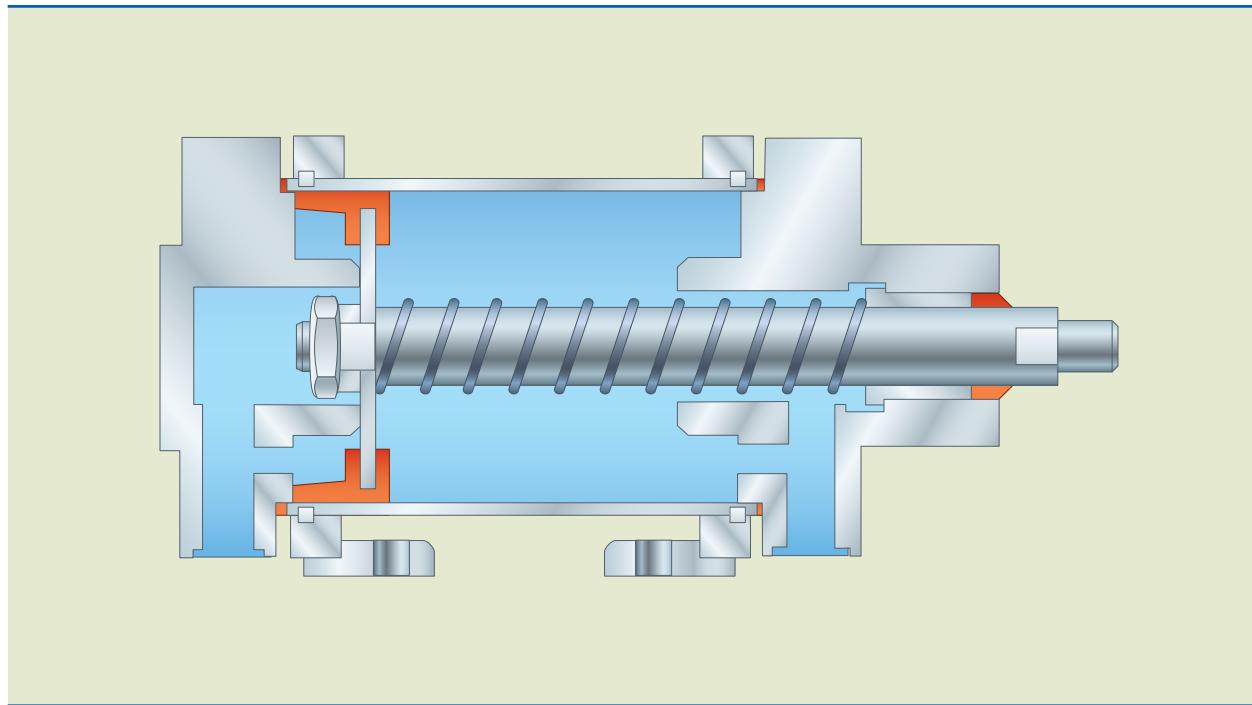
A energia pneumática é transformada, por atuadores pneumáticos, em movimentos retilíneos ou rotativos e, pelos motores pneumáticos, em movimentos rotativos.

Na atuação linear, encontramos na pneumática os seguintes tipos de cilindros:

- Cilindros de ação simples (retorno por mola) (ver figura 5.21).

**Figura 5.21**

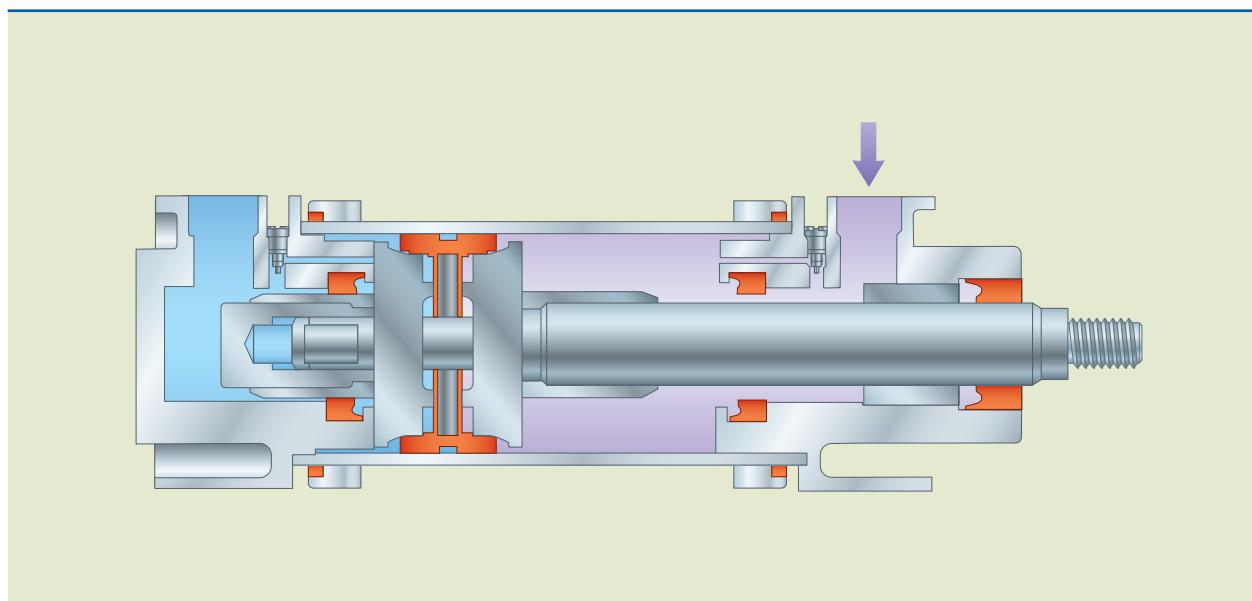
Cilindro de ação simples.



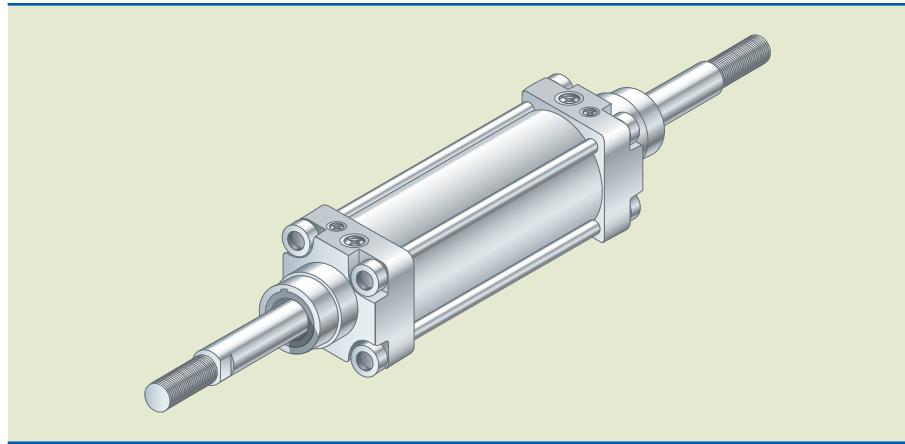
**Figura 5.22**

Cilindro de ação dupla.

- Cilindro de ação dupla com haste simples (figura 5.22).

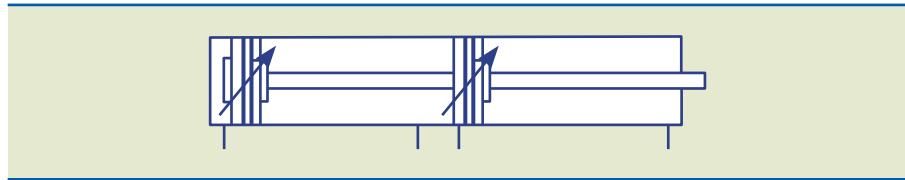


- Cilindro de ação dupla com haste dupla e outros tipos de cilindros semelhantes estão representados nas figuras 5.23 a 5.26.



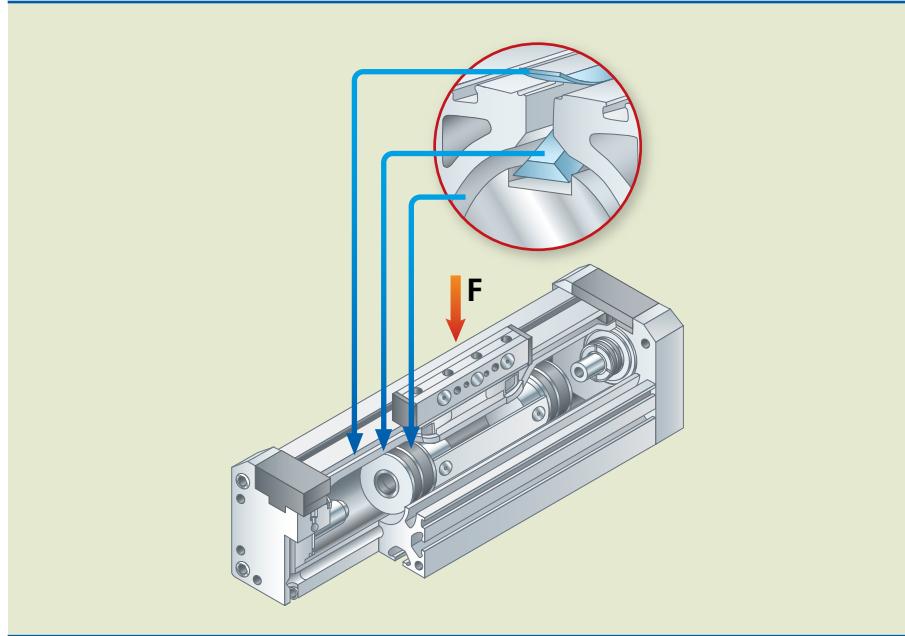
**Figura 5.23**

Cilindro de ação dupla com haste passante.



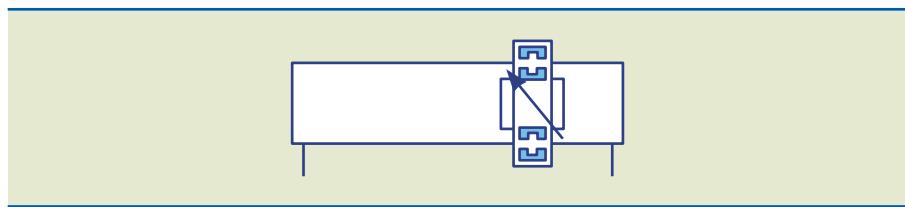
**Figura 5.24**

Atuador de ação dupla tandem.



**Figura 5.25**

Atuadores: ação dupla sem haste acoplamento mecânico.



**Figura 5.26**

Atuadores: ação dupla sem haste acoplamento magnético.

Os atuadores devem ser selecionados para cada tipo de aplicação. Dessa forma, deve-se selecionar, por exemplo, atuadores que produzam movimentos lineares para aplicações em que se requer movimento linear, sabendo que esse tipo de atuador também pode ser utilizado para movimento angular.

Os atuadores são representados pelos cilindros pneumáticos e são adequados à execução de movimento, força e velocidade.

Os atuadores capazes de produzir movimento rotativo também convertem energia pneumática em mecânica pelo torque contínuo. Nessa classe, encontram-se os motores pneumáticos e as turbinas pneumáticas.

Os que produzem movimentos oscilantes possuem movimento de torção limitado a um grau e são representados pelos osciladores pneumáticos ou atuadores giratórios.

### Critérios para seleção de atuador pneumático

Para escolher um atuador pneumático, é necessário seguir alguns critérios:

- Tipo de movimento a executar: rotativo ou linear.
- Sentido de rotação e inversão.
- Número de rotações e velocidade.
- Torque e força a executar.
- Potência a desenvolver.
- Uniformidade da força e velocidade.
- Características em relação às influências ambientais internas e externas.
- Aspectos ergométricos.

#### 5.9.1 Válvulas direcionais pneumáticas

As válvulas direcionais são utilizadas para comando de regulagem de partida, de parada e de direção de atuadores pneumáticos.

A denominação “válvula” corresponde à normalização internacional e abrange todas as construções tais como: registros, válvulas de esfera, válvulas direcionais, de assento etc.

Os esquemas pneumáticos, assim como os hidráulicos, usam símbolos para a descrição de válvulas que caracterizam sua função.

As válvulas são simbolizadas por quadrados, e o número de quadrados unidos indica o número de posições que uma válvula pode assumir.

A função e o número de vias estão dentro dos quadrados, as linhas indicam vias, as setas indicam a direção do fluxo e traços transversais indicam bloqueio.

As válvulas são denominadas de acordo com o número de vias (conexões) e de acordo com o número de posições de comando. Exemplo: em 3/2, o primeiro número (3) indica o número de vias e o segundo (2) indica o número de posições de comando.

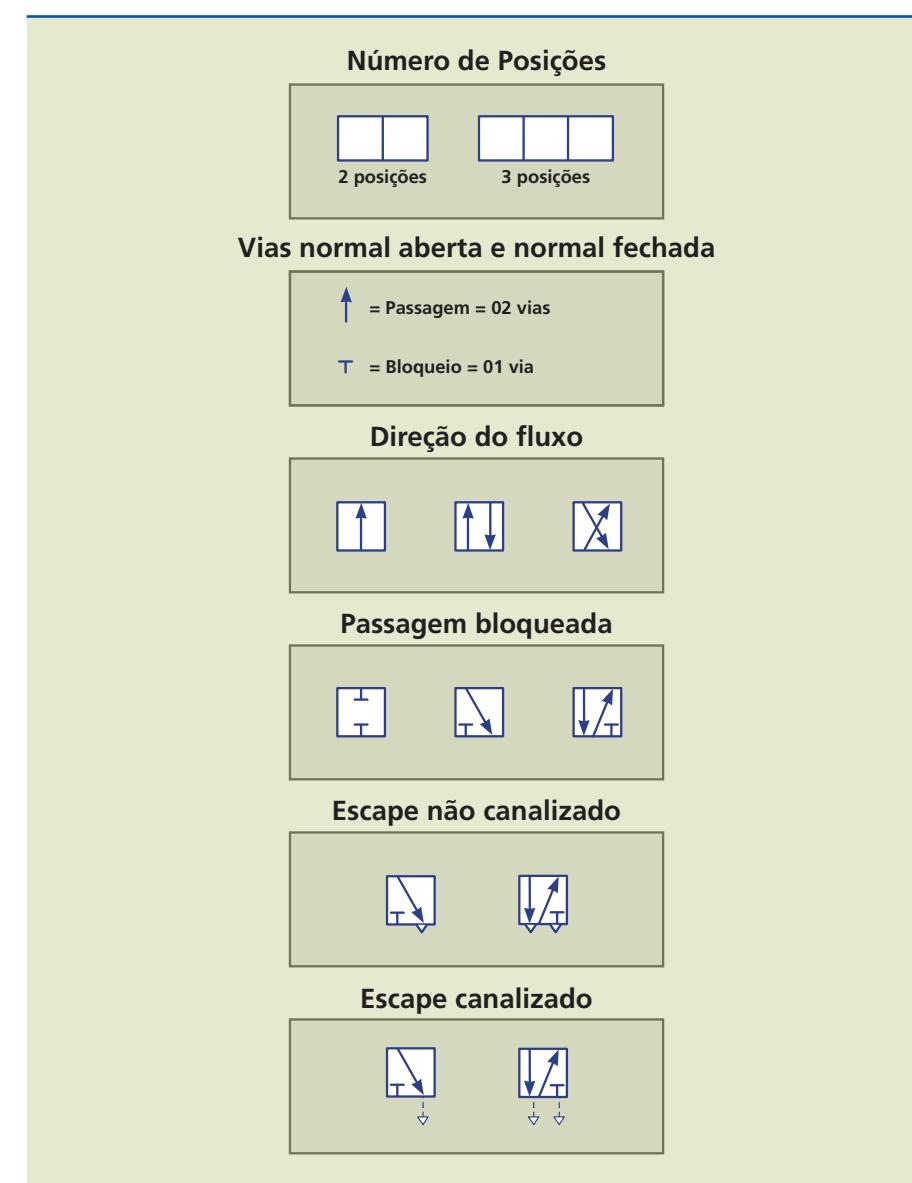
As conexões de pilotagem não são consideradas como vias.

A simbologia utilizada poderá ser vista a seguir.

### Número de posições

A simbologia do número de posições das válvulas direcionais segue uma lógica de fácil entendimento e dá ideia de seu funcionamento real. Seus símbolos são em forma de quadrados, no mínimo dois, e significam o número de posições que a válvula poderá assumir.

Uma válvula direcional simbolizada com dois quadrados significa que ela tem duas posições. Quando possuir três quadrados, três posições; quatro quadrados, quatro posições, e assim por diante. A figura 5.27 indica a simbologia usada nas válvulas direcionais.



**Figura 5.27**

Simbologia para as válvulas direcionais.

## Número de vias

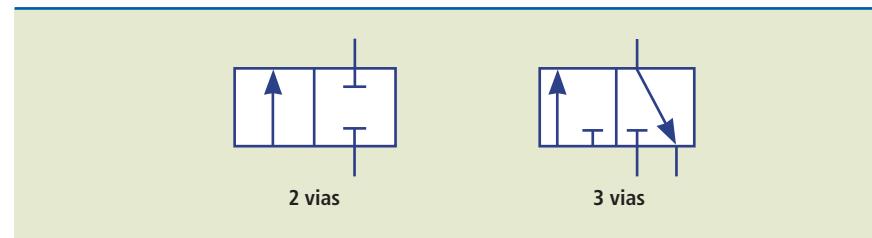
As vias das válvulas direcionais são as posições possíveis de conexão com as tubulações provenientes do circuito.

São representadas externamente por traços contínuos, nos quais fisicamente, são conectadas às mangueiras de ar comprimido.

Internamente, as setas representam a direção e o caminho que o ar irá seguir (ver exemplos nas figuras 5.28, 5.29 e 5.30).

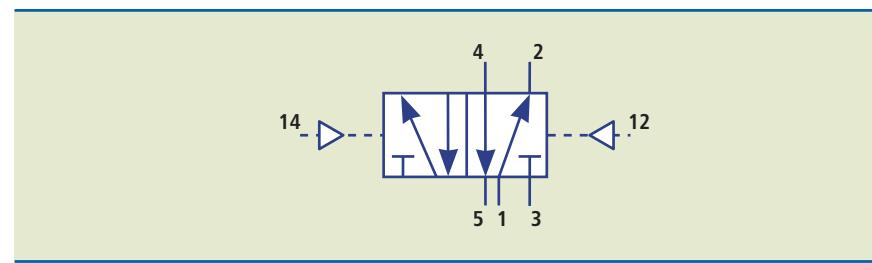
**Figura 5.28**

Exemplos de válvulas direcionais.



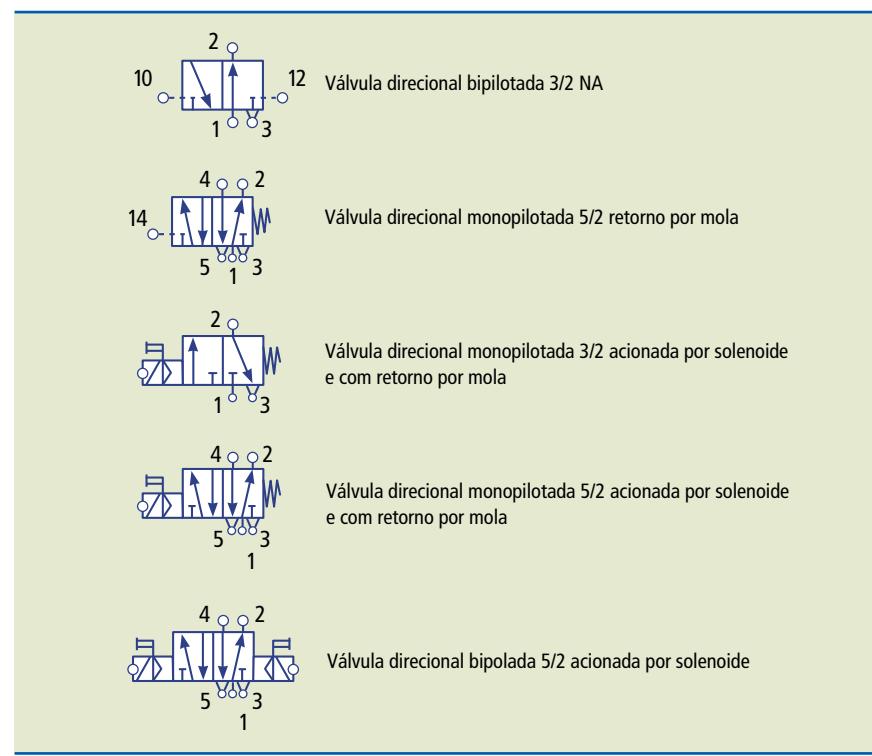
**Figura 5.29**

Identificação dos orifícios das válvulas conforme norma ISO 1219.



**Figura 5.30**

Exemplos de válvulas direcionais.



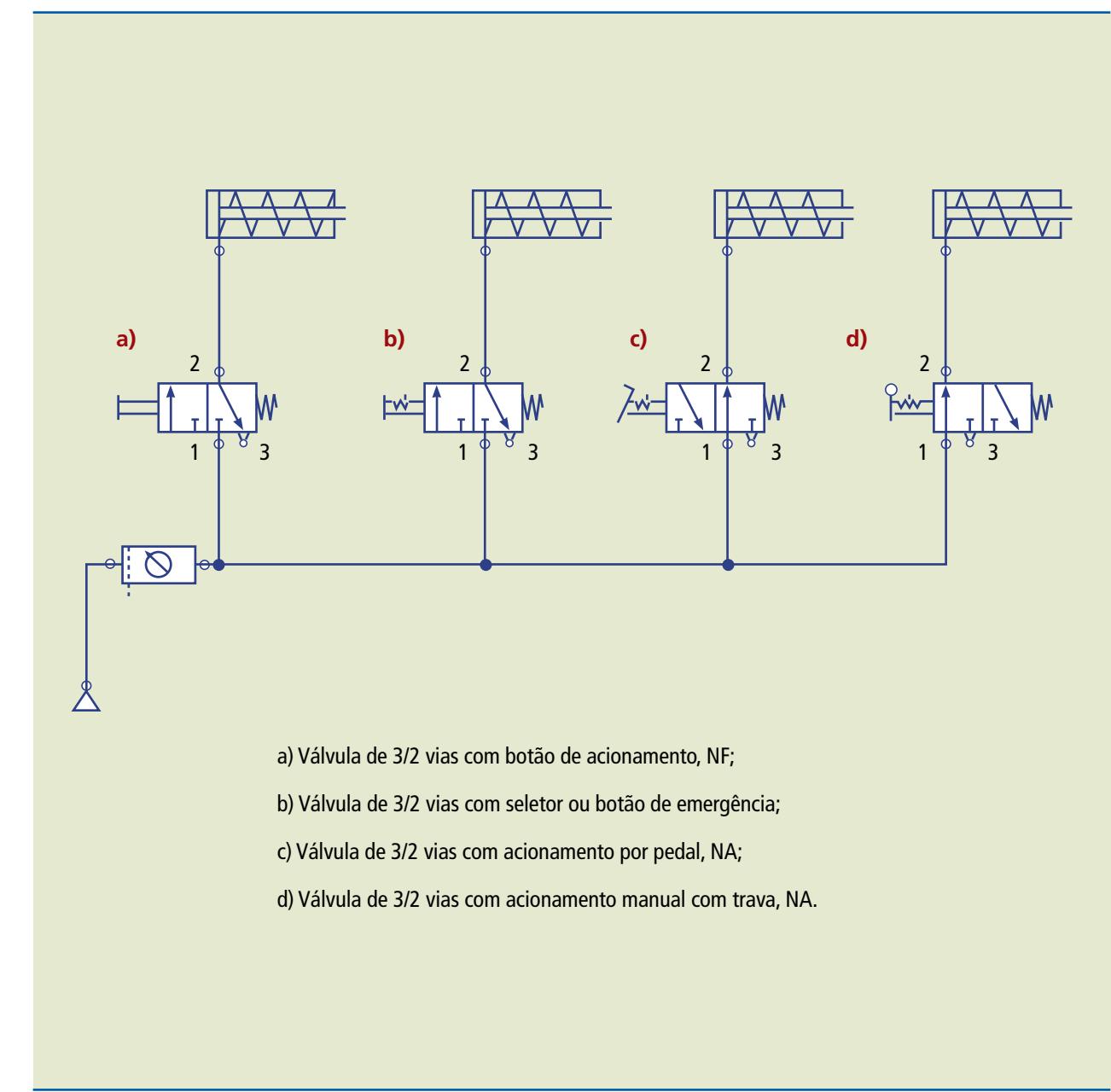
## 5.9.2 Comandos das válvulas direcionais

As válvulas direcionais são comandadas por sinais elétricos ou mecânicos. A seguir, alguns dos tipos de comandos encontrados atualmente.

### Acionamento de atuadores pneumáticos

As válvulas pneumáticas são responsáveis por promover o acionamento de atuadores, cilindros e motores pneumáticos. Esse acionamento pode ser feito de várias formas como veremos a seguir.

### Acionamento de atuadores pneumáticos de ação simples



**Figura 5.31**

Exemplos de acionamentos de atuadores pneumáticos simples.

Acionamento de atuadores pneumáticos de ação dupla

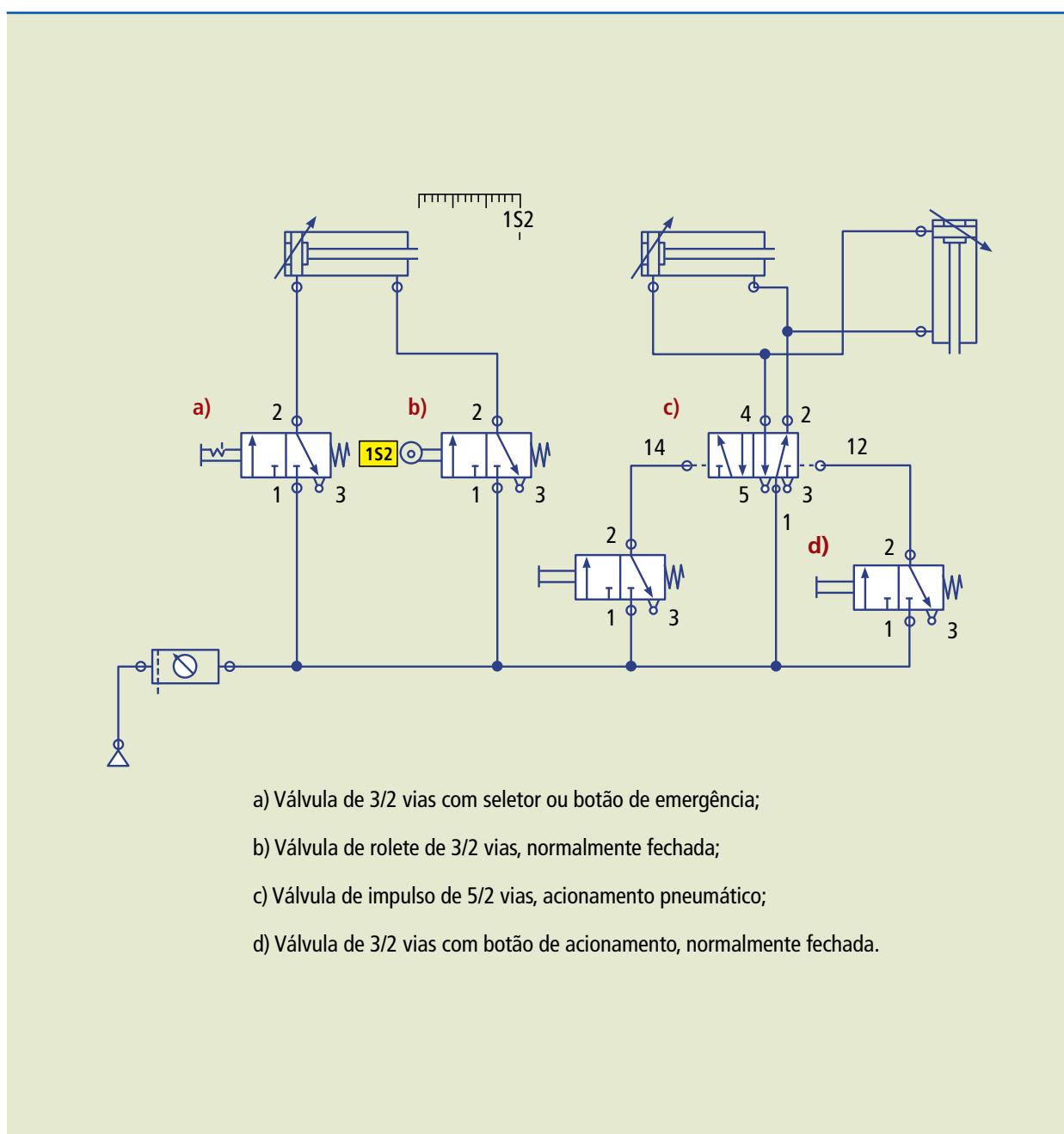


Figura 5.32

Exemplos de acionamentos pneumáticos de ação dupla.

## 5.10 Circuitos pneumáticos práticos

### Exercícios treinamento FESTO

1. Circuito pneumático de uma prensa.

Solução:

A figura 5.33 indica um circuito pneumático de uma prensa simples.

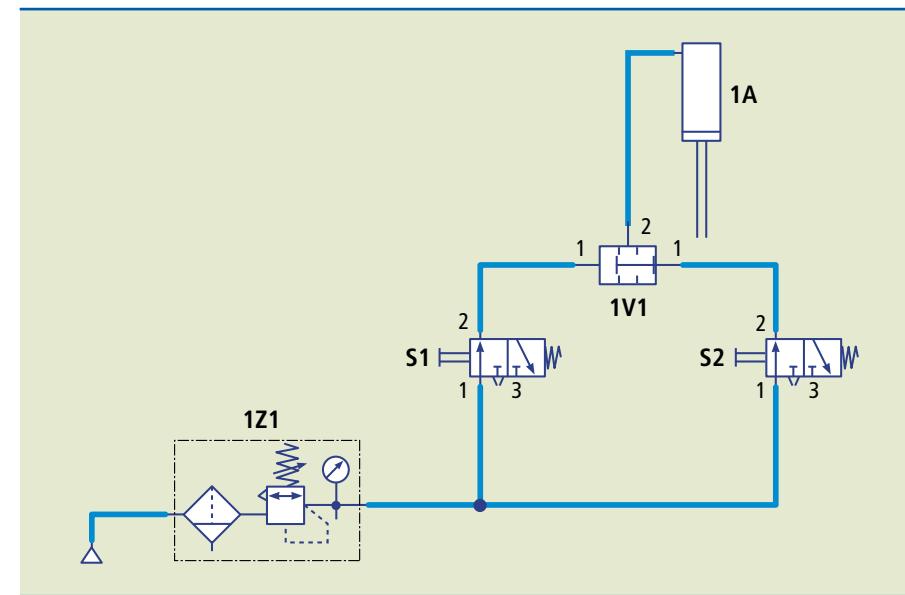


Figura 5.33

Círculo pneumático de uma prensa.

2. A figura 5.34 representa um dispositivo de alimentação de peças. O funcionamento do dispositivo ocorre com o avanço de um atuador de simples ação que desloca as peças para dentro de um sistema, retornando, em seguida, à sua posição inicial para nova alimentação.

O avanço do atuador ocorre pelo acionamento de um botão; e o retorno, pelo desacionamento do botão.

Solução:

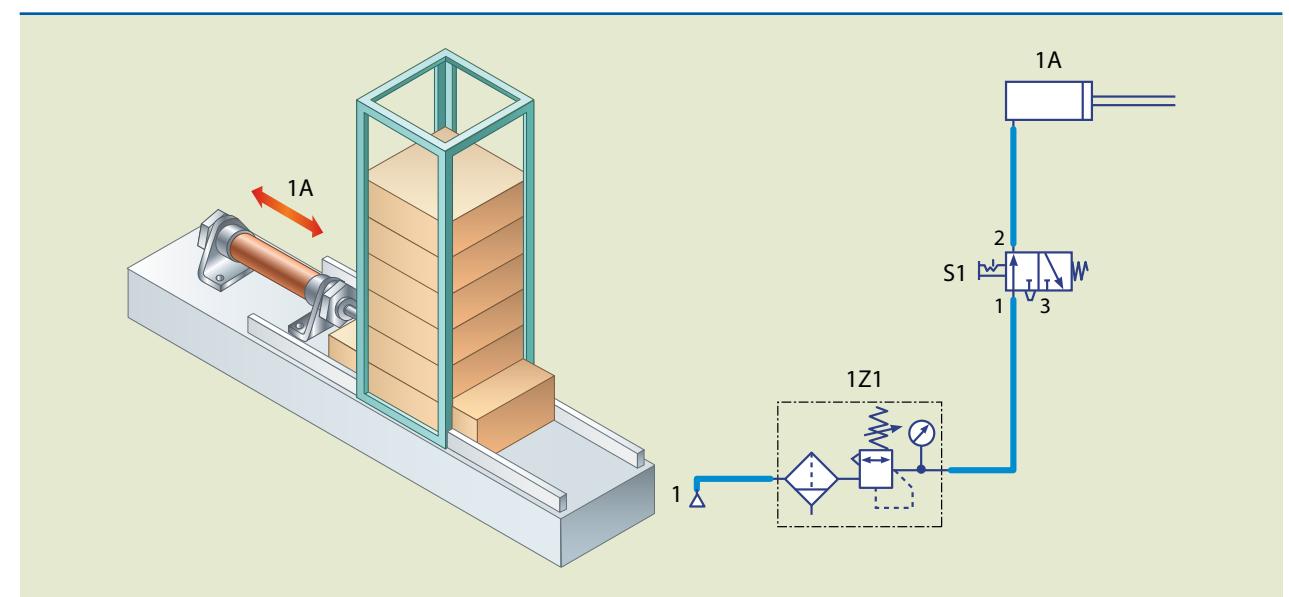


Figura 5.34

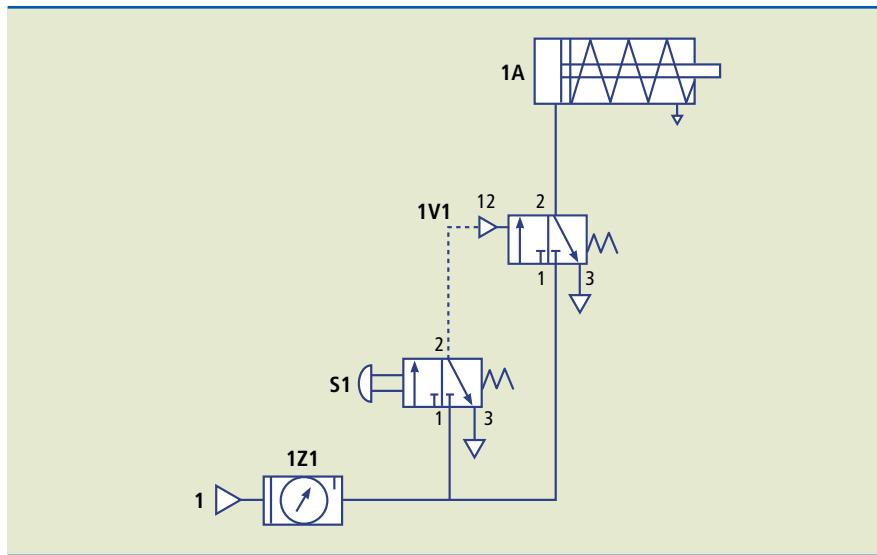
Representação do dispositivo e seu circuito pneumático.

3. Acionamento de cilindro de simples ação com uso de válvula direcional 3/2 NF com piloto positivo e com retorno por mola, através de um botão de acionamento 3/2 normal fechado (figura 5.35).

*Solução:*

**Figura 5.35**

Esquema do circuito pneumático.

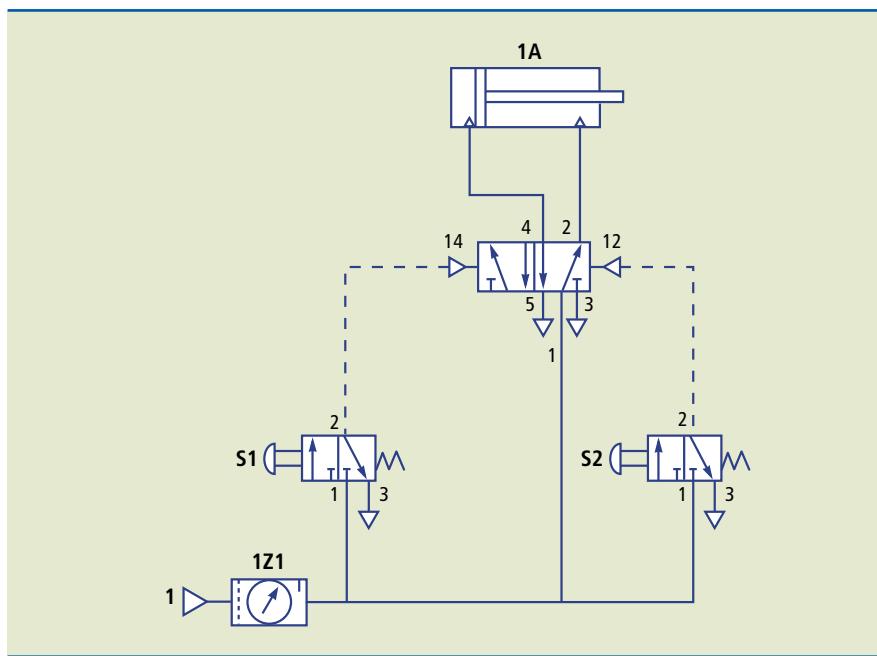


4. Acionamento de cilindro de dupla ação com uso de válvula direcional 5/2, bipilotada (pilotos positivos), através de dois botões de acionamento 3/2 NF para o avanço e recuo do atuador (ver circuito pneumático na figura 5.36).

*Solução:*

**Figura 5.36**

Círculo pneumático.

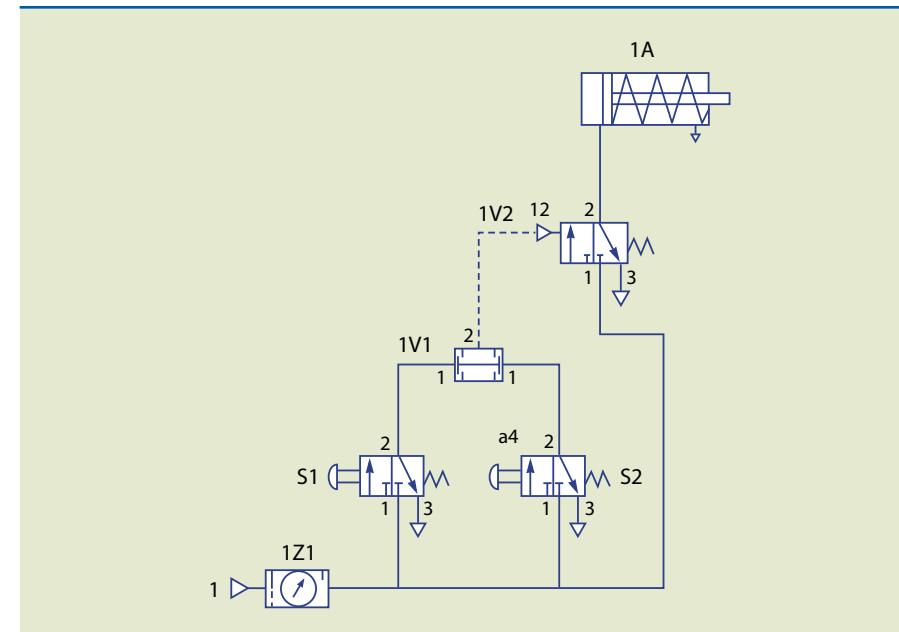


5. Acionamento de cilindro de simples ação com uso de válvula direcional 3/2 vias monopilotada (piloto positivo), através de dois botões de acionamento 3/2 vias NF para o avanço do atuador, com o uso do elemento "E" (confirmação de sinal). (Ver figura 5.37).

*Solução:*

**Figura 5.37**

Círculo pneumático.

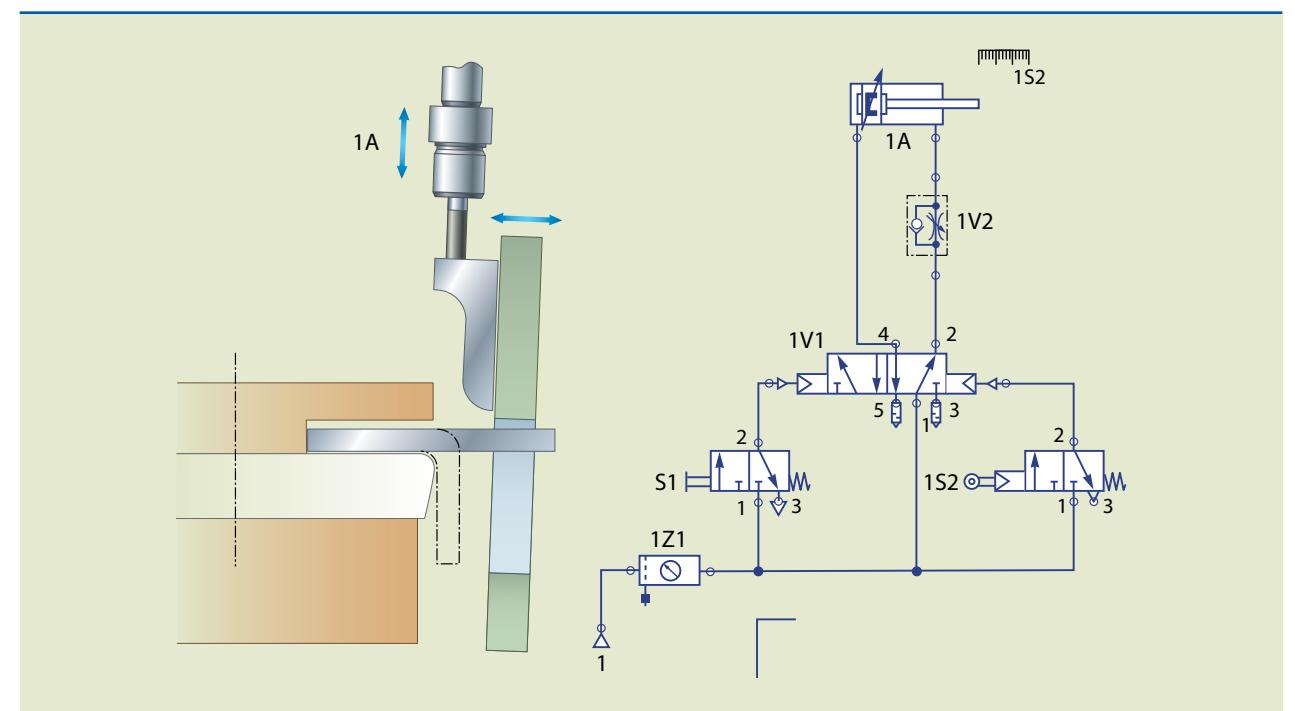


6. Um dobrador de chapas (figura 5.38) utiliza um atuador de dupla ação que dobra a chapa para baixo ao avançar, retornando em seguida automaticamente à sua posição inicial. O avanço do atuador é realizado com o acionamento de um botão S1. Elaborar o circuito pneumático para esse dispositivo.

*Solução:*

**Figura 5.38**

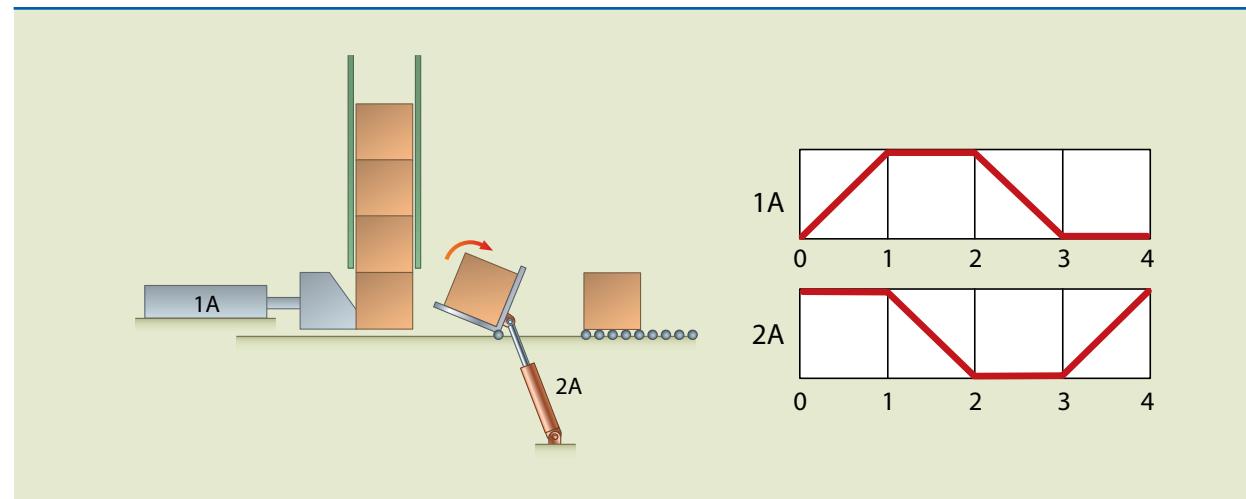
Representação do dispositivo e seu circuito pneumático.



7. A peça sob o magazine vertical é empurrada pelo atuador **1A** para o sistema basculante que gira 90° através do atuador **2A**, para então seguir pela esteira de roletes (veja figura 5.39). Na sequência, retorna o pistão **1A** e depois avança o pistão **2A**. Desenvolver o diagrama trajeto passo e o circuito pneumático para o dispositivo.

**Figura 5.39**

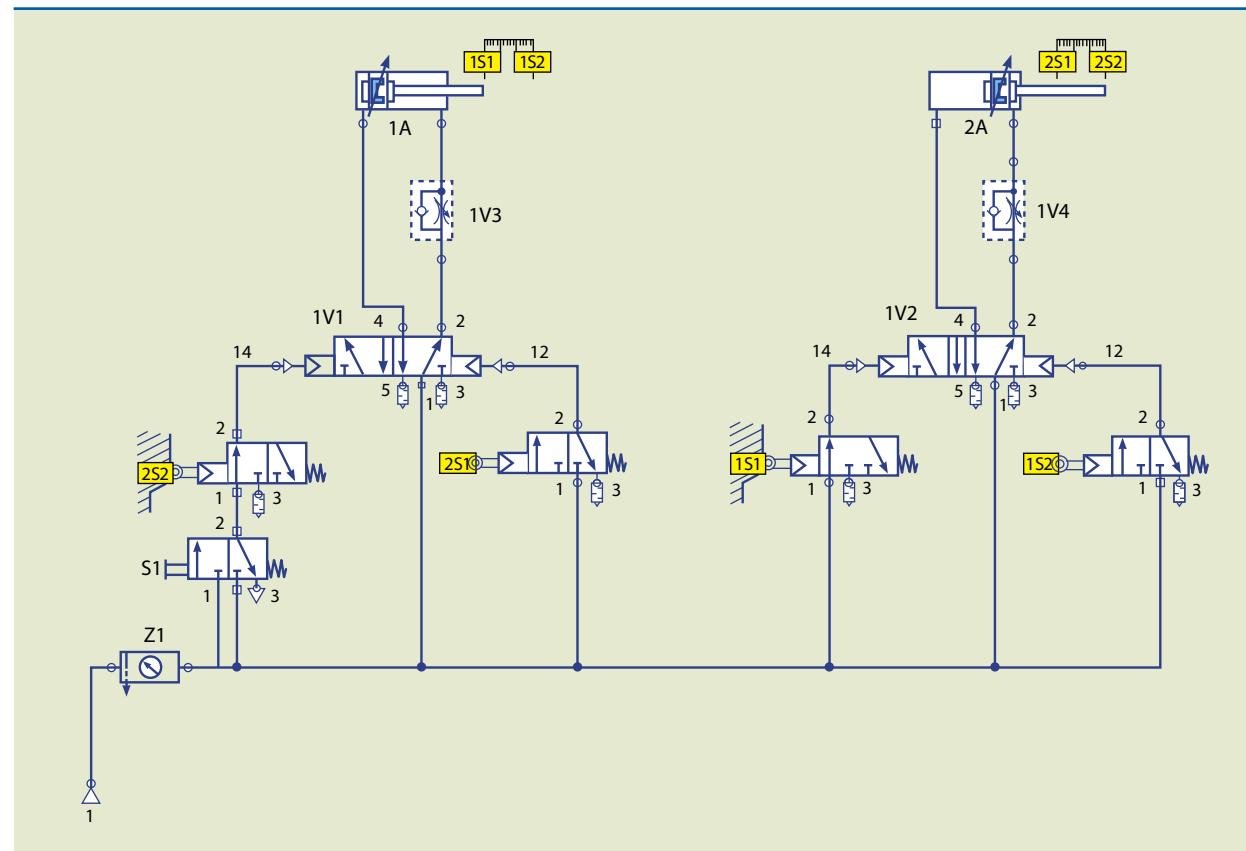
## Dispositivo e diagrama de trajeto passo.



**Figura 5.40**

Círculo pneumático.

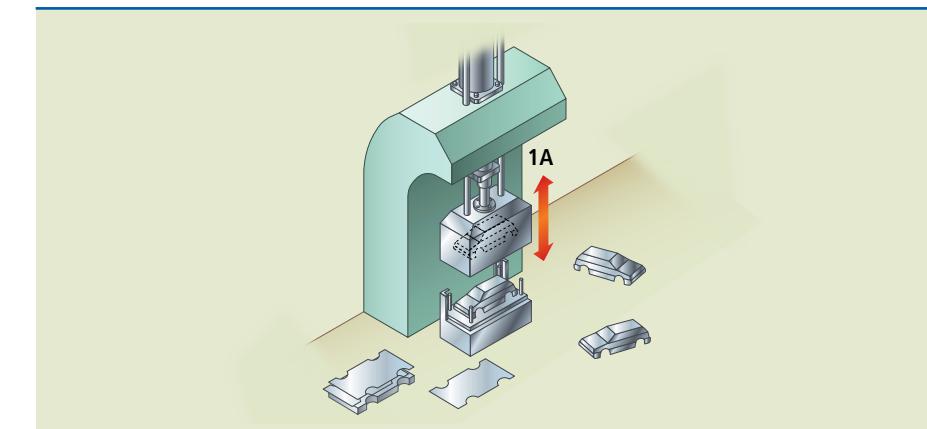
*Solução:*



**8.** Uma fábrica de brinquedos possui um dispositivo (figura 5.41) que executa automaticamente o estampo em placas de aço, funcionando com um atuador de dupla ação que deve avançar por meio do acionamento simultâneo de dois botões ( $S_1$  e  $S_2$ ), deslocando o estampador até a placa, permanecendo nessa posição por 10 segundos e retornando em seguida à sua posição inicial, mesmo que o operador continue com os botões acionados. Elaborar o circuito pneumático para esse dispositivo.

## Figura 5.41

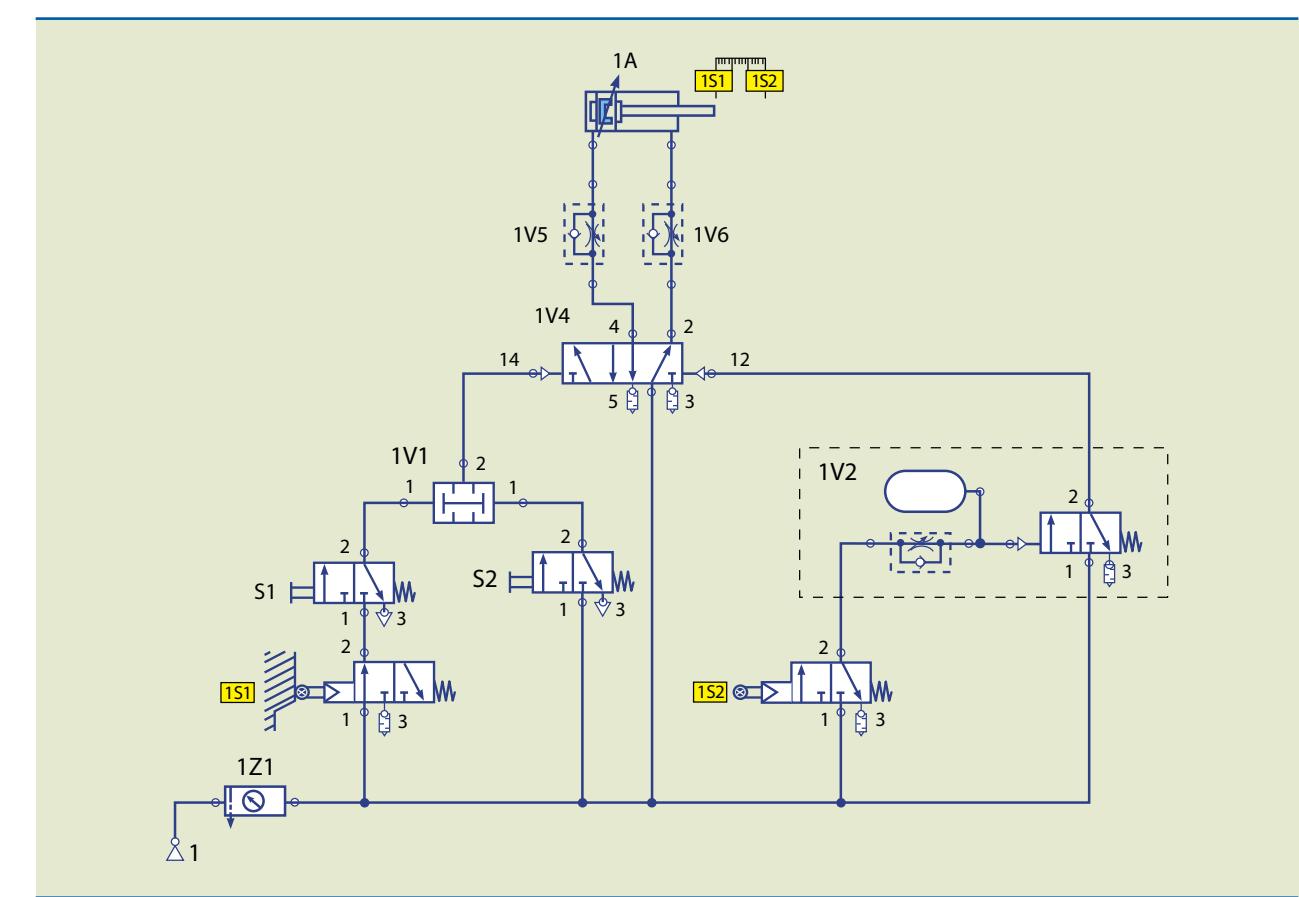
### Dispositivo.



## Figura 5.42

### Circuito pneumático.

### *Solução.*



# **Capítulo 6**

## **Sistemas eletropneumáticos**



**P**ela velocidade de transmissão e pela segurança, os sistemas eletropneumáticos substituem com vantagem os sistemas pneumáticos. As características intrínsecas dos elementos dos sistemas eletropneumáticos mostram-se mais adequadas na cadeia de comando, como sua construção, segurança e velocidade de operação.

#### Quadro 6.1

Comparação dos elementos essenciais para pneumática e eletropneumática

Pneumática	Cadeia de Comando	Eletropneumática
Atuadores (cilindros)	Elemento de trabalho	Atuadores (cilindros)
Válvula reguladora de fluxo Válvula de escape rápido	Elemento auxiliar (controle de velocidade)	Válvula reguladora de fluxo Válvula de escape rápido
Válvula 5/2 vias; 3/2 vias (piloto e mola)	Elemento de comando	Válvula 5/2 vias; 3/2 vias (solenóide)
Válvula "E", "OU" temporizadora, sequencial	Elemento processador de sinal	Contatores, contadores, relês, temporizadores
Botão, fim de curso	Elemento de sinal	Botão, fim de curso, sensores
Filtro + regulador de pressão + lubrificador	Fonte de alimentação	Fonte de energia elétrica 12Vcc ou 24Vcc 12, 24, 115 ou 230V

Observando a cadeia de comando no quadro 6.1, podemos considerar que a utilização de elementos essencialmente pneumáticos se restringe aos dois primeiros níveis (elemento de trabalho e elemento auxiliar), e todos os demais níveis estão voltados à utilização de sistemas elétricos. Com isso, nos sistemas eletropneumáticos, eliminamos nesses componentes as perdas por vazamentos, com melhora significativa no aumento da velocidade de transmissão de sinais e respostas dos elementos sensores.

Quando se comparam os sistemas elétricos aos sistemas pneumáticos, não se pode deixar de fazer uma analogia entre os dois sistemas, com base na forma de energia utilizada.

## 6.1 Alimentação

A **tensão** gerada na energia elétrica é medida em volt (V) corresponde à pressão usada no ar comprimido, medida em bar.

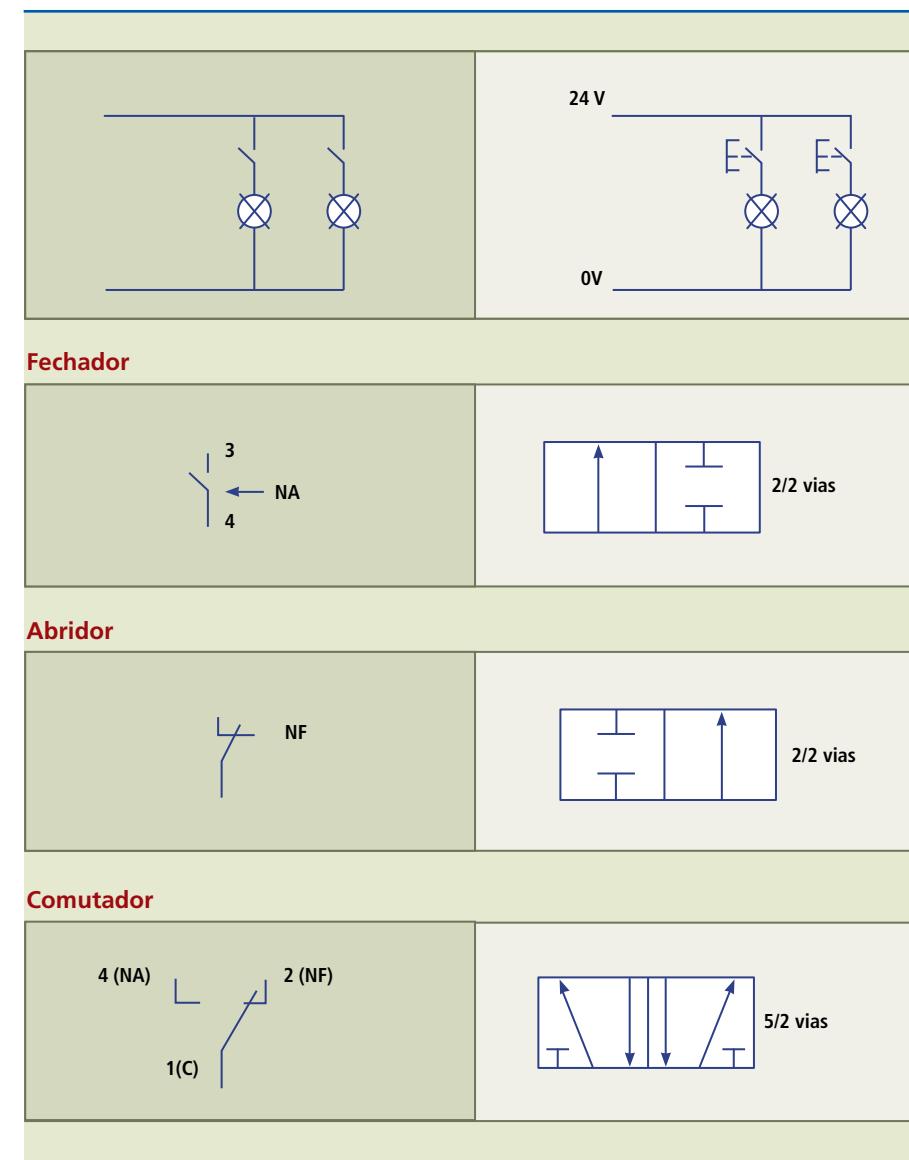
A **corrente elétrica** medida em ampère (A) corresponde à vazão medida em litros por minuto.

Elemento auxiliar: a **resistência ôhmica**, medida em ohm ( $\Omega$ ), corresponde à válvula reguladora de fluxo.

Elemento processador: o **capacitor** corresponde à válvula "E" ou "OU".

Elemento de comando: a **bobina** corresponde ao piloto.

### 6.1.1 Contatos NA (normal aberto), NF (normal fechado) e comutador (ver figura 6.1).



**Figura 6.1**  
Contatos NA, NF  
e comutador:

## 6.1.2 Instrumentos de medição

Voltímetro: medição de tensão elétrica.

Amperímetro: medição de corrente elétrica.

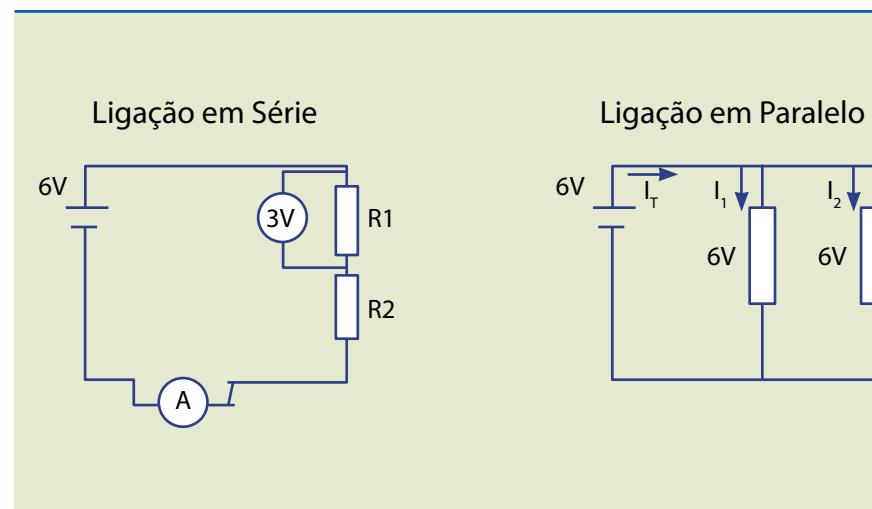
Ohmímetro: resistência ôhmica.

## 6.1.3 Tipos de ligação

Ligação em série e em paralelo (ver figura 6.2).

**Figura 6.2**

Ligação em série e ligação em paralelo.

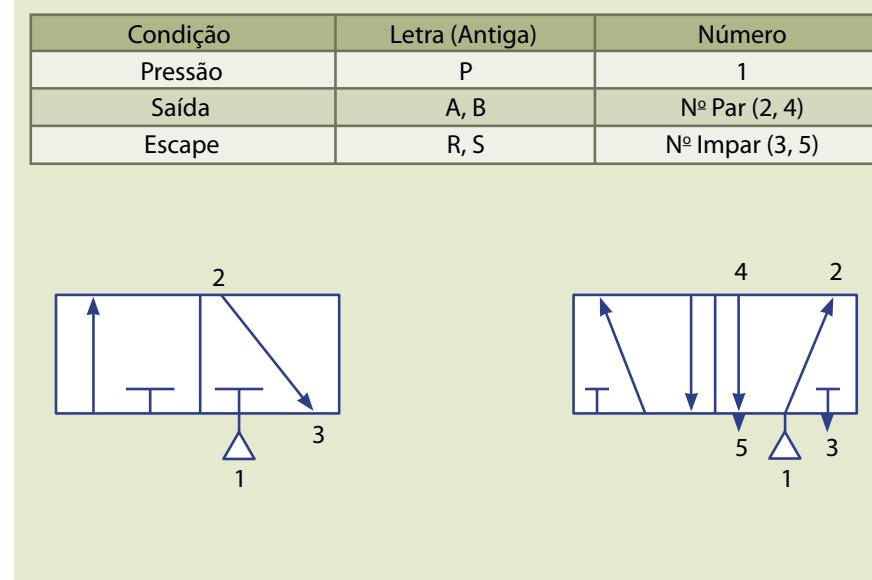


## 6.1.4 Codificação e norma (ver figura 6.3)

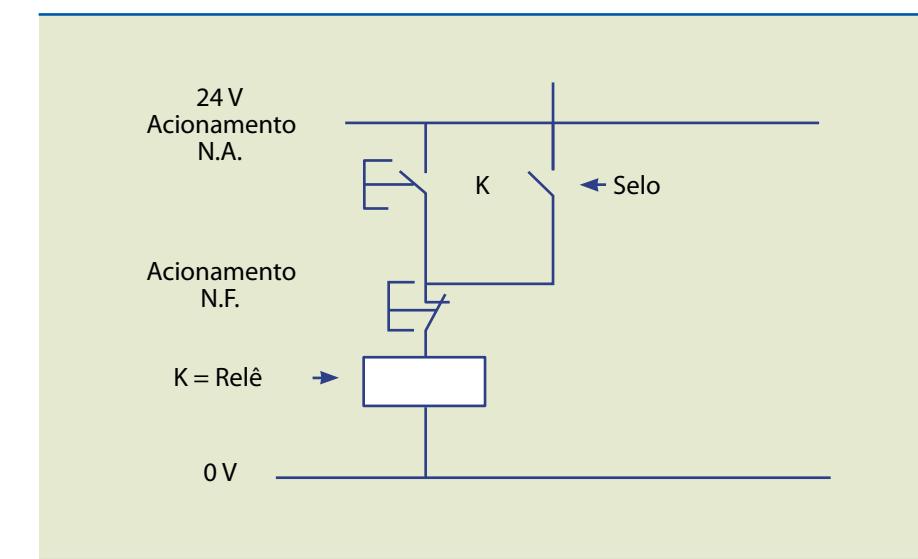
Norma: DIN/ISO 1219

**Figura 6.3**

Codificação e norma.



## 6.1.5 Representação de elementos de acionamento (ver figura 6.4)



**Figura 6.4**

Representação dos elementos de acionamento.

## 6.2 Componentes dos circuitos elétricos

São componentes dos circuitos elétricos:

- elementos de entrada de sinais elétricos;
- elementos de saída de sinais elétricos;
- elementos de processamento de sinais.

Os componentes de entrada de sinais elétricos emitem informações ao circuito por ações musculares (ou manuais), mecânicas, elétricas, eletrônicas ou combinação entre elas.

São eles: chaves fim de curso, sensores de proximidade, botoeiras, pressostatos etc.

Todos estes elementos são destinados a emitir sinal elétrico para energização ou desenergização do circuito.

### 6.2.1 Botoeiras

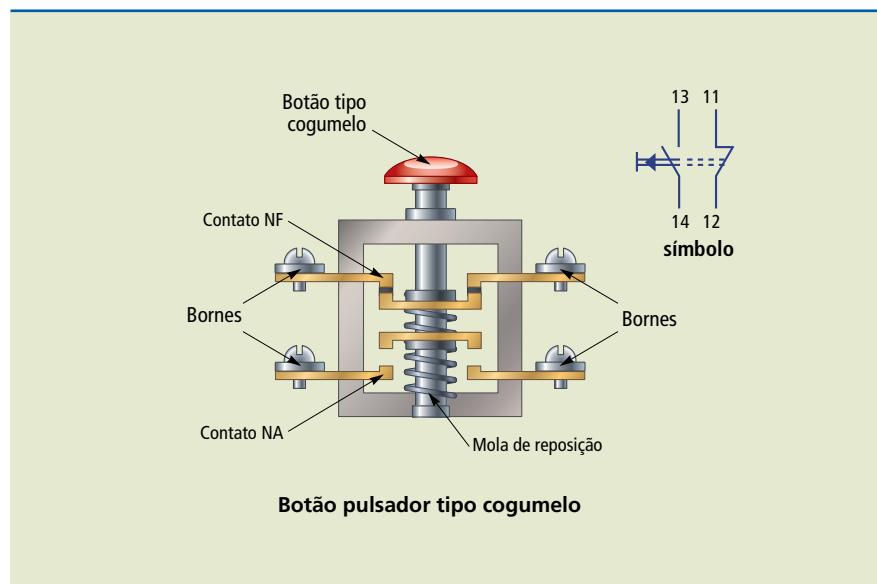
As botoeiras são elementos do circuito elétrico, acionadas manualmente, que apresentam um contato aberto e outro fechado. Em função do tipo de resposta enviada ao comando elétrico, as botoeiras são classificadas como pulsadoras ou com retenção.

#### Botoeiras pulsadoras

Invertem seus contatos mediante o acionamento de um botão e retornam à posição inicial quando cessa o acionamento, pela ação da mola de reposição (figura 6.5).

**Figura 6.5**

Representação de um botão pulsador do tipo cogumelo.



#### Botoeiras com retenção

Invertem seus contatos mediante o acionamento de um botão, entretanto permanecem acionadas e travadas, mesmo depois de cessado o acionamento.

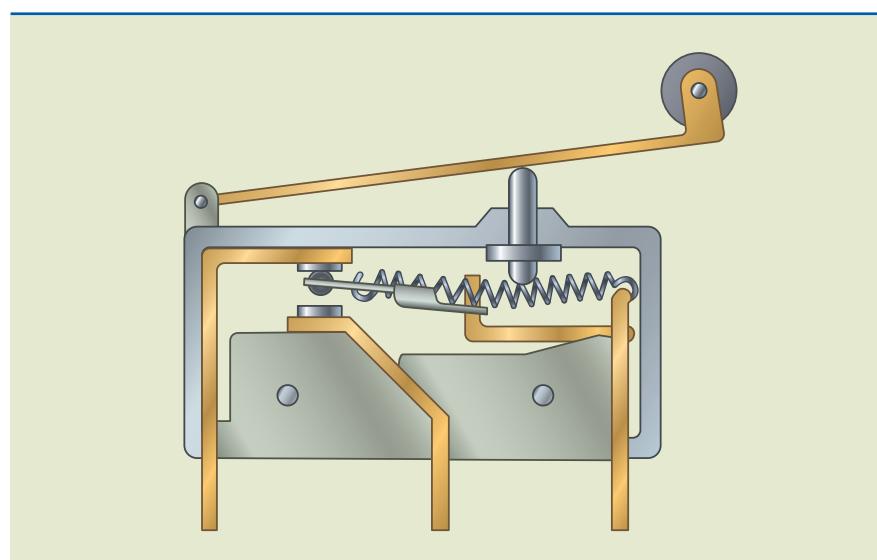
#### Chaves fim de curso

São comutadores elétricos de entrada de sinais, acionados por meio mecânico.

Geralmente são posicionadas no percurso de cabeçotes móveis de máquinas e equipamentos industriais, e nas hastes de cilindros hidráulicos e pneumáticos. O acionamento da chave fim de curso é executado pelo rolete mecânico que aciona a mola abrindo ou fechando o contato ou por meio de um gatilho (rolete escamoteável). Ver figuras 6.6 e 6.7.

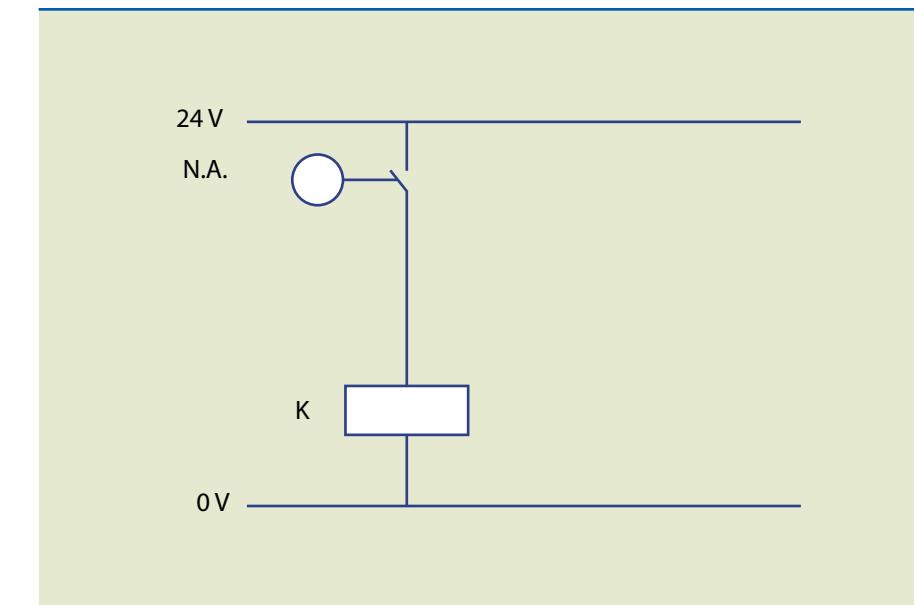
**Figura 6.6**

Rolete.



#### Acionamento por roletes

Ver na figura 6.7 esquema do acionamento por roletes em um circuito.

**Figura 6.7**

Indicação esquemática do acionamento por roletes em um circuito.

## 6.3 Sensores

### 6.3.1 Sensores de proximidade

São elementos emissores de sinais elétricos que são posicionados nos cabeçotes móveis de equipamentos e máquinas industriais e também em atuadores hidráulicos e pneumáticos.

O acionamento desses sensores independe de contato físico, como nos roletes; basta que essas partes móveis dos equipamentos aproximem-se dos sensores para que o sinal elétrico seja emitido.

Existem atualmente diversos tipos de sensores de proximidade. Os mais comuns na automação industrial (máquinas e equipamentos) são os sensores: indutivos, capacitivos, magnéticos, ópticos e ultrassônicos.

Além desses, existem sensores de pressão, volume e temperatura que têm ampla aplicação na indústria de processos.

Os sensores de proximidade possuem dois cabos de alimentação elétrica, um positivo e outro negativo, e um cabo de saída de sinal. No estado energizado, e ao se aproximar do material a ser detectado, o sensor emite um sinal de saída. Esse sinal (de baixa corrente) não pode ser utilizado para energizar as bobinas dos solenoides diretamente, pois os solenoides e outros componentes elétricos exigem maior potência na sua ativação. Esse detalhe exige a utilização de relés auxiliares, a fim de amplificar o sinal de saída dos sensores.

### Sensores de proximidade capacitivos

Registraram a presença de qualquer tipo de material.

Sua distância de detecção varia, dependendo da massa do material a ser calculada e das características determinadas pelo fabricante.

### Sensores de proximidade indutivos

Os sensores indutivos são capazes de detectar apenas materiais metálicos, e sua capacidade de detecção também depende do tamanho do material a ser detectado e das suas características específicas.

### Sensores de proximidade ópticos

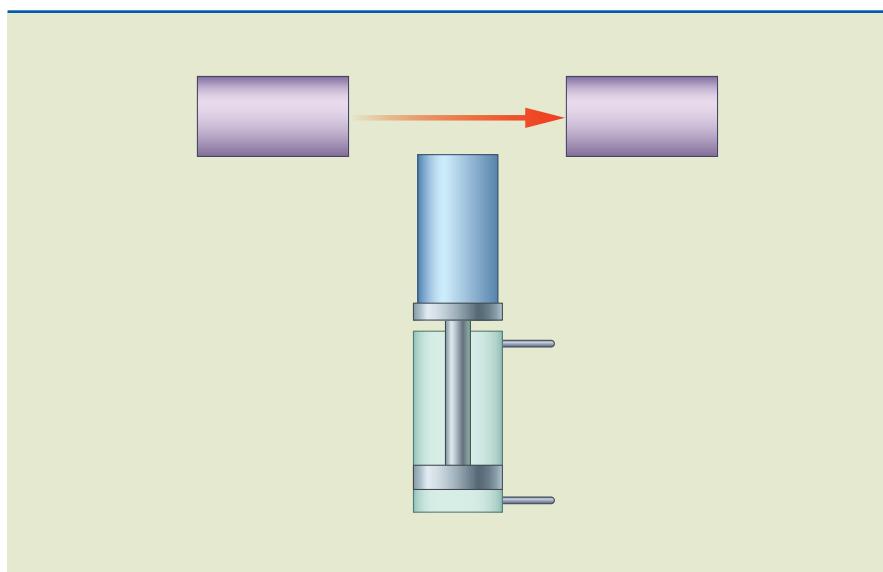
Percebem a aproximação de objeto não transparente. Sua distância de detecção pode variar de 0 a 100 mm, dependendo da luminosidade do ambiente, do tipo e do fabricante.

Esses sensores podem ser construídos em dois corpos distintos, sendo um emissor de luz e outro receptor ou em um único corpo.

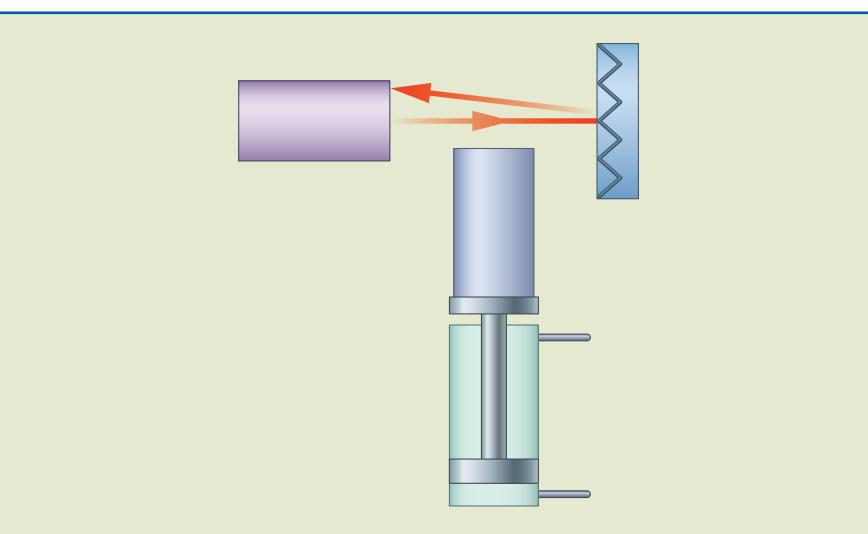
Quando um objeto se coloca entre o emissor e o receptor, a propagação da luz entre eles é interrompida, e um sinal de saída é enviado ao circuito elétrico de comando.

**Figura 6.8**

Sensor óptico construído em dois corpos distintos.



Há também o **sensor de proximidade óptico reflexivo**. O emissor e o receptor de luz são acoplados em um único corpo, tendo seu espaço reduzido, o que facilita seu acoplamento entre as partes móveis dos equipamentos industriais. Nesse tipo de sensor óptico, a detecção é comparativamente menor, pois a luz gerada pelo emissor deve refletir no material e ser captada no receptor.



**Figura 6.9**

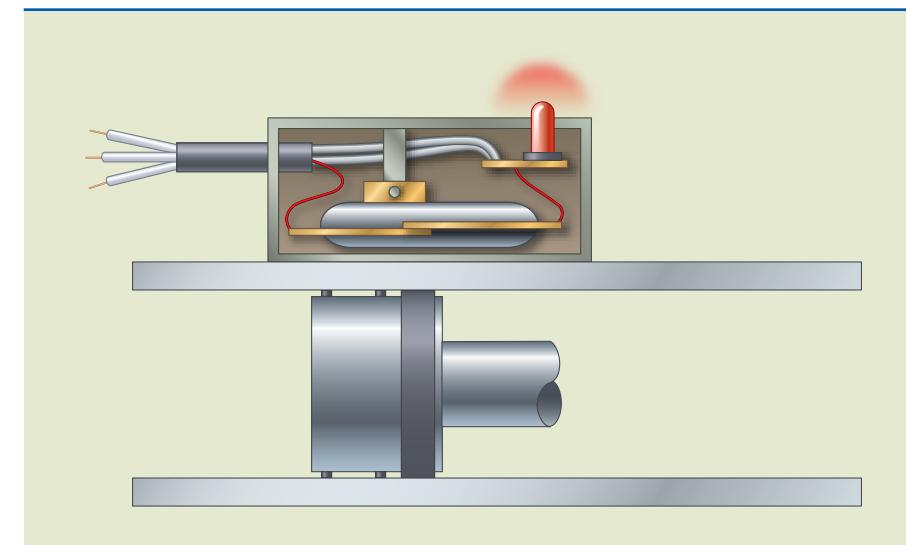
Sensor óptico construído em um único corpo.

### Sensores de proximidade magnéticos

Detetam apenas a presença de materiais metálicos e magnéticos.

Esses sensores (figura 6.10) são amplamente usados em máquinas e equipamentos pneumáticos pela facilidade de montagem, feita diretamente sobre as camisas dos cilindros dotados de êmbolos magnéticos.

O movimento do êmbolo magnético do cilindro faz com que ele passe pela região da camisa onde, externamente, está posicionado o sensor magnético. O sensor, por sua vez, emite um sinal ao circuito elétrico de comando.

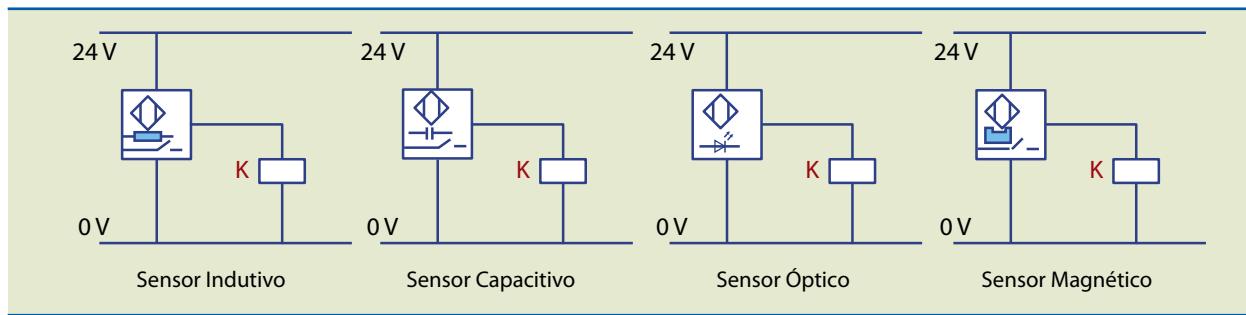


**Figura 6.10**

Representação de um sensor de proximidade magnético.

### 6.3.2 Simbologia dos sensores

A figura 6.11 mostra a simbologia dos quatro tipos de sensores de proximidade: indutivo, capacitivo, óptico e magnético.

**Figura 6.11**

Símbologia dos sensores.

## 6.4 Elementos de processamento de sinais

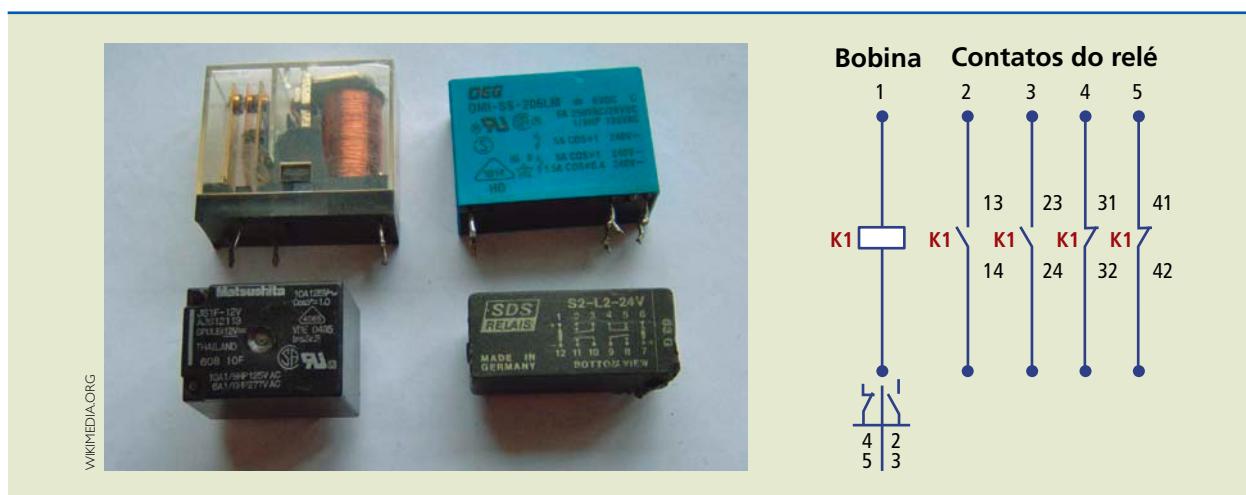
Os elementos de processamento de sinais elétricos analisam as informações emitidas ao circuito pelos elementos de entrada com a finalidade de que o comando elétrico apresente comportamento final desejado conforme as informações obtidas.

São eles: relés auxiliares, relés temporizadores e contadores, contatores de potência, e outros.

### 6.4.1 Relés auxiliares

O relé auxiliar é um elemento eletromagnético dotado de uma bobina eletromagnética, contatos móveis e contatos fixos. A corrente elétrica, ao energizar a bobina, produz um campo magnético movimentando o corpo móvel. O corpo faz com que os contatos abertos se fechem e os contatos fechados se abram, e a retirada da corrente da bobina provoca a volta do corpo móvel à posição normal. Isso ocasiona a abertura dos contatos abertos e o fechamento dos contatos fechados.

Há no mercado vários tipos de relés auxiliares que apresentam basicamente as mesmas características de funcionamento. A figura 6.12 indica relés e uma representação simbólica da bobina e dos contatos.

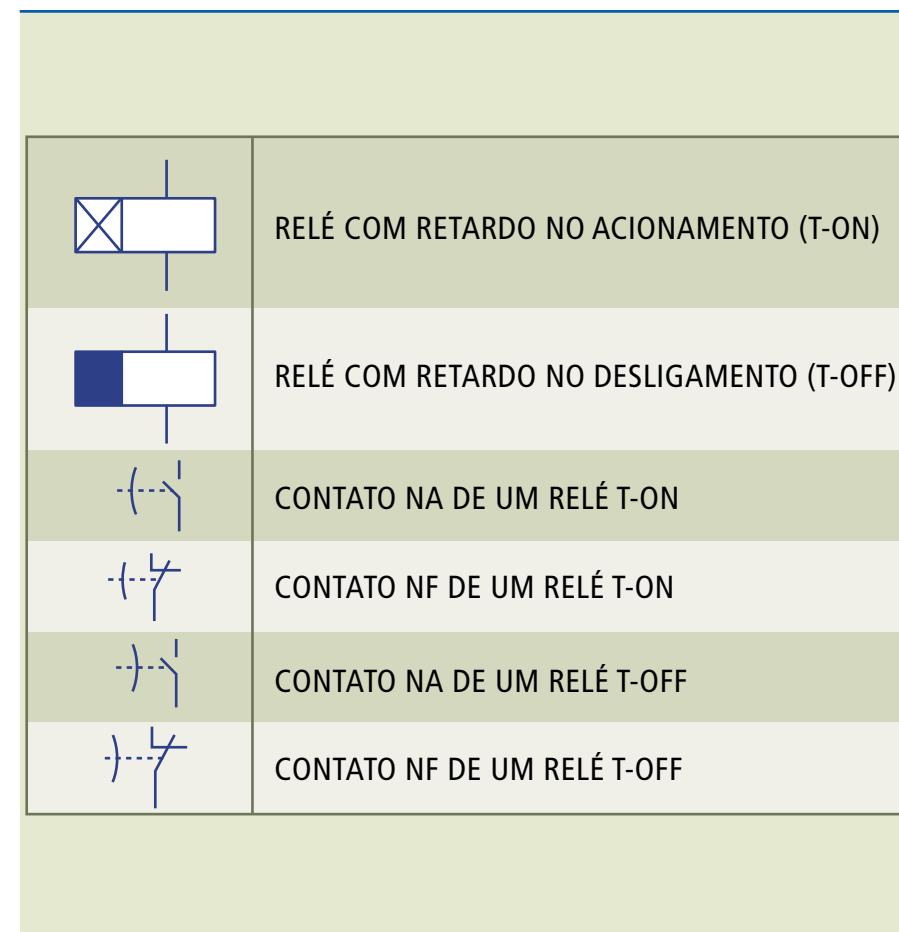


WIKIMEDIA.ORG

### 6.4.2 Circuito temporizado

Esse tipo de circuito pode ser usado para desligar sinais, mediante atraso deles, utilizando um relé do tipo temporizador.

Os relés temporizadores são indicados na figura 6.13.

**Figura 6.13**

Relés temporizadores.

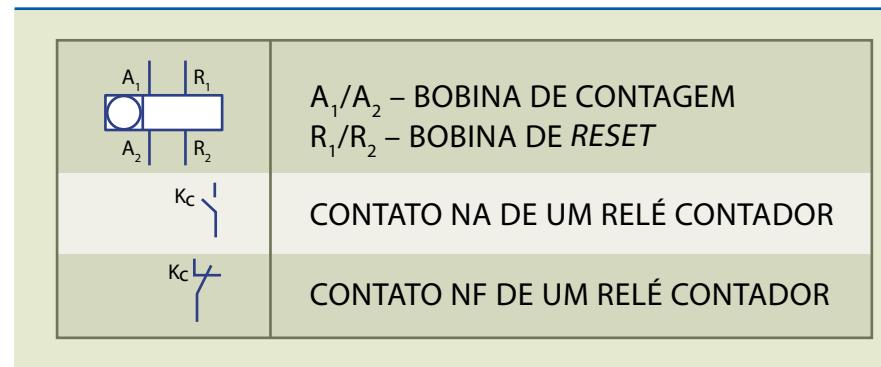
### 6.4.3 Circuito com contagem de eventos

O relé contador de evento (figura 6.14) é um elemento que necessita ser previamente programado para atuar após determinado número de eventos depois de ser atingido. Durante esse número de eventos, o circuito permite a circulação de corrente na bobina do relé fazendo o corpo móvel ser atraído e os contatos inverterem suas posições (os abertos fecham e os fechados abrem). Esse circuito que realiza a contagem necessita ser zerado para iniciar nova contagem. Essa operação é chamada de *reset*.

- $A_1/A_2$  – bobina de contagem
- $R_1/R_2$  – bobina de *reset*
- contato NA de um relé contador
- contato NF de um relé contador

**Figura 6.14**

Círcuito com contagem de eventos.



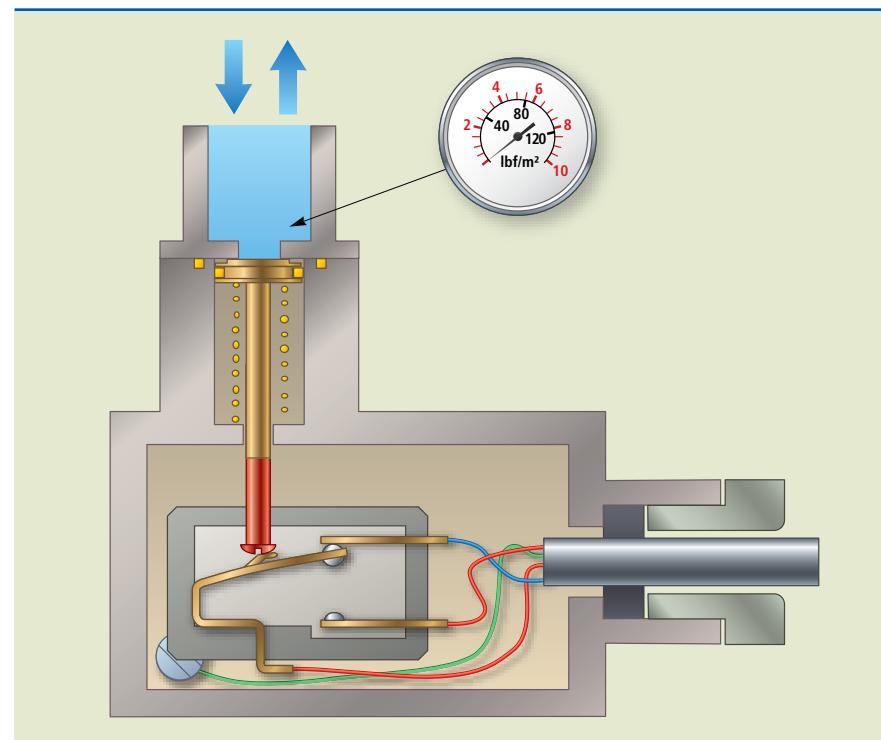
#### 6.4.4 Pressostato

O pressostato é um componente eletropneumático cuja função é regular a pressão. Essa regulação é necessária para evitar que uma máquina opere em pressões abaixo da pressão de trabalho.

A figura 6.15 indica uma representação esquemática de um corte de um pressostato típico. O pressostato é ligado à linha em que se deseja manter a pressão. A pressão do ar movimenta um elemento em seu interior (eixo de translação) que faz o contato ser aberto ou fechado. Quando a pressão é inferior à pressão de trabalho, não há força suficiente para movimentar o eixo, obstruindo a via graças a uma mola que o impede em sentido contrário à força do ar. O aumento da pressão do ar vai vencer a resistência da mola, deslocando o eixo para baixo e promovendo a mudança de contato. Se o pressostato está na posição NF, quando a pressão ultrapassar o valor pré-estipulado, ele comutará para NA.

**Figura 6.15**

Pressostato.



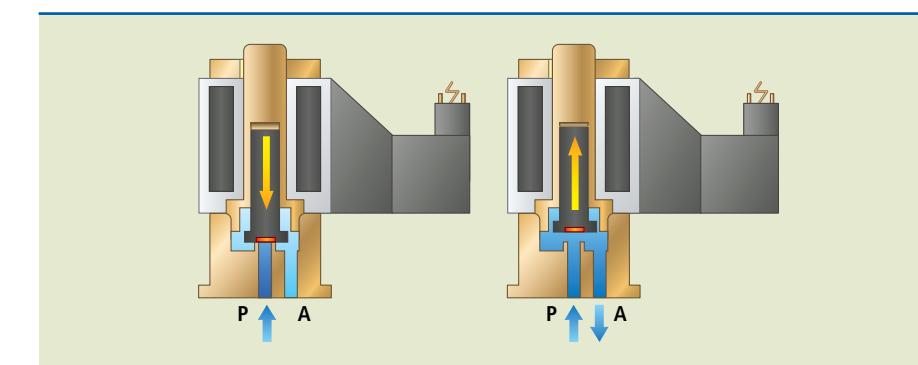
Se estiver na posição NA, ele se fechará quando a pressão for maior do que a pressão preestabelecida. Se a pressão de trabalho cair muito, o contato volta a sua posição original.

Com essa lógica é possível fazer o atuador não trabalhar com baixas pressões, e a máquina trabalha somente em condições ideais.

#### 6.4.5 Solenoide

O solenoide é um ímã permanente que tem a finalidade de atrair o eixo das válvulas. É responsável pela pilotagem (mudança na posição) das válvulas. Em outras palavras, são bobinas eletromagnéticas que, quando energizadas, geram um campo magnético que atrai elementos ferrosos, comportando-se como ímã permanente.

A bobina do solenoide é enrolada no magneto fixo e este conjunto é fixado à carcaça da válvula, seja ela hidráulica ou pneumática (eletroválvula). O magneto móvel é fixado diretamente na extremidade de seu carretel. No momento em que a corrente elétrica percorre a bobina, é gerado um campo magnético que atrai os magnetos e empurra o carretel da válvula na direção oposta à do solenoide que foi energizado, mudando a posição do carretel no interior da válvula (figura 6.16).

**Figura 6.16**

Solenoide desenergizado e solenoide energizado.

### 6.5 Circuitos eletropneumáticos

É o conjunto de elementos de comando e de acionamento, compostos de componentes pneumáticos e elétricos montados em máquinas e equipamentos industriais, cuja interação entre esses elementos gera os movimentos necessários ao funcionamento do sistema mecânico. A pneumática proporciona o acionamento de partes mecânicas e a elétrica, a sequência de comando dos elementos pneumáticos necessários para movimentar as partes móveis de máquinas e equipamentos.

Alguns circuitos eletropneumáticos básicos são usados em máquinas e equipamentos industriais. A seguir, apresentamos alguns exemplos e também alguns métodos para sua obtenção. A abordagem da apresentação é utilizar exemplos para ilustrar os métodos.

### 6.5.1 Método intuitivo

No método intuitivo utiliza-se do raciocínio humano na busca da solução de uma situação, podendo assim obter diferentes soluções para uma mesma questão, característica principal deste processo. Neste método, a solução apresentada nem sempre é a mais otimizada.

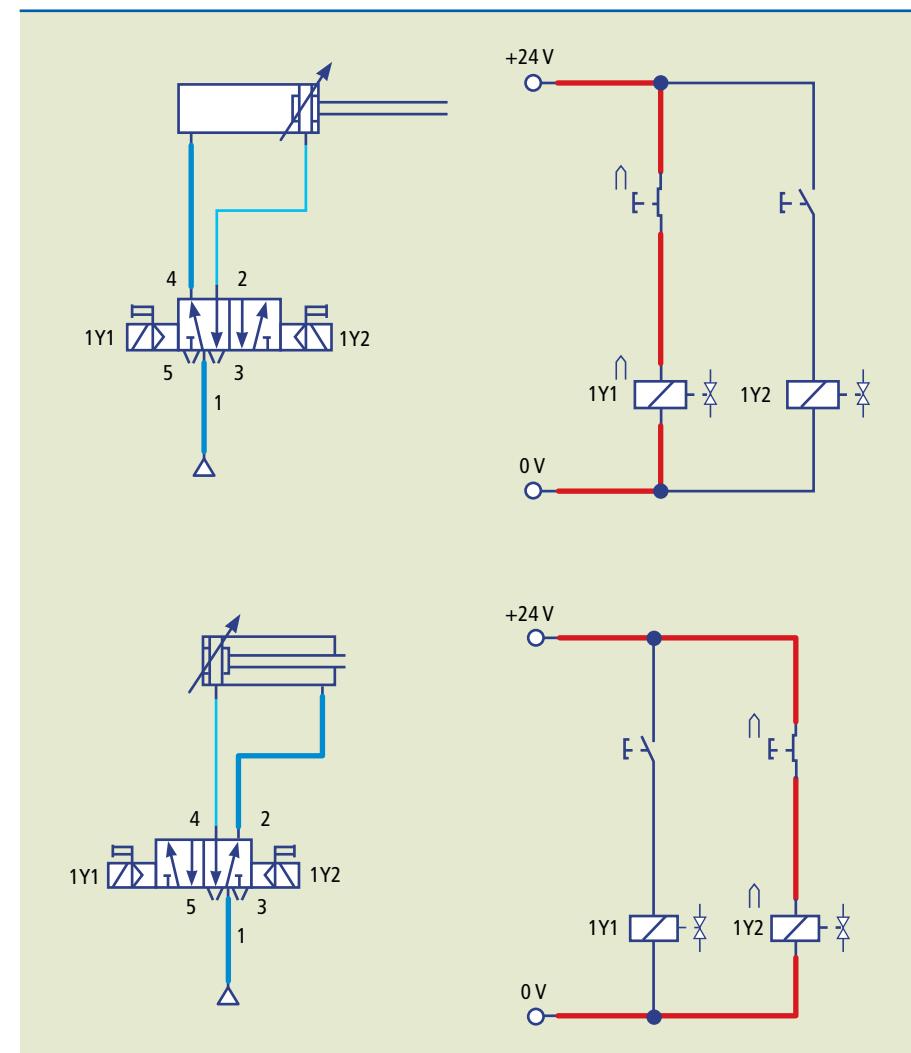
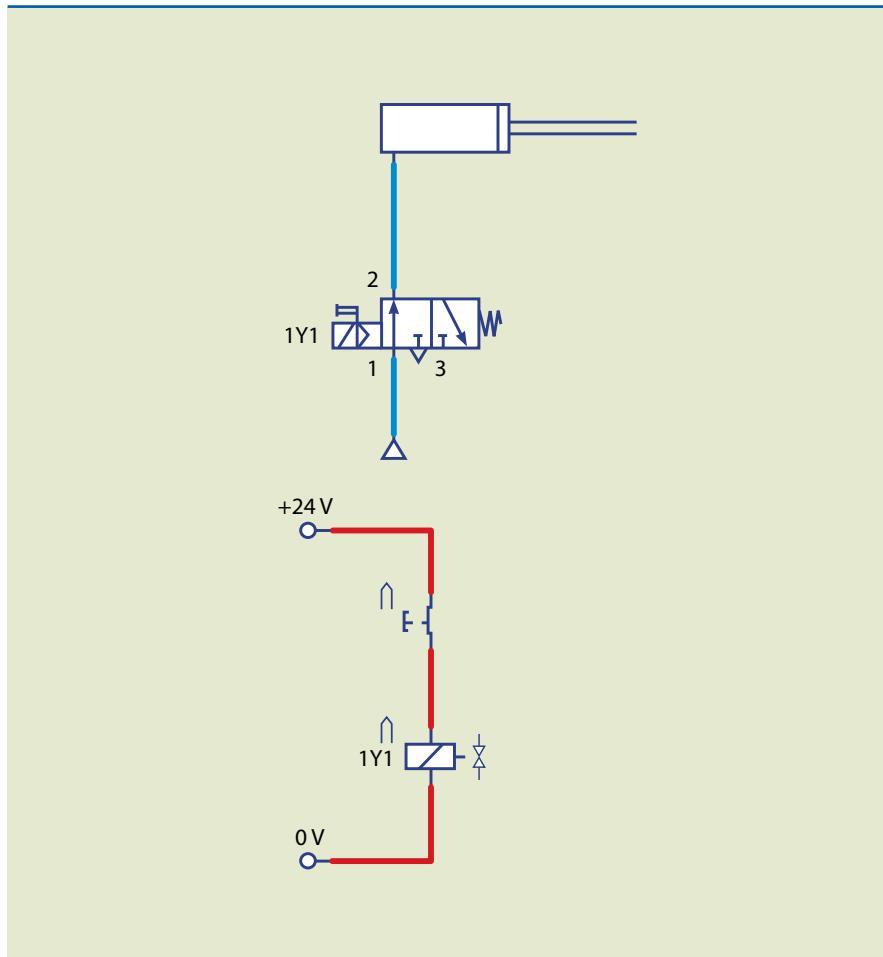
A figura 6.17 esquematiza uma solução de montagem de um atuador de simples ação acionado eletricamente por uma botoeira normal aberta, energizando a bobina do solenoide da válvula 3/2 vias normal fechada com retorno por mola. Dessa forma, a comutação do carretel interno da válvula dá passagem ao ar comprimido, avançando o atuador. O retorno do atuador acontece quando o pulso elétrico é rompido, fazendo com que a mola da eletroválvula entre em ação, fechando a alimentação do ar comprimido (conexão 1) e escapando o ar proveniente do atuador para a atmosfera através da conexão 3, onde está alocado o silenciador. Dessa forma, sem o suprimento de ar comprimido na conexão 2, o atuador volta à posição inicial, pela ação de sua mola.

#### Comando direto

Ver exemplos de comando direto nas figuras de 6.17 a 6.20.

**Figura 6.17**

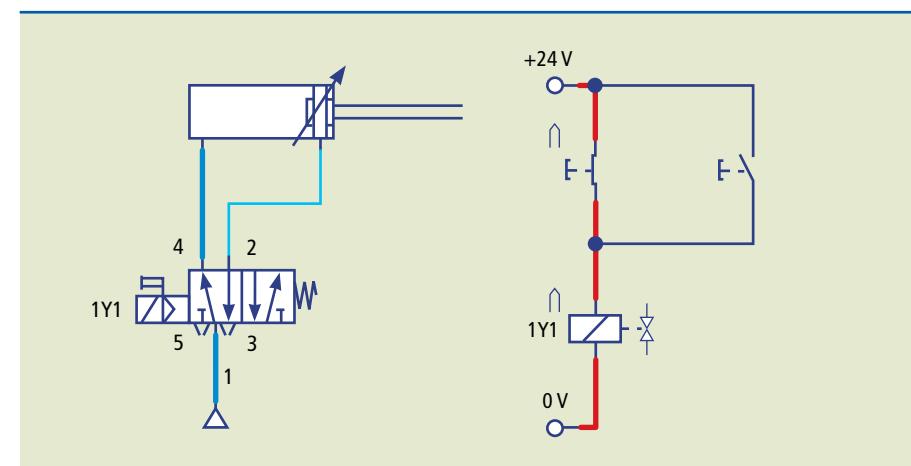
Círculo eletropneumático com acionamento direto.



Na figura 6.18, o acionamento de atuador de dupla ação se dá por meio de dois botões, um para energizar diretamente o solenoide 1y1, promovendo o avanço do atuador e o outro botão para energizar o solenoide 1y2, promovendo o recuo do atuador.

**Figura 6.18**

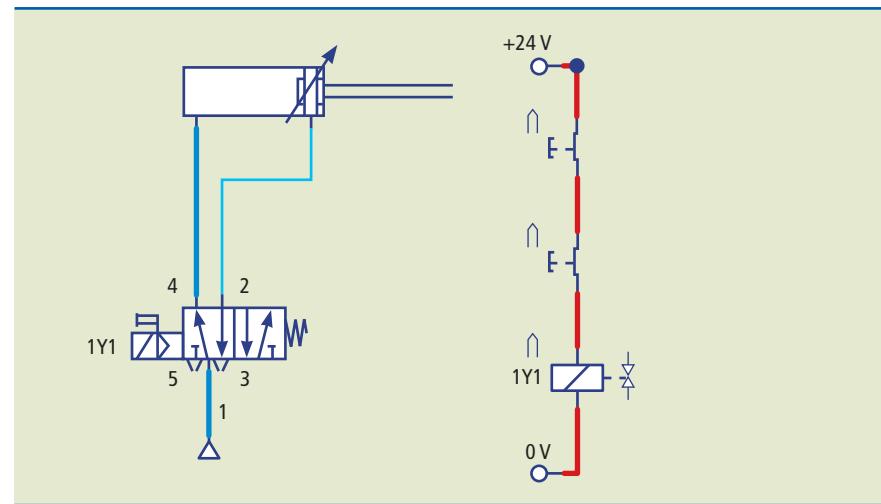
Cilindro de dupla ação acionado por dois botões.



A figura 6.19 representa um cilindro de dupla ação, acionado eletricamente por botão normal aberto, que é responsável por energizar, alternativamente, a eletroválvula monossolenóide com retorno por mola de cinco vias e duas posições possíveis de comutação, dessa forma, promovendo o avanço do atuador. O recuo do mesmo se dá pela comutação da eletroválvula provocada por sua mola, quando cessa o pulso elétrico proveniente de um dos botões. A essa lógica elétrica chamamos de lógica “OU”.

**Figura 6.20**

Cilindro de dupla ação acionado por comando bimanual.



Na figura 6.20, a lógica elétrica utilizada é chamada de lógica “E”, ou seja, tem-se a necessidade de acionamento simultâneo dos dois botões para que a eletroválvula seja energizada, promovendo o avanço do atuador de dupla ação. Para que o atuador retorne basta desativar um dos botões do circuito elétrico.

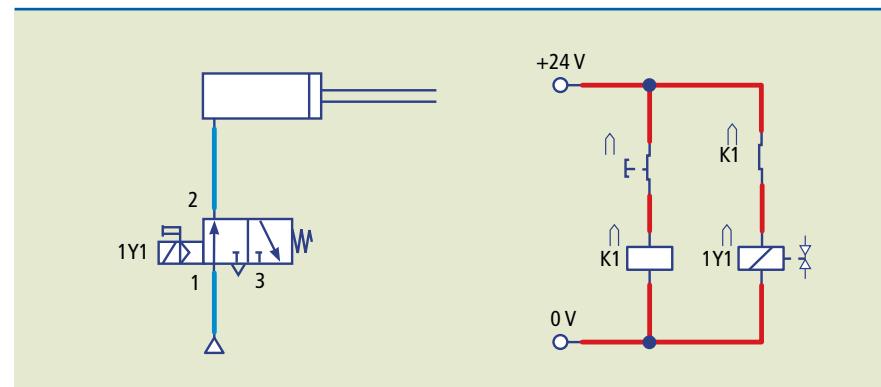
Esse tipo construtivo pode ser usado em presas. Exemplo: quando é necessário que o operador mantenha as duas mãos ocupadas durante a operação de estampagem para acionamento do sistema, utiliza-se esse tipo construtivo evitando, assim, acidentes de trabalho envolvendo a mão do operador da máquina.

### Comando indireto

O comando indireto se faz com o uso de relés (ver exemplo na figura 6.21):

**Figura 6.21**

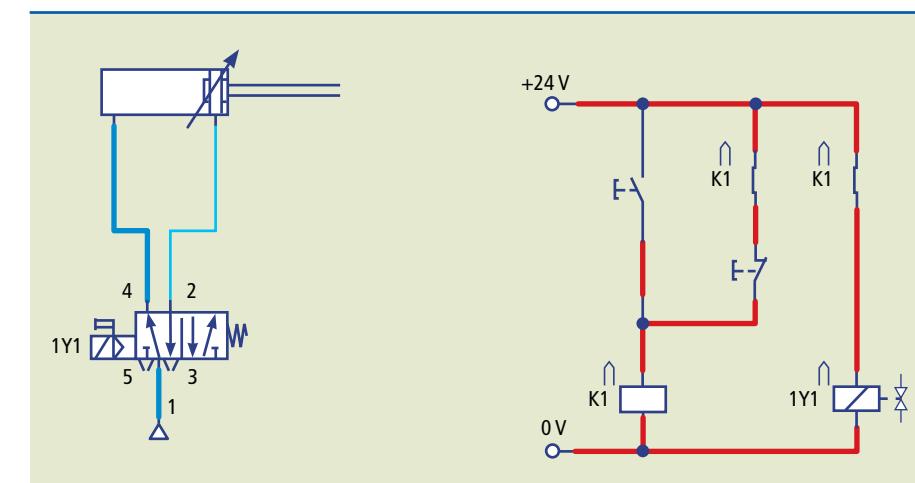
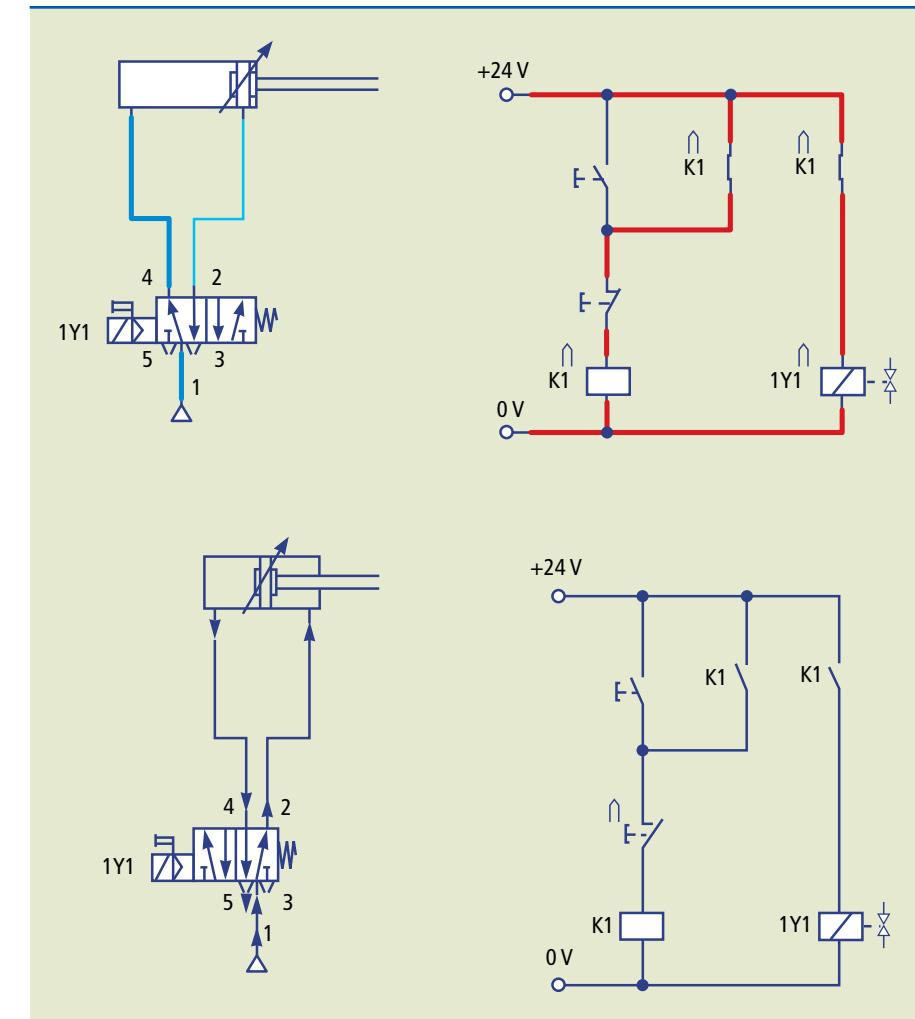
Comando indireto.



A mola provoca o retorno das válvulas simples do solenoide. Se 1Y1 está energizado, a força da mola é vencida e a válvula permanece pilotada. Para que o solenoide permaneça energizado com uma botoeira pulso, devemos utilizar o selo elétrico ou a autorretenção (figuras 6.22 e 6.23).

**Figura 6.22**

Selo elétrico e desligar dominante.

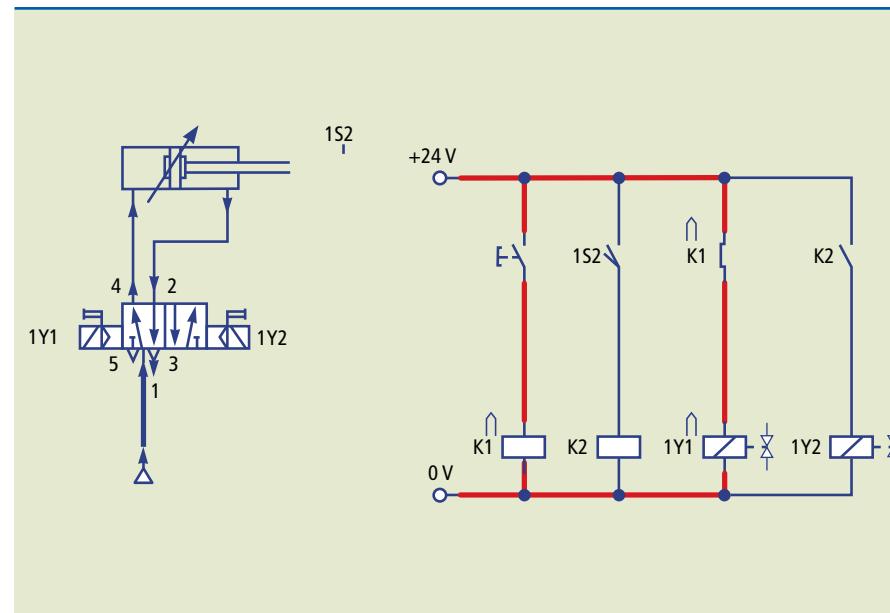
**Figura 6.23**

Selo elétrico e ligar dominante.

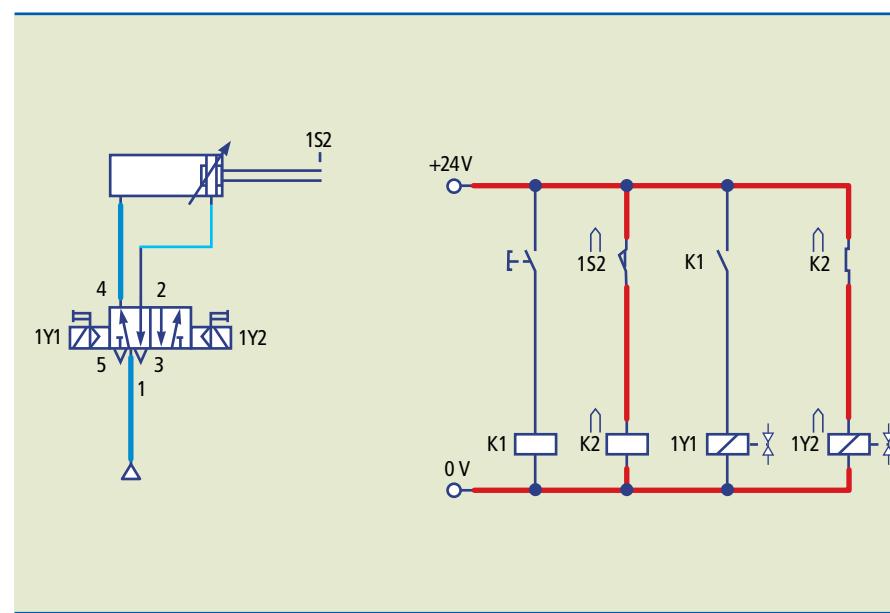
Veja outro exemplo: um cilindro de ação dupla deve avançar ao ser acionado um botão e retornar automaticamente ao atingir o final do curso de avanço (ciclo único). Nas figuras 6.24 e 6.25 apresentamos uma solução. Como o método é intuitivo, desafiamos o leitor a apresentar outras soluções para a situação.

**Figura 6.24**

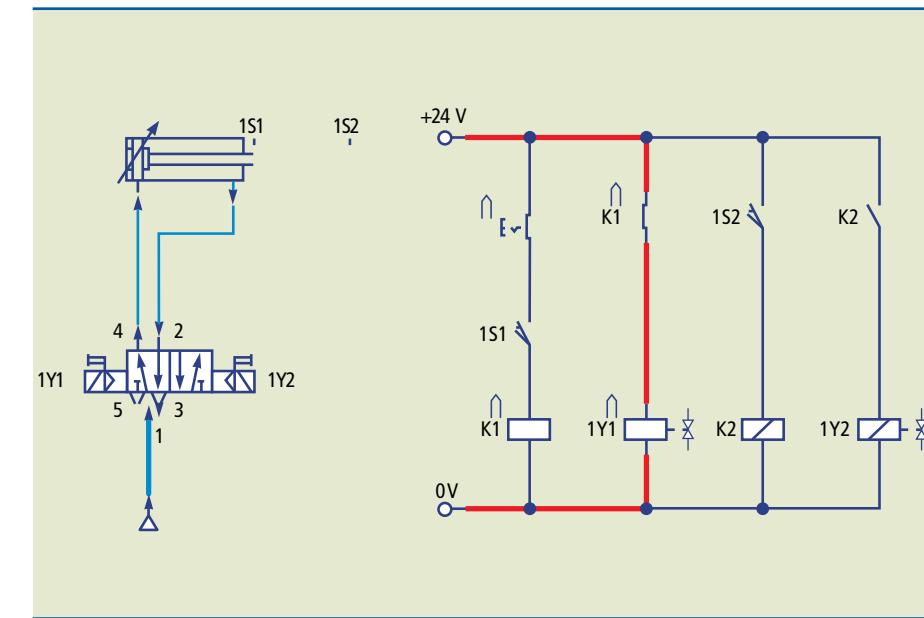
Cilindro de ação dupla e circuito exemplo (1).

**Figura 6.25**

Cilindro de ação dupla e circuito exemplo (2).



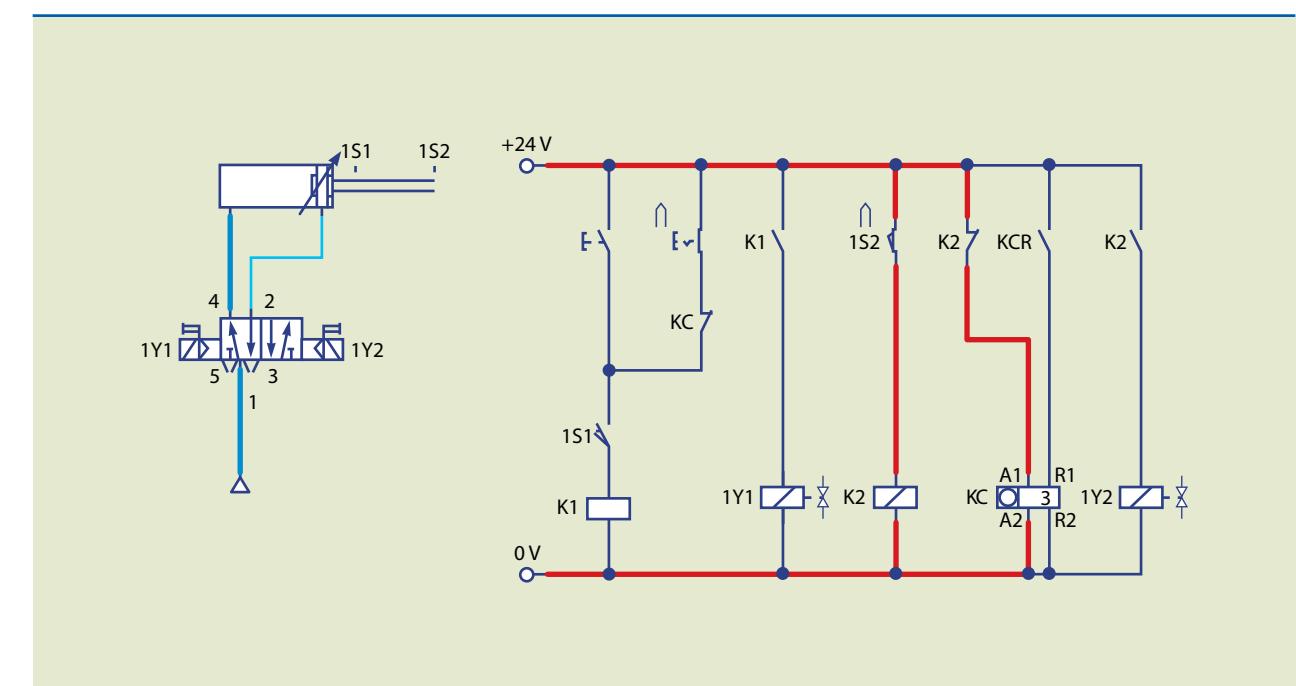
E se a máquina requerer um ciclo contínuo? Se o operador mantiver o botão com trava acionado, o atuador avançará e não retornará até que ele desabilite o botão. Isso porque, quando o cilindro chegar até o fim de curso 1S2, energizando 1Y2, haverá um corte de sinal em 1Y1, 1S1 desabilitado, e o cilindro poderá recuar (ver figura 6.26).

**Figura 6.26**  
Ciclo contínuo.

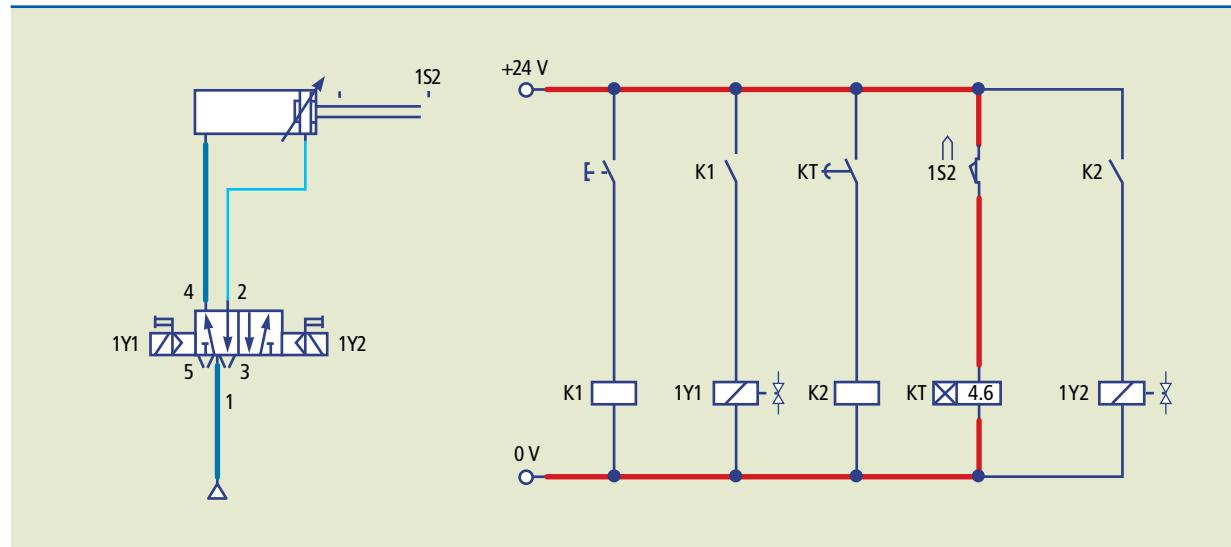
Um cilindro pneumático de ação dupla deve avançar e retornar automaticamente, uma vez pressionado um botão de partida. Um segundo botão deverá ser usado para efetuar o avanço e o retorno do cilindro, em ciclo contínuo limitado, isto é, o número de ciclos deve poder ser selecionado, de acordo com a vontade do operador (solução na figura 6.27).

**Figura 6.27**

Relé contador:

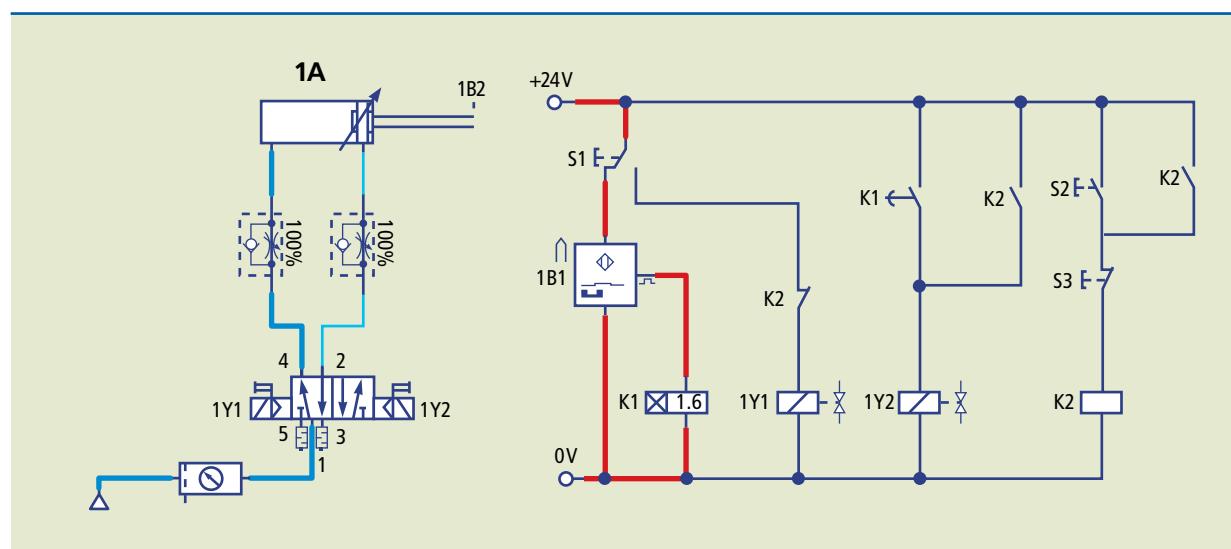


Um cilindro de ação dupla deve avançar acionando-se um botão de partida, permanecer parado por cinco segundos no final do curso e retornar automaticamente (ver figura 6.28).

**Figura 6.28**

Relé temporizador.

A figura 6.29 representa o mesmo circuito da figura 6.28, porém com o uso de sensor capacitivo para detecção de fim de curso.

**Figura 6.29**

Círculo alternativo com o uso de sensor capacitivo.

O método intuitivo não obedece a nenhuma regra, e o circuito depende inteiramente do talento e raciocínio do projetista.

Observe a sequência:

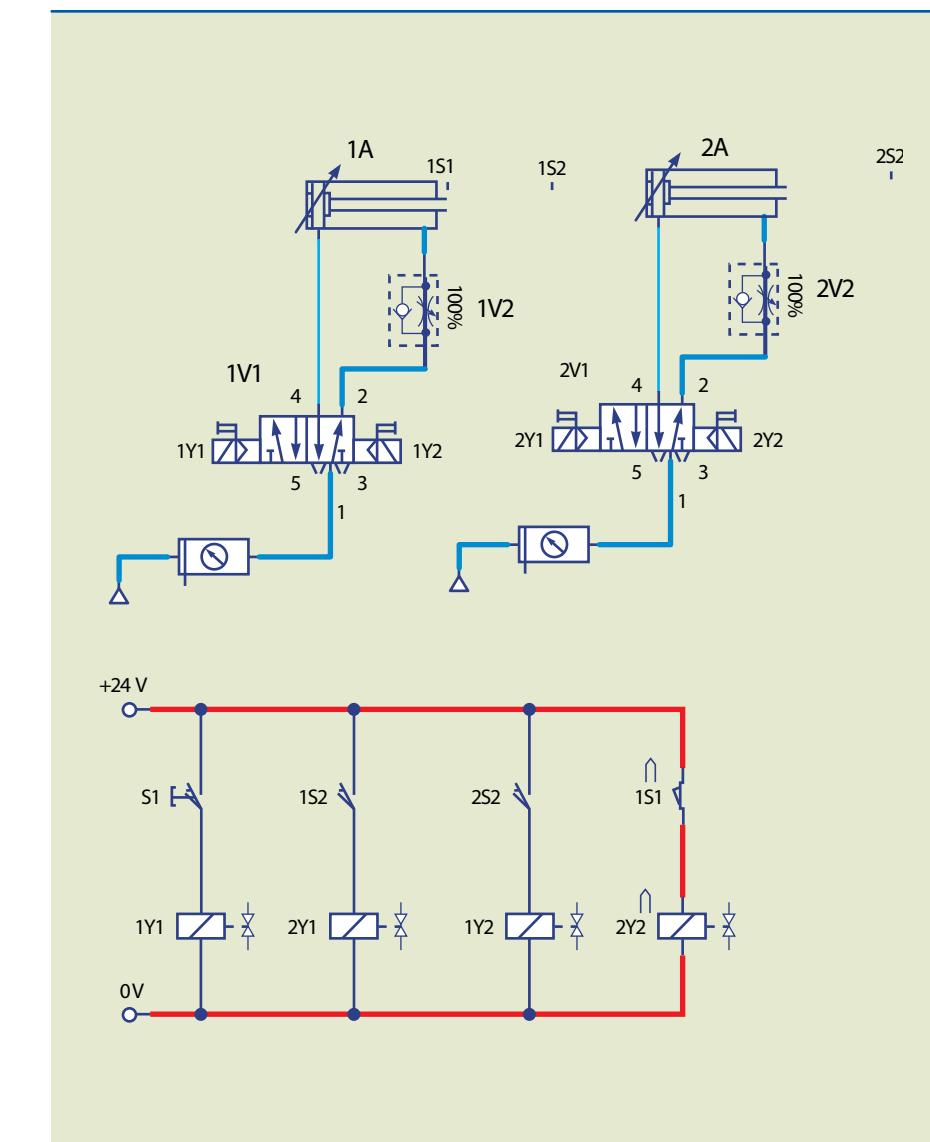
**1A+ 2A+ 1A- 2A-**

em que:

o sinal + significa avanço do atuador;

o sinal - significa retorno do atuador.

Desse modo, a designação adotada indica que o cilindro 1A avança, depois o cilindro 2A avança, na sequência o cilindro 1A recua e o cilindro 2A também recua, em eventos sucessivos. Veja o circuito da figura 6.30.

**Figura 6.30**

Círculo eletropneumático da sequência 1A+ 2A+ 1A- 2A-

Se separarmos a sequência de movimentos na metade e compararmos ambos os lados, veremos que um é exatamente igual ao outro, desprezando-se os sinais:

**1A+ 2A+ | 1A- 2A-**

Ou seja, a ordem de retorno dos cilindros acompanha a ordem de avanço. 1A avança primeiro e retorna primeiro. 2A avança em segundo lugar e retorna na mesma ordem.

Os solenoides são numerados de acordo com a seguinte regra:

Solenóide 1Y1 – o primeiro número 1 diz respeito ao cilindro 1A, e o último número 1 indica que ele é o primeiro solenoide do cilindro 1A.

Assim também para o solenoide 2Y2 – o primeiro número 2 diz respeito ao fato de que ele pertence à válvula direcional que pilota o cilindro 2A, e o último número 2 indica que é o segundo solenoide da válvula, ou o solenoide da direita.

Entretanto, nem sempre é fácil elaborar circuitos usando sequências intuitivas. Veja o exemplo a seguir:

**1A+ 2A+ 2A- 1A-**

Leia a sequência e, usando algum *software* de simulação, tente resolvê-la.

À primeira vista parece muito fácil, mas, na prática, avançar 2A e em seguida retorná-lo pode complicar um pouco.

A seguir, apresentaremos métodos que poderão facilitar essa tarefa.

### 6.5.2 Método passo a passo

A forma de dividir uma sequência em setores ou linhas pelo método passo a passo é a mesma da pneumática pura, ou seja, cada movimento representa um setor.

Dessa maneira, a sequência **1A+ 2A+ 2A- 1A-** pode ser dividida assim:

**1A+ | 2A+ | 2A- | 1A-**  
 | | II | III | IV

Nesse método, o número de relés é igual ao número de linhas mais um. O circuito da sequência acima possui, portanto, 5 relés.

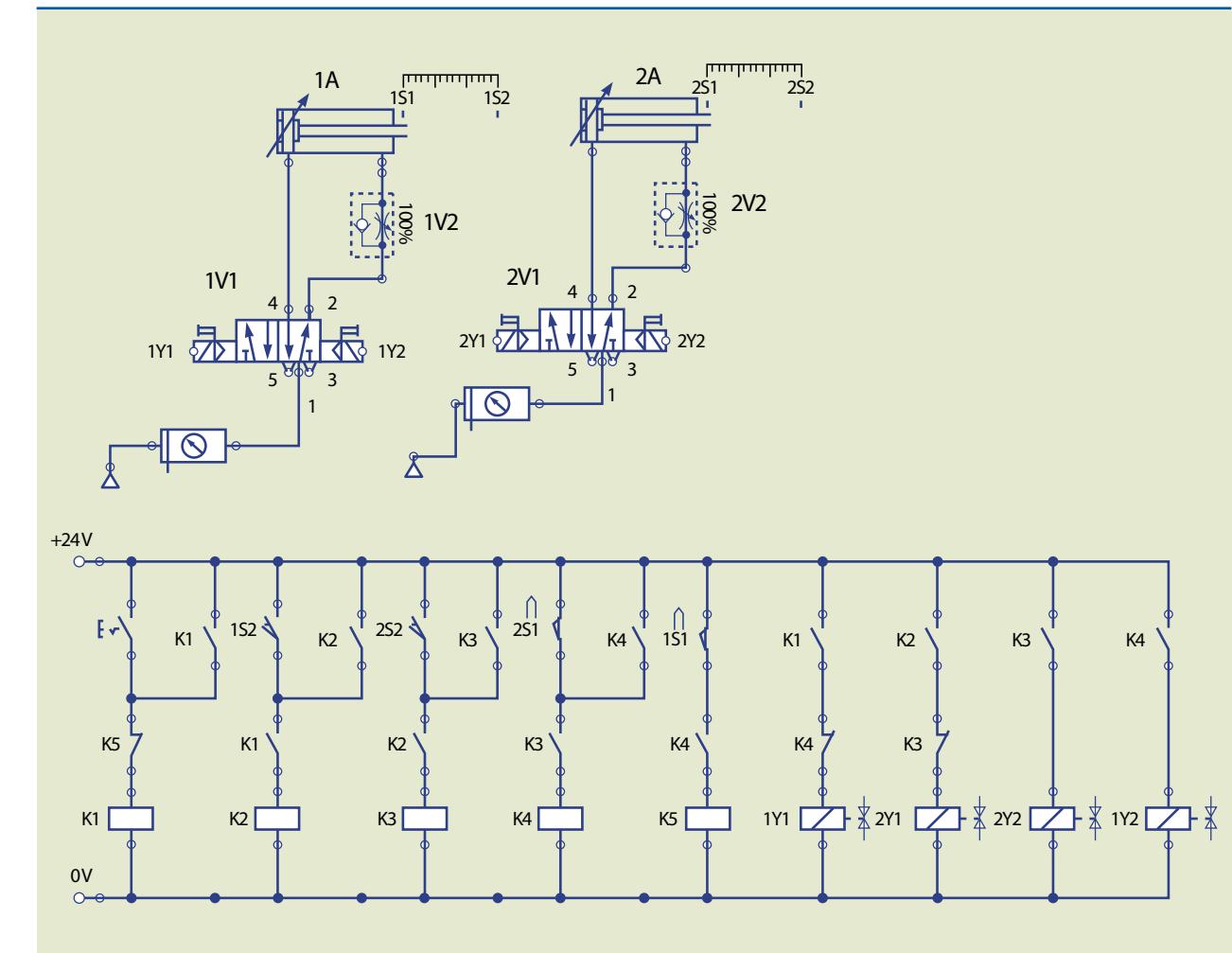
Em uma sequência com S setores, teremos  $N = S + 1$  relés.

Os relés antecedentes farão autorretenção e energizarão o relé seguinte.

Assim, o relé K1 fará autorretenção e energizará K2 por meio de um contato aberto na bobina deste outro relé, e assim por diante. Observe a figura 6.31:

Com certeza, esse método funciona, entretanto começa a ficar muito longo e conta com muitos relés.

Usando o mesmo exemplo, vamos demonstrar outro método que pode facilitar ainda mais a solução do problema.



### 6.5.3 Método cascata

O método cascata para um circuito eletropneumático é dividido em etapas.

A primeira tarefa a ser efetuada é a divisão da sequência em setores ou linhas.

Veja a sequência abaixo:

**1A+ 2A+ 2A- 1A-**

Essa sequência pode ser dividida em dois setores:

**1A+ 2A+ | 2A- 1A-**  
**Setor I | Setor II**

Na pneumática, o número de válvulas 5/2 vias ou 4/2 vias responsáveis pela mudança de linhas é igual ao número de setores menos 1. Aqui, essas válvulas são substituídas por relés.

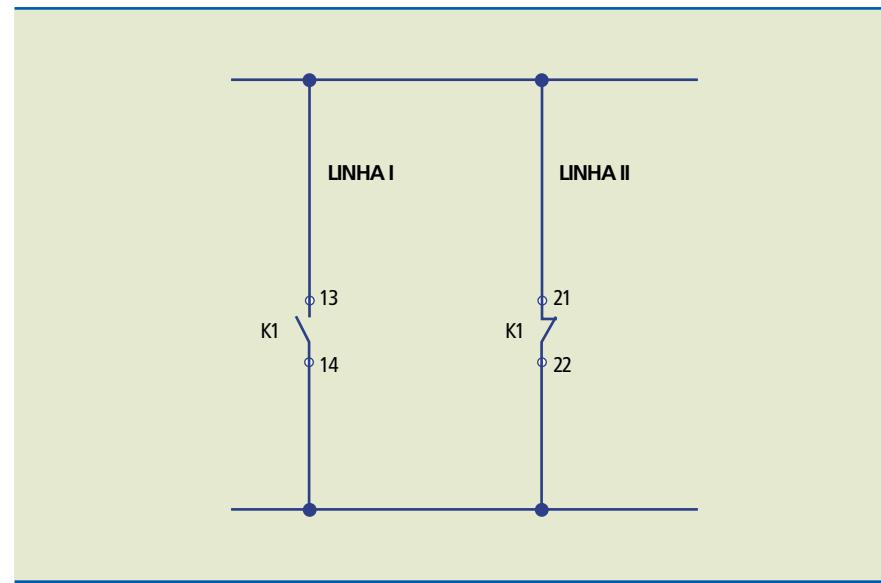
**Figura 6.31**  
Circuito eletropneumático da sequência **1A+ 2A+ 2A- 1A-** (método passo a passo).

Portanto, o número de relés responsável pela mudança das linhas elétricas é igual ao número de setores menos um. Esse número (setores menos um) é somente para os relés da cascata. Isso não quer dizer que no circuito não possa haver um número maior de relés.

O segundo passo é traçar a cascata elétrica. Para dois setores (ou duas linhas), a cascata é indicada na figura 6.32.

**Figura 6.32**

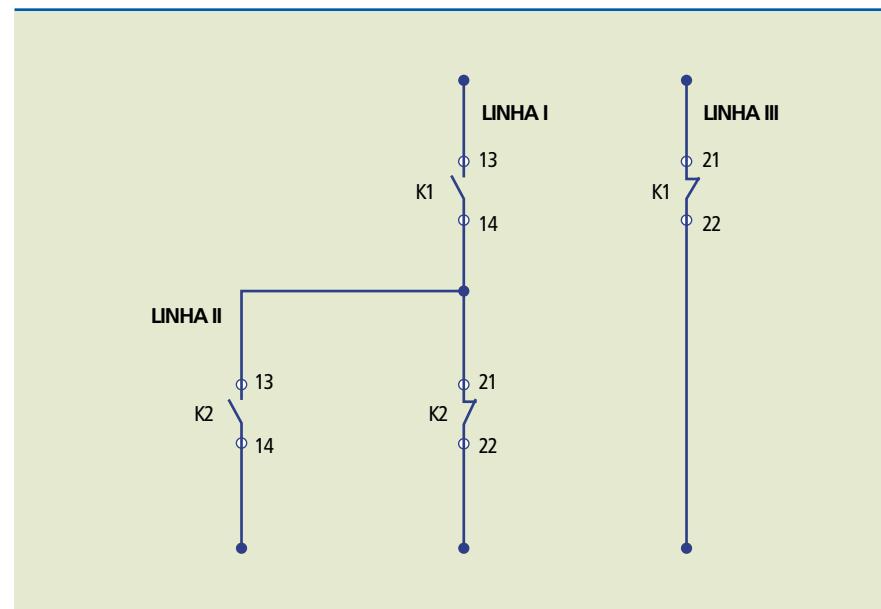
Indicação da cascata elétrica.



Para três setores (três linhas), ver a figura 6.33.

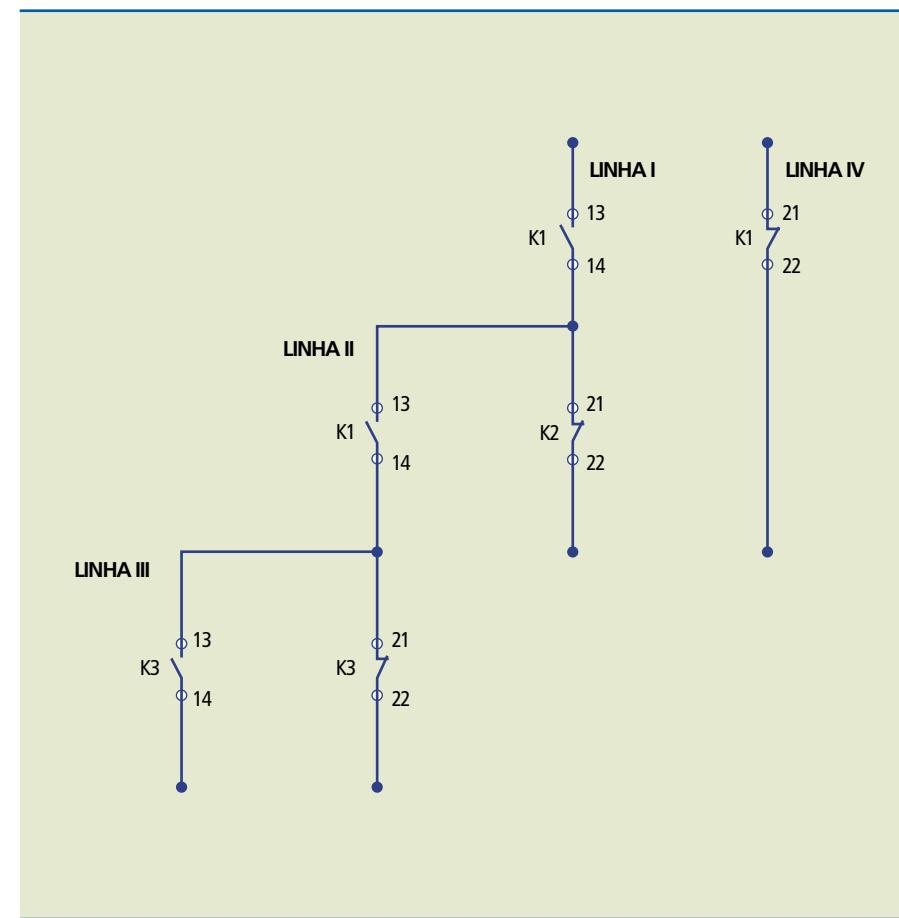
**Figura 6.33**

Indicação da cascata elétrica para três setores.



Ou seja, temos contatos de K1 (um fechado e um aberto) paralelos e contatos de K2 (um aberto e um fechado) também paralelos.

Para quatro setores (quatro linhas), veja figura abaixo:



**Figura 6.34**

Indicação da cascata elétrica para quatro setores.

Sempre com dois contatos de cada relé em paralelo, a cascata continua.

Essa estrutura resulta do fato de que a linha II deve depender da linha I, e a linha III deve depender da linha II para ser energizada, e assim por diante.

Ao energizar a linha II, a linha I é desenergizada e, ao desenergizar a linha III, a linha II deve ser desenergizada, e assim por diante.

A última linha inicia a sequência energizada. E o raciocínio continua: a última linha é desenergizada para que se energize a linha seguinte; esta por sua vez será desenergizada para energizar a seguinte, e assim sucessivamente.

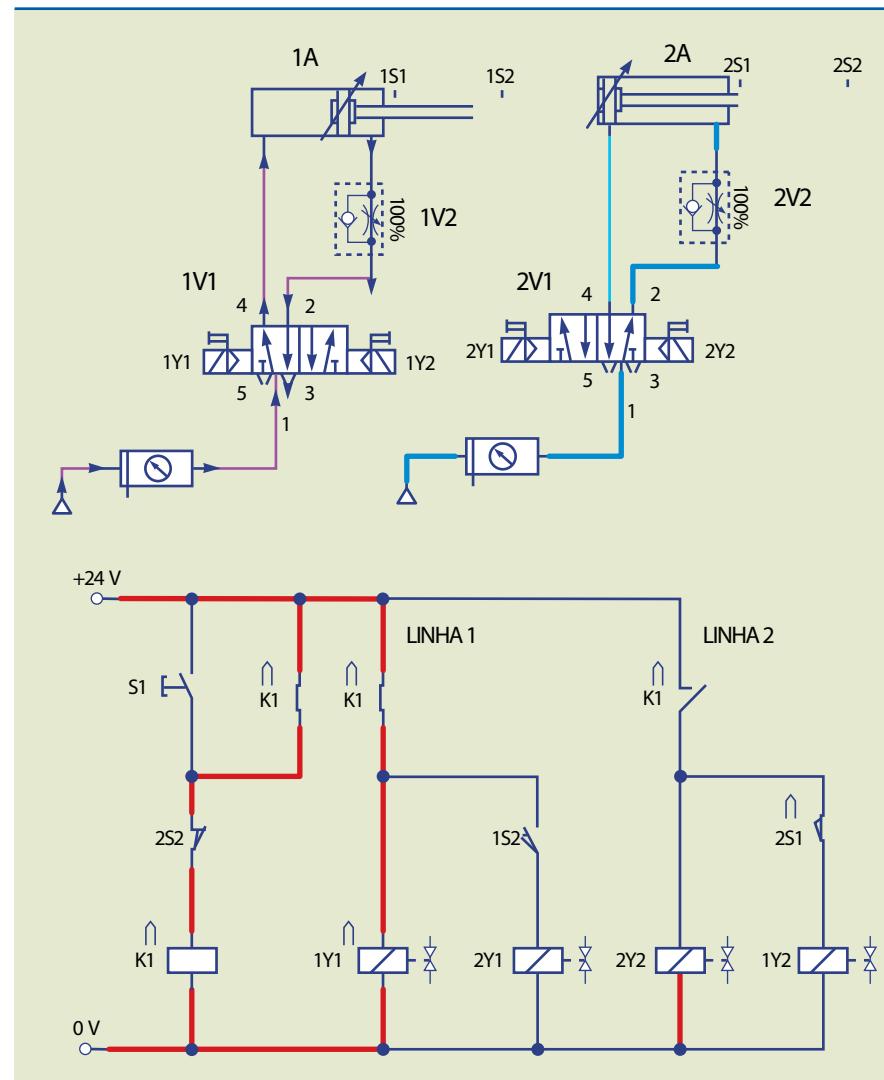
Para a mudança de linha, devem ser energizadas as bobinas dos relés.

Como a quantidade de relés utilizados na mudança de linhas é igual ao número de setores menos um, para cada dois setores temos 1 relé.

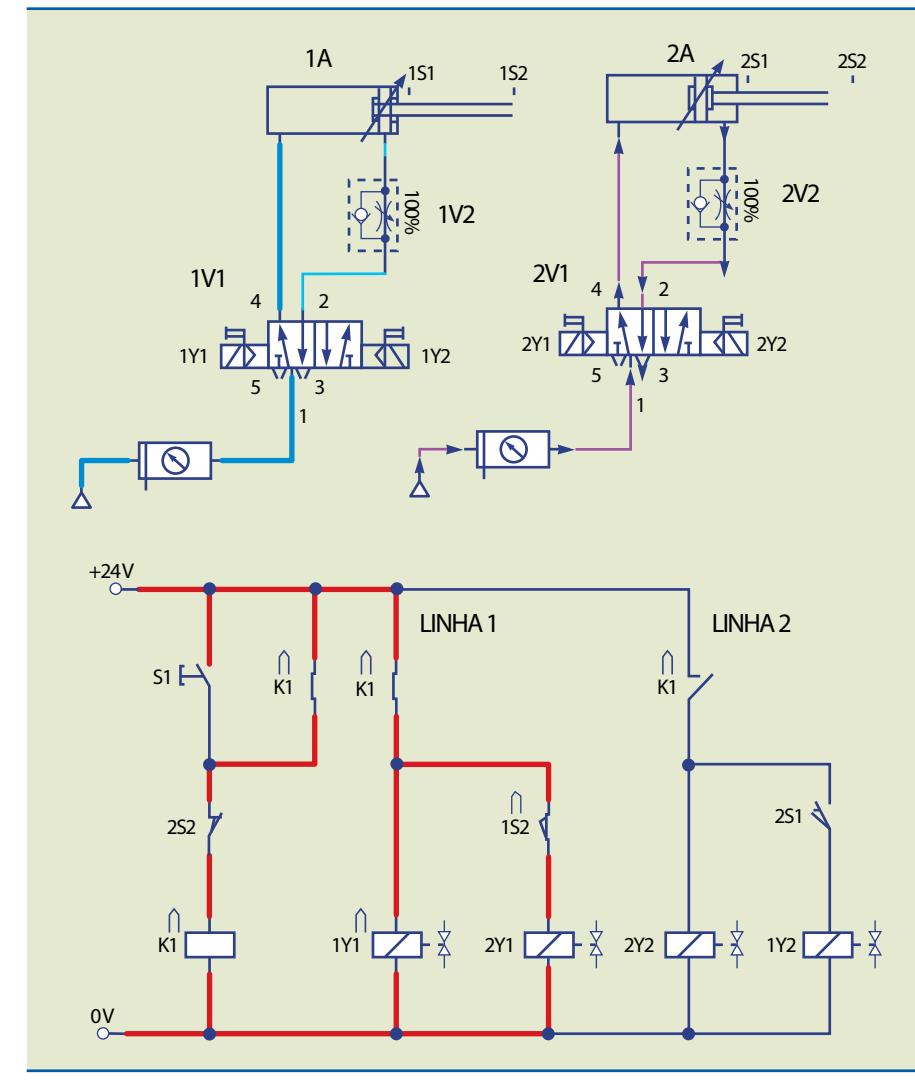
O próximo passo é inserir todos os solenoides e relés, e então inserir os fins de curso, responsáveis pela organização da sequência de movimentos. Veja o desenvolvimento descrito nas figuras 6.35, 6.36 e 6.37.

**Figura 6.35**

Círculo cascata da sequência 1A+ 2A+ 2A- | 1A-. Primeiro passo.

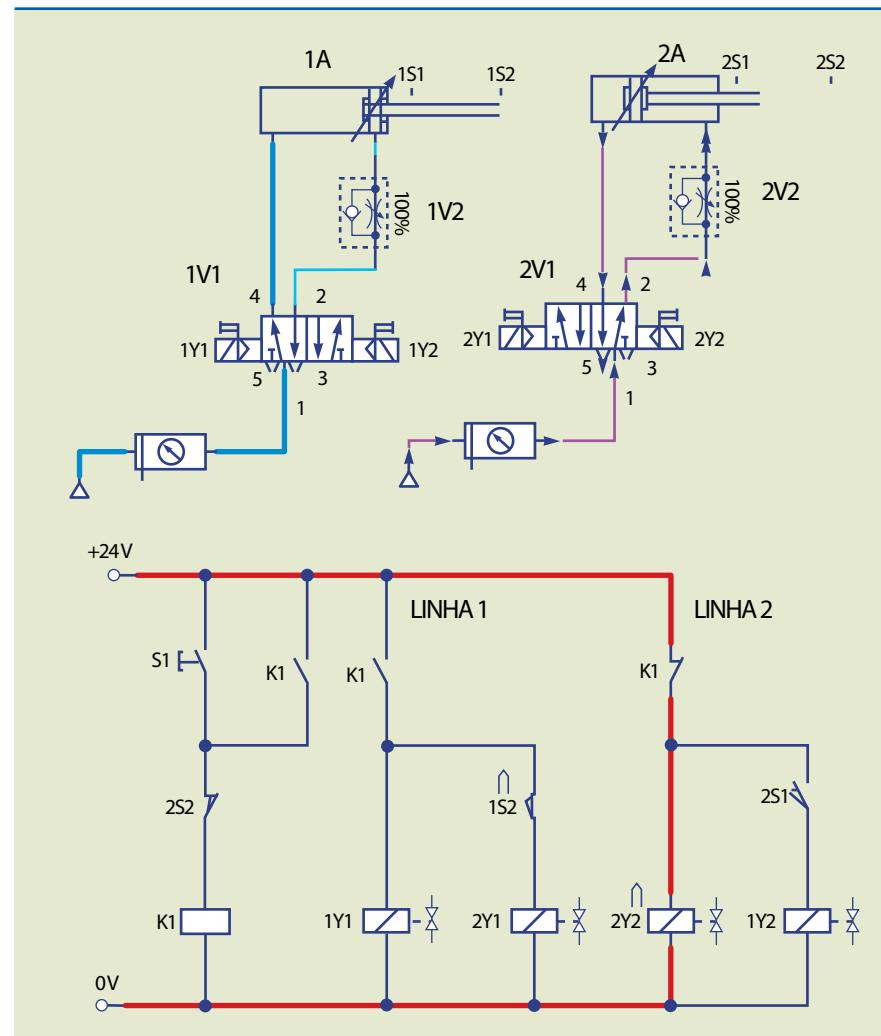
**Figura 6.36**

Círculo cascata da sequência 1A+ 2A+ 2A- | 1A-. Segundo passo.



**Figura 6.37**

Círculo cascata da sequência 1A+ 2A+ 2A- 1A-. Terceiro passo.



Com essa mudança de linha, 2Y2 é energizado primeiramente, fazendo o retorno de 2A e depois 1Y2, fazendo o retorno de 1A, fechando, assim, a sequência de movimentos.

Esse método foi criado para evitar qualquer sobreposição de sinal (contrapressão). Isso se dá porque não ocorre avanço e retorno de um cilindro na mesma linha.

#### 6.5.4 Métodos sistemáticos

São métodos elaborados para o atendimento a clientes pelas empresas fornecedoras de componentes pneumáticos, desenvolvidos para resolução de circuitos gerando rapidez e economia na fase de projetos. Esses métodos podem ser divididos em três sequências:

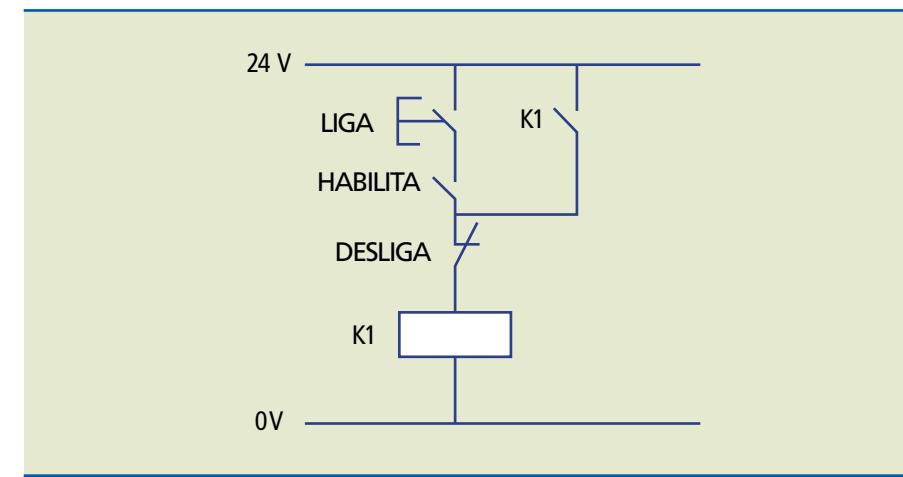
- método de sequência máxima;
- método de sequência mínima;
- método de sequência máxima com cadeia estacionária.

Os dois primeiros métodos são aplicáveis ao uso com válvulas acionadas por duplo solenoide, e o terceiro método é utilizado quando em uso de válvulas com simples solenoide.

#### 6.5.5 Método de sequência máxima

Na sequência máxima, todas as linhas ficam iguais. A quantidade de memórias ou de relés é igual à quantidade de passos. Cada relé é responsável por um passo e existe necessidade de rearme. HABILITA é o passo anterior. DESLIGA é o próximo passo. Ver exemplo na figura 6.38.

**Figura 6.38**  
Círculo exemplificado.



#### 6.5.6 Método de sequência mínima

Usaremos um exemplo para apresentar o método. Para iniciar esse método, primeiramente devemos dividir a sequência por grupos:

1A+ 2A+ 3A+   3A- 1A- 2A-   2A+ 1A+   2A-
I                  II                  III          IV

Movimentos do grupo I – avanço do atuador 1A, avanço do atuador 2A, avanço do atuador 3A.

Movimentos do grupo II – recuo do atuador 3A, recuo do atuador 1A, e recuo do atuador 2A.

Movimentos do grupo III – avanço do atuador 2A, avanço do atuador 1A.

Movimento do grupo IV – recuo do atuador 2A

Podemos perceber que podem pertencer ao mesmo grupo movimentos seguidos de atuadores diferentes.

No exemplo, estamos trabalhando com três atuadores.

A quantidade de memória, ou seja, a quantidade de relés necessária para o circuito elétrico que iremos utilizar é igual à quantidade de grupos – 1, com exceção de quando se utilizarem 3 grupos.

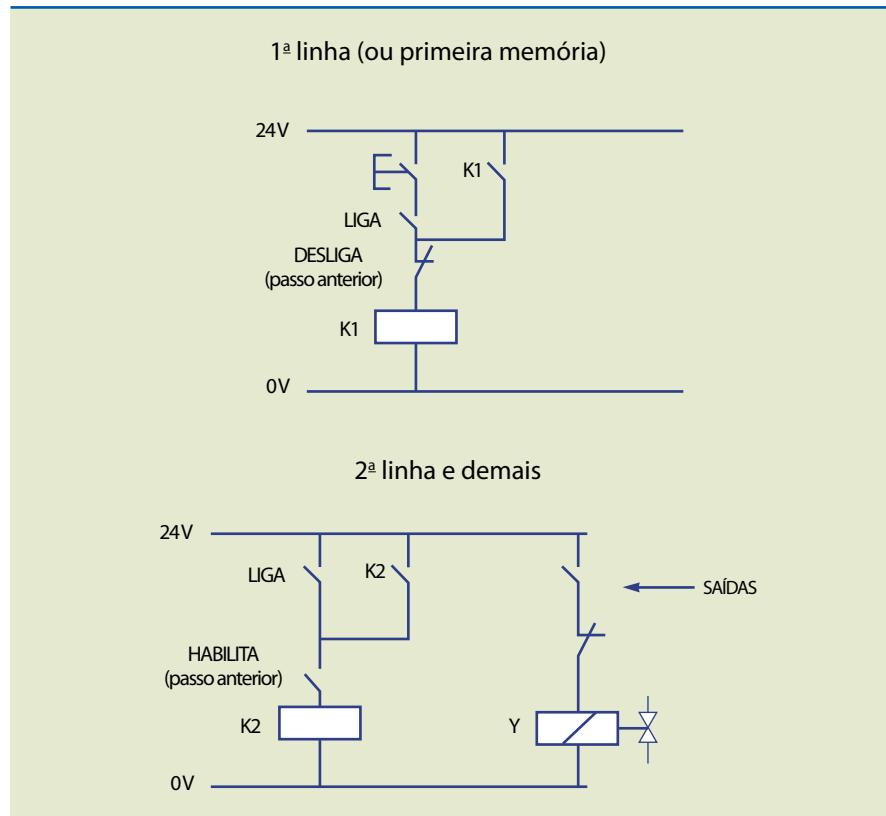
Por exemplo: 3 grupos, 3 memórias; 4 grupos, 3 memórias; 2 grupos, 1 memória. A quantidade de linhas auxiliares é igual ao número de grupos. A linha em que está o último movimento inicia-se energizada.

### 6.5.7 Sequência máxima com cadeia estacionária

Nesse método, a quantidade de memórias (relés) é igual à quantidade de passos. Todas as linhas são energizadas sequencialmente e permanecem assim até o último passo: primeira linha (ou primeira memória). Ver a figura 6.39.

**Figura 6.39**

Círculo exemplo.



### 6.5.8 Sinalizadores

Alguns dispositivos elétricos são muito importantes no dia a dia da automação. Entre eles, podemos citar dois sinalizadores: o sonoro e o visual, indicados com os seguintes símbolos:



Sinal sonoro:



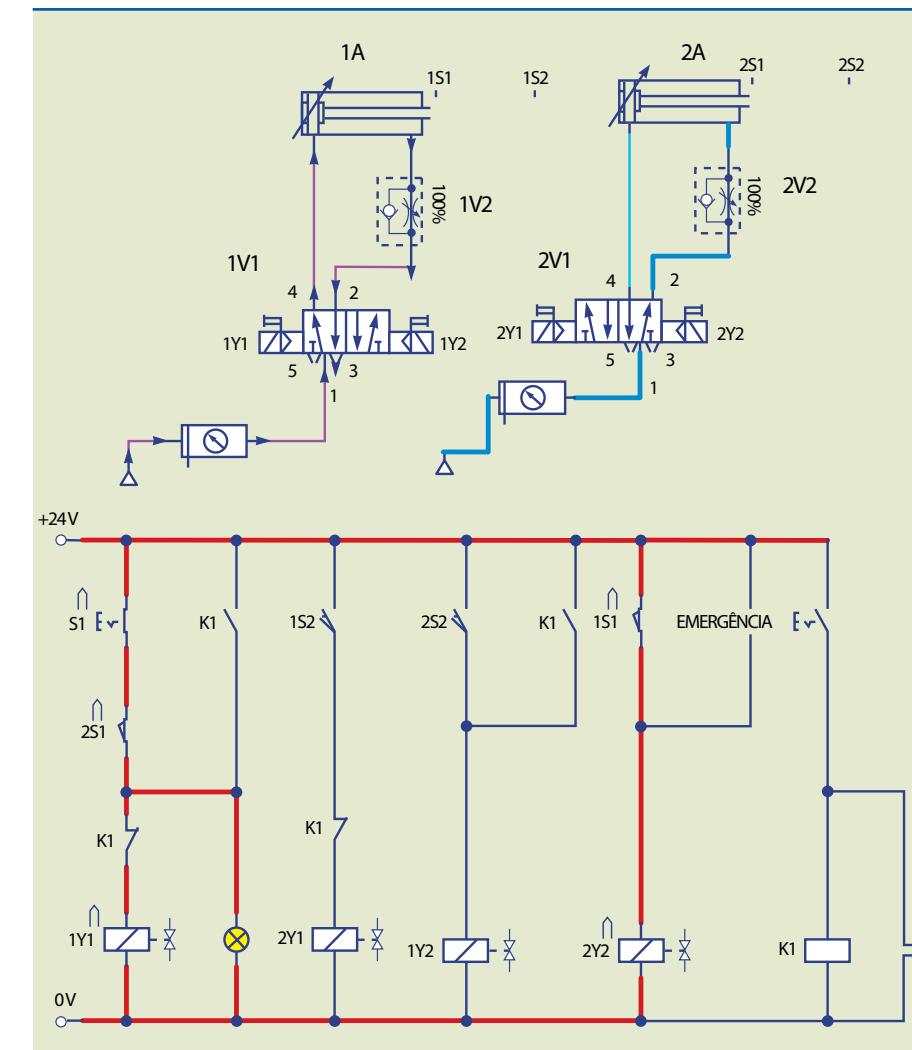
Sinal visual:

Esses componentes são muito importantes quando há necessidade de alertar o operador de que alguma ação está sendo executada, ou quando um botão de emergência deve ser acionado.

Veja como exemplo (figura 6.40) o circuito da sequência 1A+, 2A+, 1A-, 2A-, com botão de emergência, e na figura 6.41 com sinal sonoro.

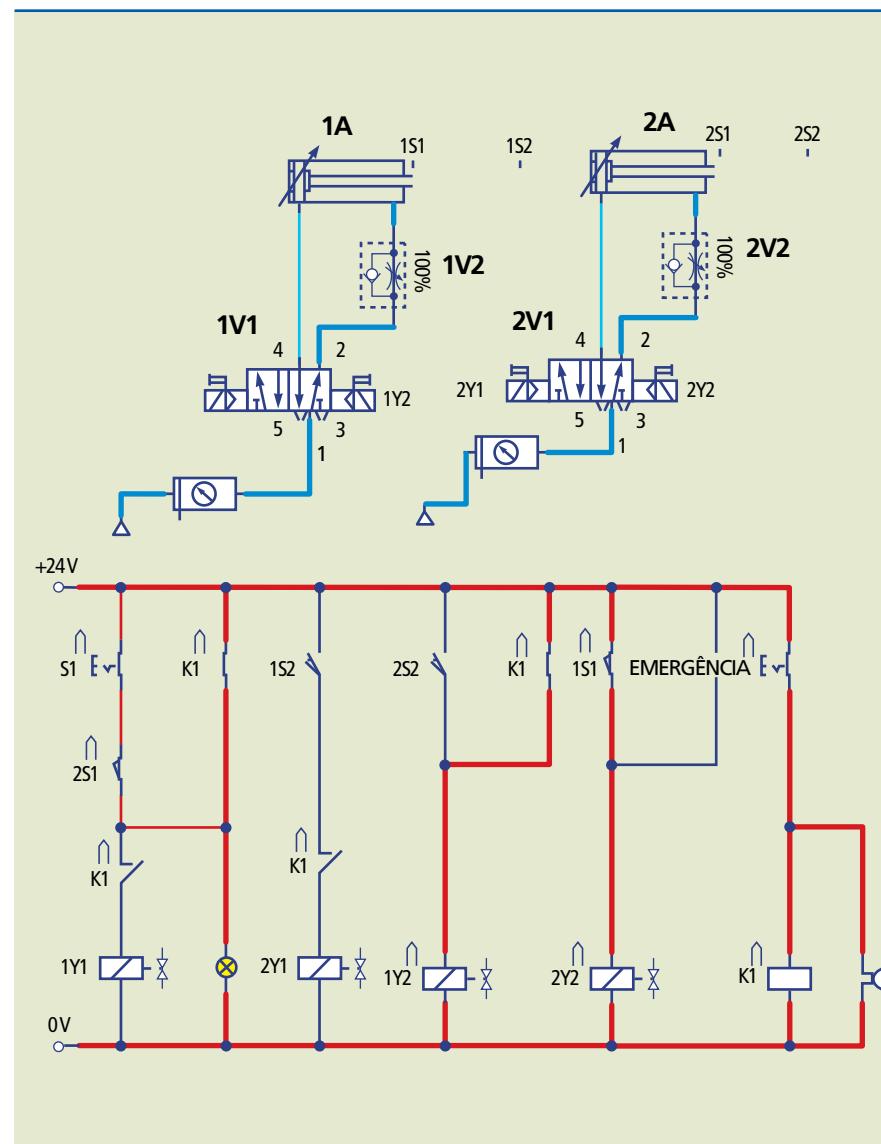
**Figura 6.40**

Exemplo de sinal luminoso.



**Figura 6.4 I**

## Exemplo de sinal sonoro.



Ao acionar S1, damos início à sequência de movimentos; ao mesmo tempo acionada uma lâmpada, que indica ao operador que a máquina entrou em funcionamento.

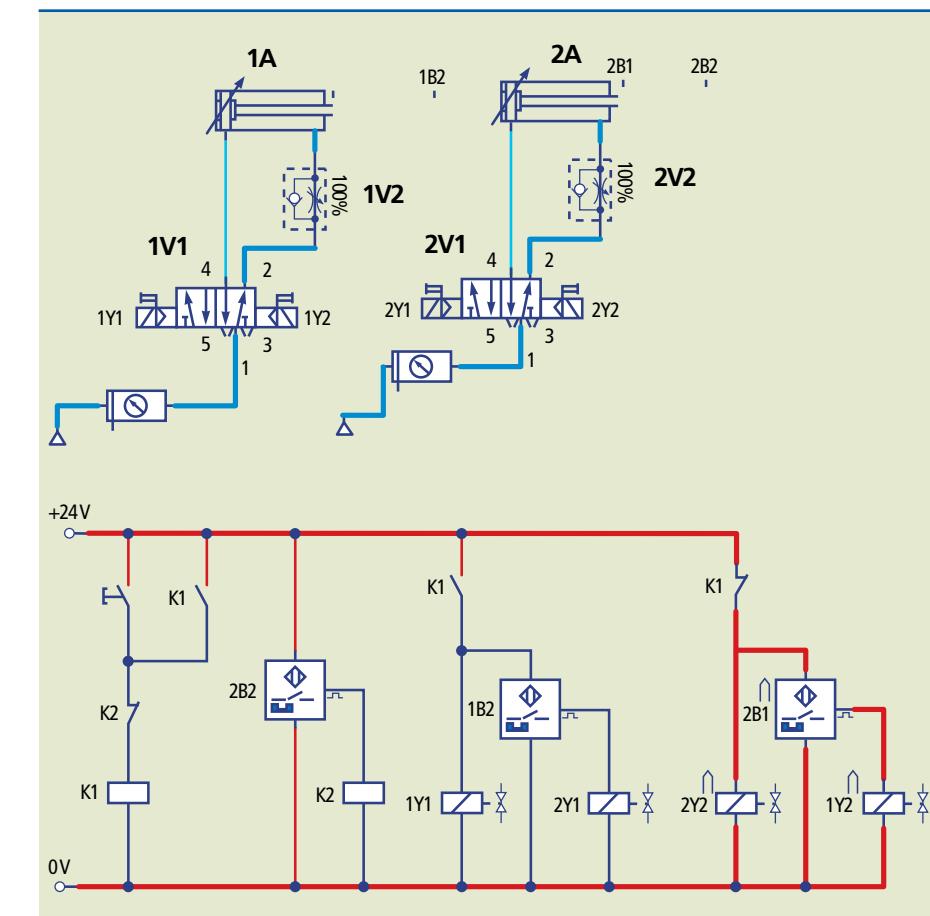
O botão de emergência, quando pressionado, energiza a bobina de um relé K1, os dois contatos de K1 desenergizarão os solenoides de avanço (1Y1 e 2Y1). Os contatos normalmente abertos (deste mesmo relé) energizarão os solenoides de retorno (1Y2 e 2Y2), quando o botão de emergência for acionado.

Até então, informamos os tipos de sensores que podemos utilizar em circuitos eletropneumáticos, mas não exemplificamos sensores do tipo capacitivo, induutivo e óptico nesses circuitos.

A figura 6.43 é exemplo de um circuito com a sequência 1A+ 2A+ 2A- 1A-, usando o método cascata e somente sensores magnéticos.

**Figura 6.42**

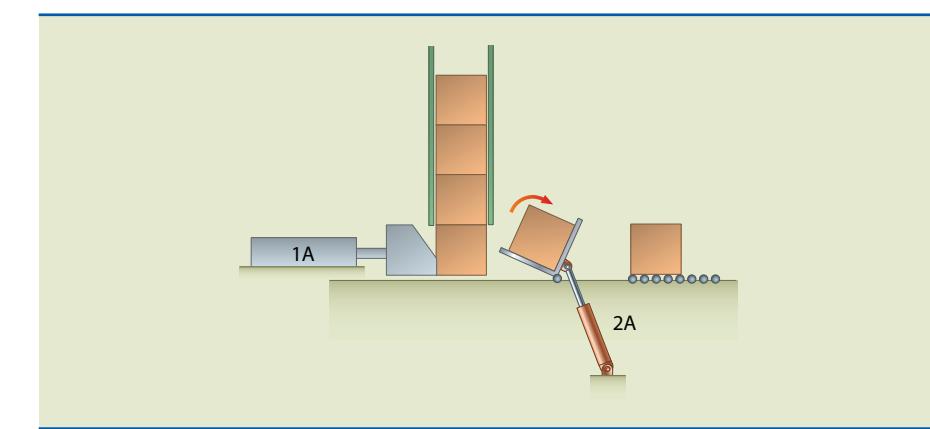
Círculo com a sequência  
IA+ 2A+ 2A- IA-,  
utilizando o método  
cascata e somente  
sensores magnéticos.



### 6.5.9 Exemplos de circuitos eletropneumáticos

## Exemplos (treinamento Festo)

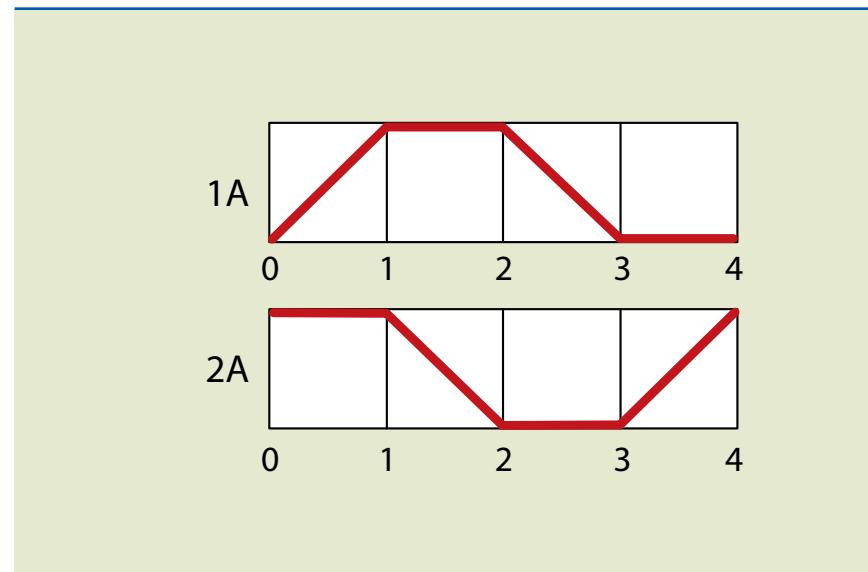
- 1.** A peça sob o magazine vertical é empurrada pelo atuador 1A para o sistema basculante que gira 90° através do atuador 2A, para então seguir pela esteira de roletes. Na sequência, retorna o pistão 1A e depois avança o pistão 2A. Desenvolver o diagrama trajeto passo e o circuito eletropneumático para o dispositivo. (Dispositivo na figura 6.43, diagrama de trajeto na figura 6.44 e solução na figura 6.45.)



## Figura 6.43

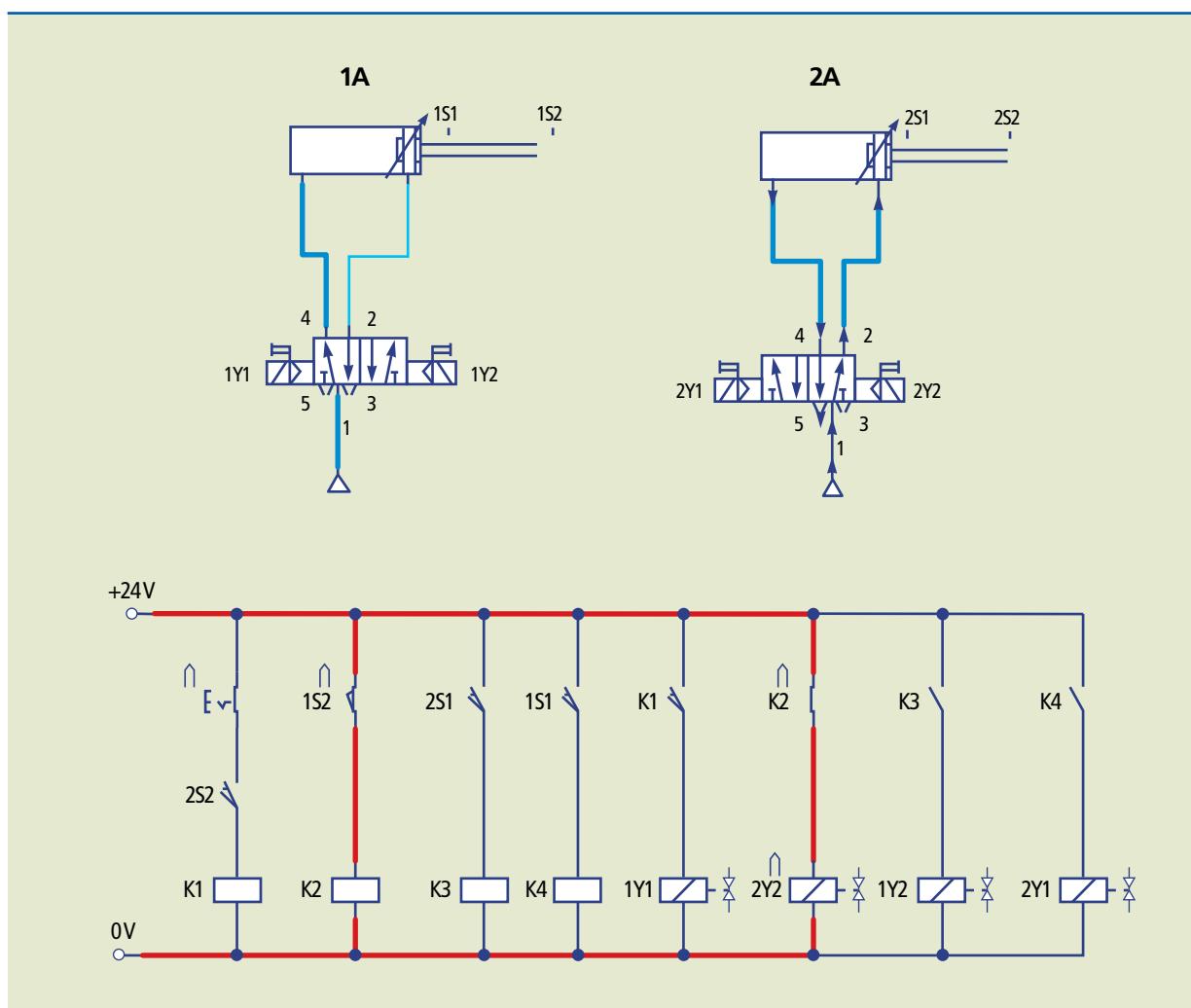
**Figura 6.44**

Diagrama de trajeto.

**Figura 6.45**

Círculo.

Solução:



**2. Dispositivo de classificação de peças.** Utilizando um dispositivo de classificação algumas peças são transferidas para a mesa transportadora A ou continuam na mesa B.

Pressionando dois botões opcionais (S1 ou S2), o atuador de dupla ação avança e empurra a peça para a mesa A, mas apenas se o dispositivo estiver habilitado por um terceiro botão com trava (S3).

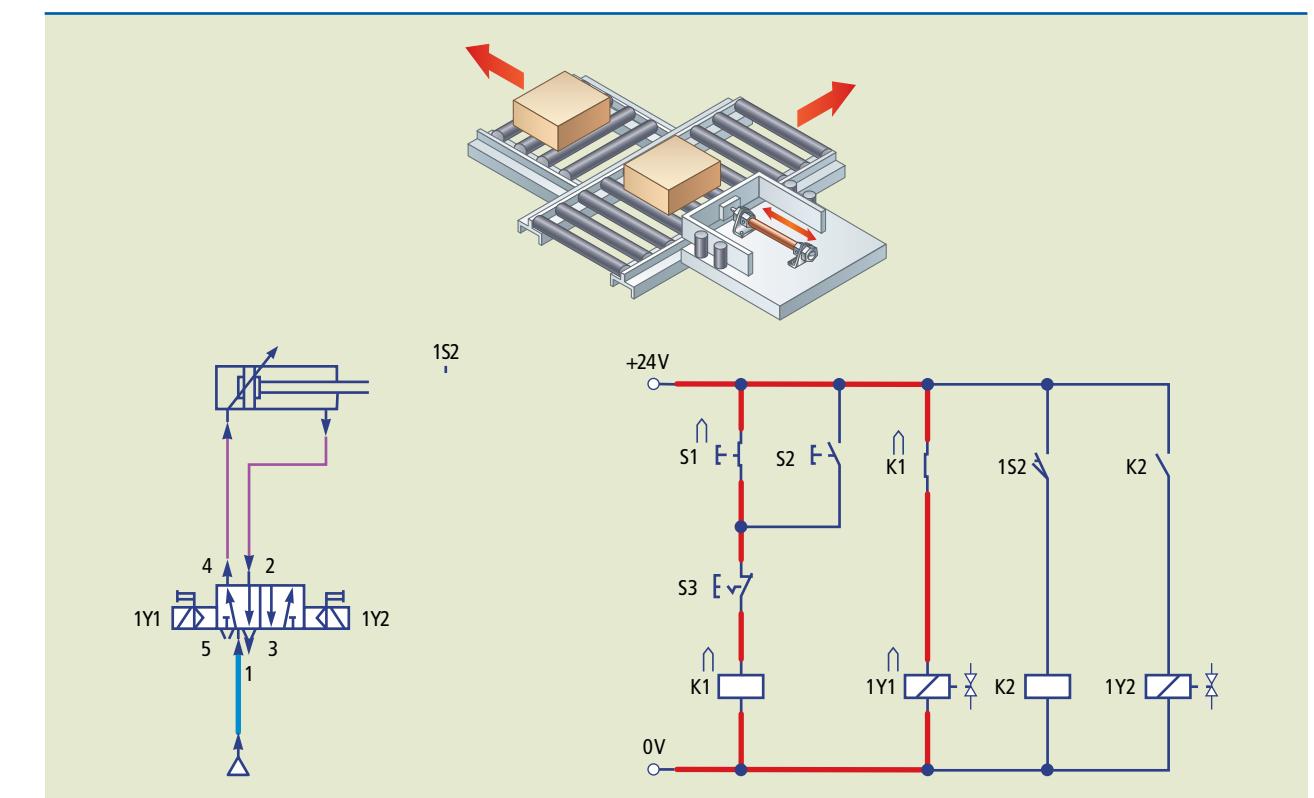
O atuador retorna à posição inicial, automaticamente.

Elaborar o circuito eletropneumático. (Ver o dispositivo e a resolução na figura 6.46.)

Solução:

**Figura 6.46**

Dispositivo e circuito.



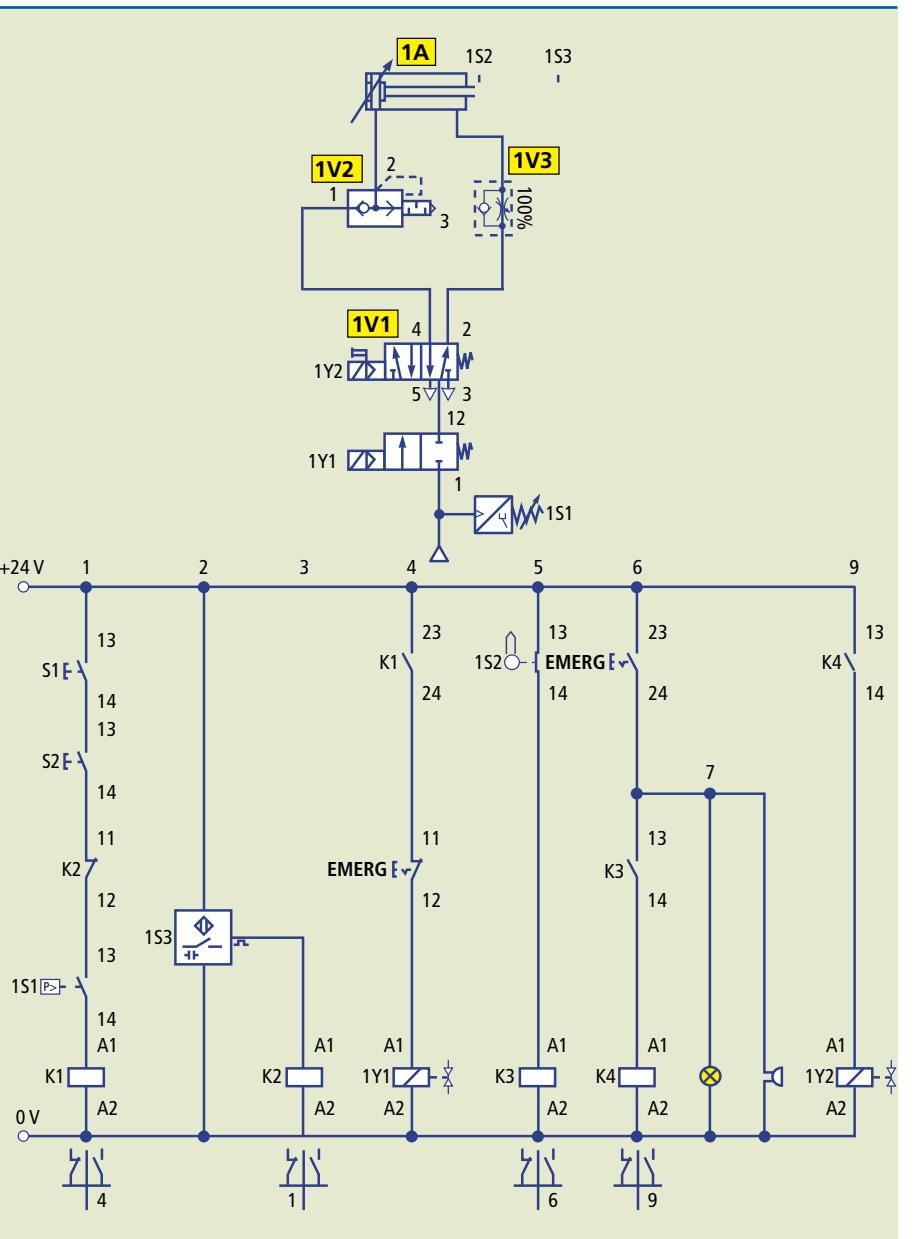
**3.** Um cilindro de dupla ação deverá avançar quando pressionados dois botões pulso simultaneamente (lógica “E” elétrica). Uma válvula direcional 5/2 vias simples solenoide deverá ser usada no circuito. Quando o atuador chegar ao fim de seu curso, um sensor de proximidade do tipo capacitivo deverá ser acionado, para que o retorno do atuador seja feito automaticamente e de forma mais rápida possível. O circuito contará ainda com um botão de emergência. Quando acionado, ele deverá fazer o cilindro retornar imediatamente à sua posição inicial, acionando um sinalizador visual e um sonoro. Quando for pressionado o botão de emergência, após o retorno do cilindro, deverá ser cortado o fornecimento de ar para a válvula direcional, automaticamente.

Assim, o ciclo estará pronto para ser reiniciado somente quando o botão de emergência for desativado.

A pressão de trabalho é de 6 bar. Se a pressão no sistema for menor do que a pressão de trabalho, o cilindro não pode avançar. Opcionalmente poderá ser feita a regulagem da velocidade no avanço do cilindro. Ver o dispositivo e o circuito na figura 6.47.

*Solução:*

**Figura 6.47**



## Eletro-hidráulica



**A**ssim como na eletropneumática, a eletro-hidráulica conta com elementos conversores de sinais, a fim de aproveitar as vantagens de cada técnica (elétrica e hidráulica) efetuando sua combinação na solução de problemas de comando. Para que essa combinação seja possível, faz-se necessária a utilização de elementos de ligação, responsáveis por fazer a conversão dos sinais de uma técnica para outra.

Os elementos eletro-hidráulicos básicos são os conversores de sinais hidráulicos em sinais elétricos e os conversores de sinais elétricos em sinais hidráulicos. Toda simbologia e lógica elétrica, sensores e pressostatos utilizados na eletropneumática se aplicam também à eletro-hidráulica.

O pressostato, como já mencionado, é um elemento eletro-hidráulico que converte um sinal de pressão variável em sinal elétrico.

Já as eletroválvulas, que agem segundo um princípio do eletromagnetismo, são elementos conversores de sinais elétricos para sinais hidráulicos.

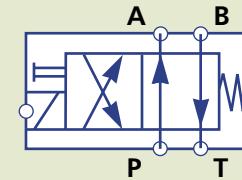
Daremos atenção especial para as eletroválvulas usadas na hidráulica, por serem de construção um pouco mais robustas do que as eletroválvulas pneumáticas.

Nos sistemas eletro-hidráulicos, as eletroválvulas têm papel fundamental, pois são o elo de ligação entre o processamento de sinais elétricos e os atuadores hidráulicos (cilindros, motores hidráulicos).

Os electroímãs para as eletroválvulas podem ser para uso em tensão contínua ou alternada. Existem electroímãs que funcionam imersos em óleo e outros que funcionam a seco. Em casos especiais, há electroímãs à prova de explosão. Os mais usados são os imersos em óleo.

## 7.1 Válvula solenoide de 4/2 vias

Nesse tipo de válvula, na configuração indicada na figura 7.1, na posição normal a conexão P (pressão) está aberta para A, e B está aberta para o tanque T ou retorno. Quando acionada pelo solenoide, a válvula é comutada para a outra posição. Caso não haja corrente passando pelo solenoide, a válvula pode ser acionada manualmente.

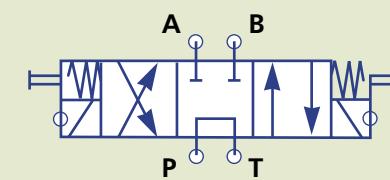


**Figura 7.1**  
Representação simbólica de válvula solenoide de 2 posições e 4 vias.

## 7.2 Válvula solenoide de 4/3 vias

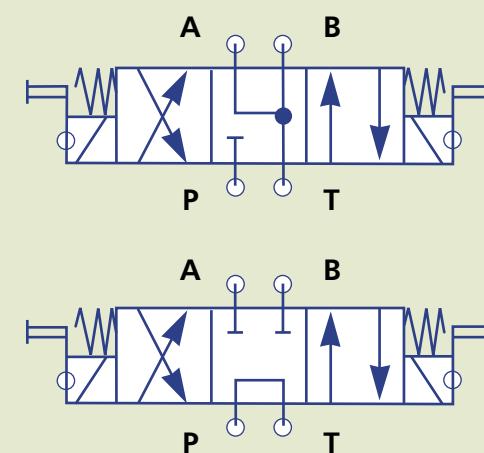
Nessa válvula (figura 7.2), na posição normal as conexões A e B estão fechadas, e P (pressão) para T (tanque) está aberta. Quando acionada pelos solenoides de acionamento, a válvula é comutada para a outra posição ou para a posição paralela. Essa válvula também pode ser acionada manualmente.

Esse tipo de válvula é uma das válvulas de característica direcional mais usadas nos circuitos.



**Figura 7.2**  
Representação simbólica de válvula solenoide de três posições e quatro vias.

As eletroválvulas, como na hidráulica, podem ter outros tipos de centro. Veja os símbolos na figura 7.3.



**Figura 7.3**  
Representação simbólica de duas válvulas de três posições e quatro vias com centro distinto daquele apresentado na válvula da figura 7.2.

## 7.3 Comandos eletro-hidráulicos sequenciais

Qualquer sequência de movimentos é realizada por meio de elementos de trabalho hidráulicos que podem receber comandos elétricos. Esses comandos elétricos fazem a captação de sinal, processando-os e enviando-os às unidades de acionamento, segundo uma ordem preestabelecida.

O esquema para esse comando pode ser construído de duas maneiras: pelo método experimental ou intuitivo e pelos métodos sistemáticos de resolução.

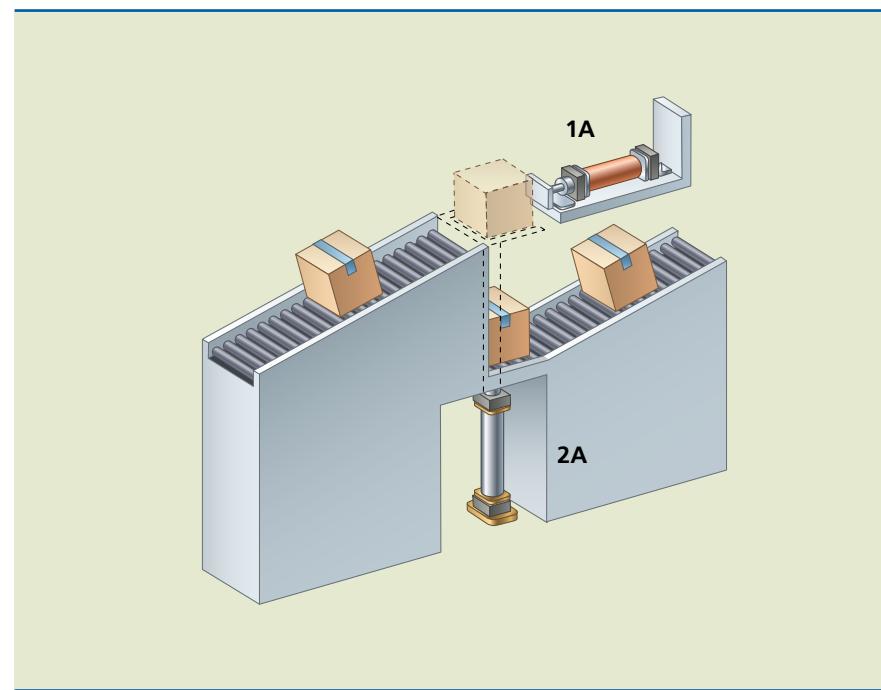
### 7.3.1 Método intuitivo

Para facilitar a compreensão, vamos utilizar um exemplo clássico de esquema de comando intuitivo.

#### Exemplo (treinamento Festo)

Seja um dispositivo de levantamento de pacotes como ilustrado na figura 7.4.

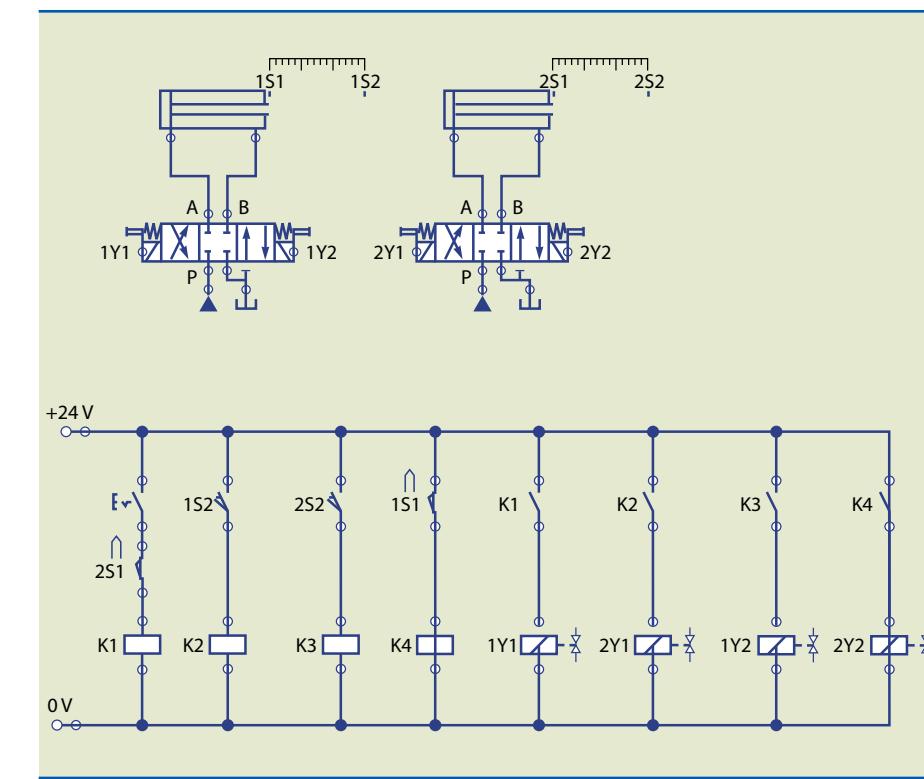
**Figura 7.4**  
Dispositivo de levantamento de pacotes.



Os pacotes que chegam a um dispositivo por uma esteira transportadora de roletes deverão ser levantados pelo cilindro 2A. Ao chegar à posição superior, o cilindro 1A deverá empurrar o pacote para uma segunda esteira. Após esse movimento, o cilindro 2A deverá retornar e somente depois de estar totalmente recuado é que poderá ocorrer o retorno de 1A.

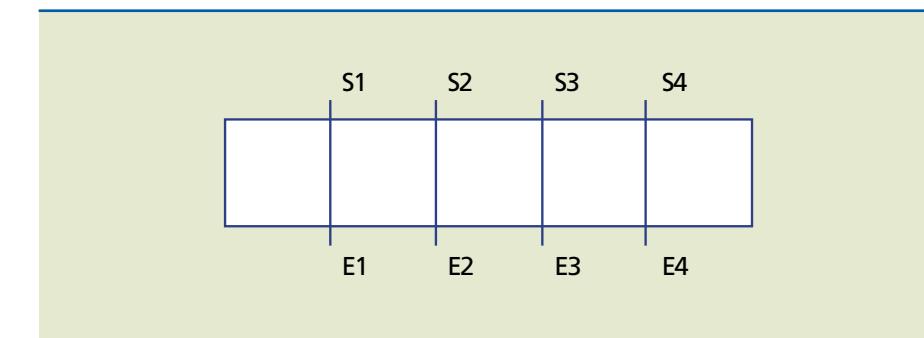
As peças devem ser deslocadas pela rampa 1, com a seguinte sequência de movimentos: 2A+ 1A+ 2A- 1A-. Elaborar o circuito eletro-hidráulico. Ver a solução na figura 7.5.

Solução:



### 7.3.2 Método sistemático

Uma vez que a operação foi executada, não há necessidade de que ela se mantenha. Com base nessa premissa, o método consiste em desconectar o sinal. Executada a operação, é preciso que ocorra a anulação do sinal após cada passo da operação.



A caixa da figura 7.6 representa uma unidade que indica esquematicamente os sinais de entrada (E1 até E4) e os sinais de saída (S1 até S4). Essa unidade deve resolver o problema gerado pelos sinais permanentes da seguinte forma:

- O número de sinais de entrada é igual ao número de sinais de saída, ou seja, para cada sinal de entrada existe um sinal de saída.

**Figura 7.5**  
Circuito eletro-hidráulico.

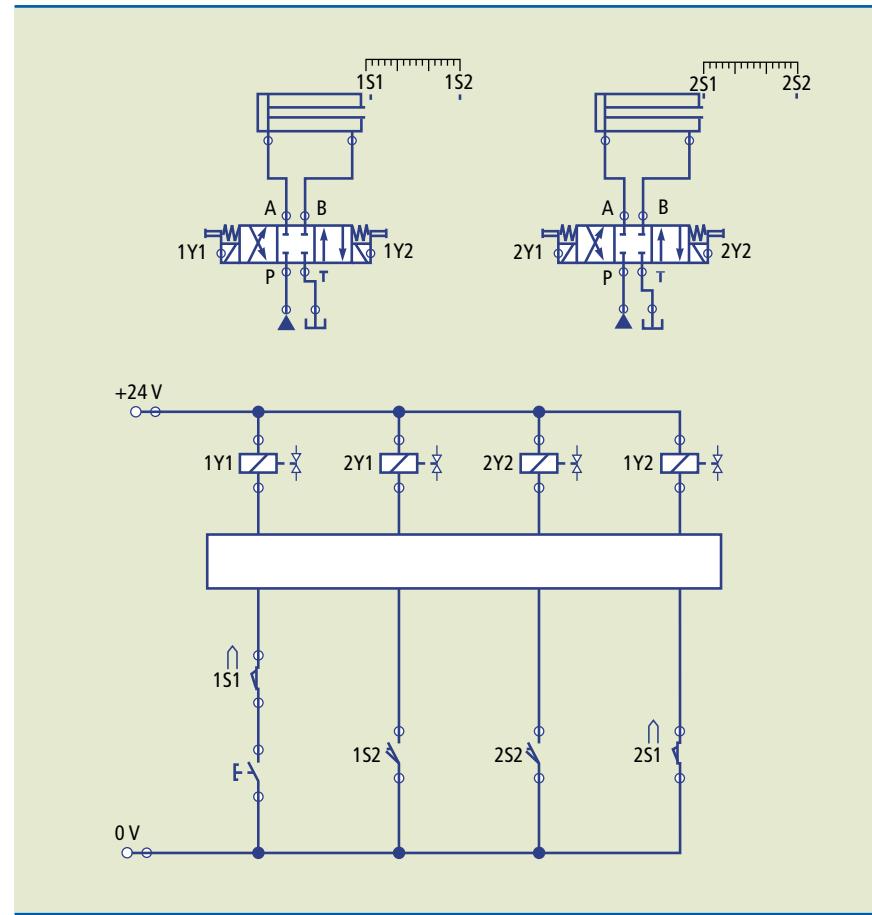
**Figura 7.6**  
Representação esquemática dos sinais de entrada e saída.

- b) Os sinais de saída devem ser memorizados, quer dizer, devem permanecer mesmo que tenha desaparecido o sinal de entrada correspondente.
- c) Somente pode ser detectado um único sinal de saída, e deve existir a possibilidade de desconectar esse sinal de forma controlada.
- d) Os sinais de entrada devem ter efeito apenas seguindo uma ordem preestabelecida.

Ver, como exemplo, o esquema da figura 7.7.

**Figura 7.7**

Círculo.



A caixa representada na figura 7.7 e também indicada na figura 7.6 pode ter duas versões: método de sequência mínima ou método de sequência máxima.

#### Método de sequência mínima

Nesse método, analisamos o diagrama trajeto passo e fazemos na sequência a divisão dos movimentos em grupos, não permitindo que seja efetuado, em um mesmo grupo, um movimento de avanço e de recuo do mesmo cilindro.

Outra maneira de reconhecer a sobreposição de sinais é a representação da sequência na forma abreviada:

1A+ 2A+ 2A- 1A-

Para solucionar esse problema, devemos introduzir uma classificação por grupos:

1A+ 2A+      2A- 1A-

grupo 1      grupo 2

Os desacionamentos acontecem, então, após o movimento de 2A+ e no final de 1A-.

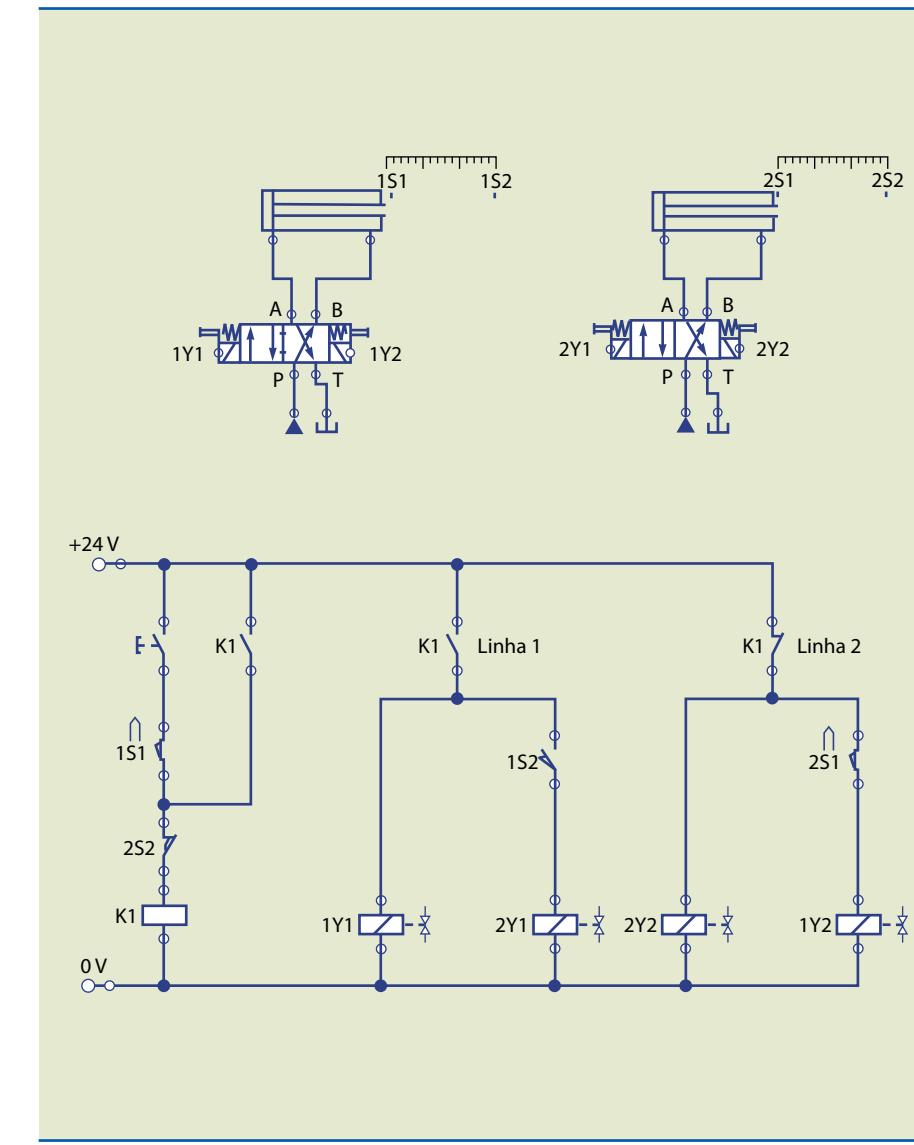
Através de relés, com circuitos de autorretenção, serão eliminados os sinais indesejados por meio de linhas auxiliares de corrente que serão energizadas e desligadas uma a uma por esses relés.

A quantidade de linhas auxiliares necessárias dependerá do número de grupos encontrados na divisão. Para o exemplo dado, são necessárias duas linhas.

No circuito elétrico aparecem duas linhas auxiliares (figura 7.8).

**Figura 7.8**

Círculo.



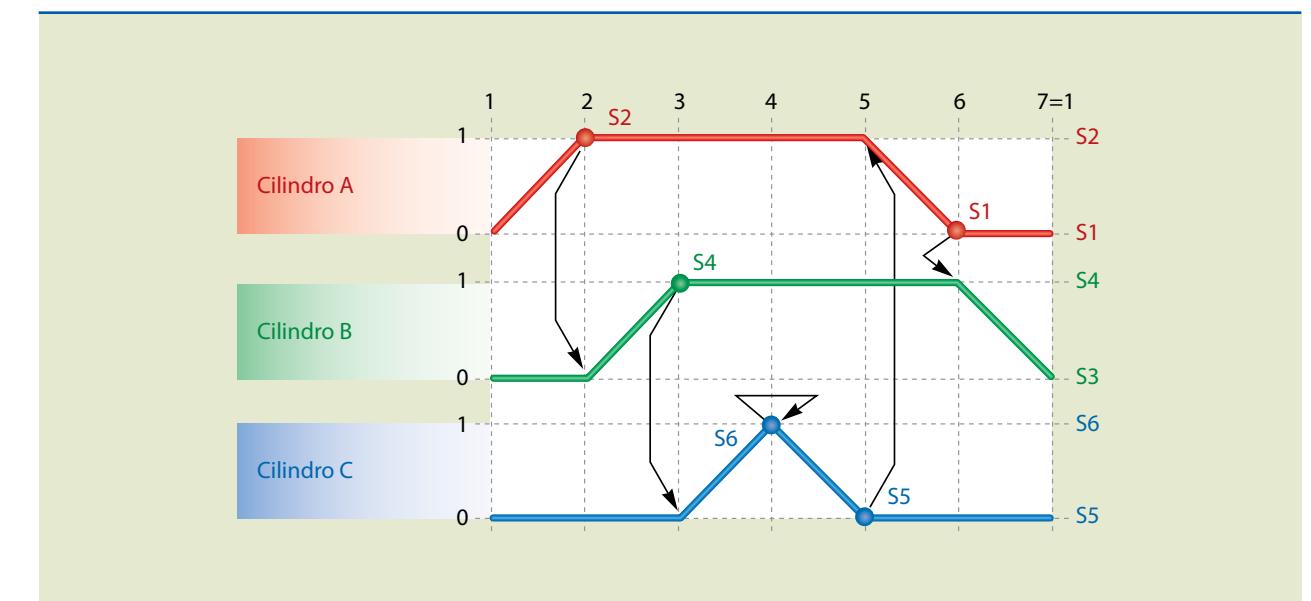
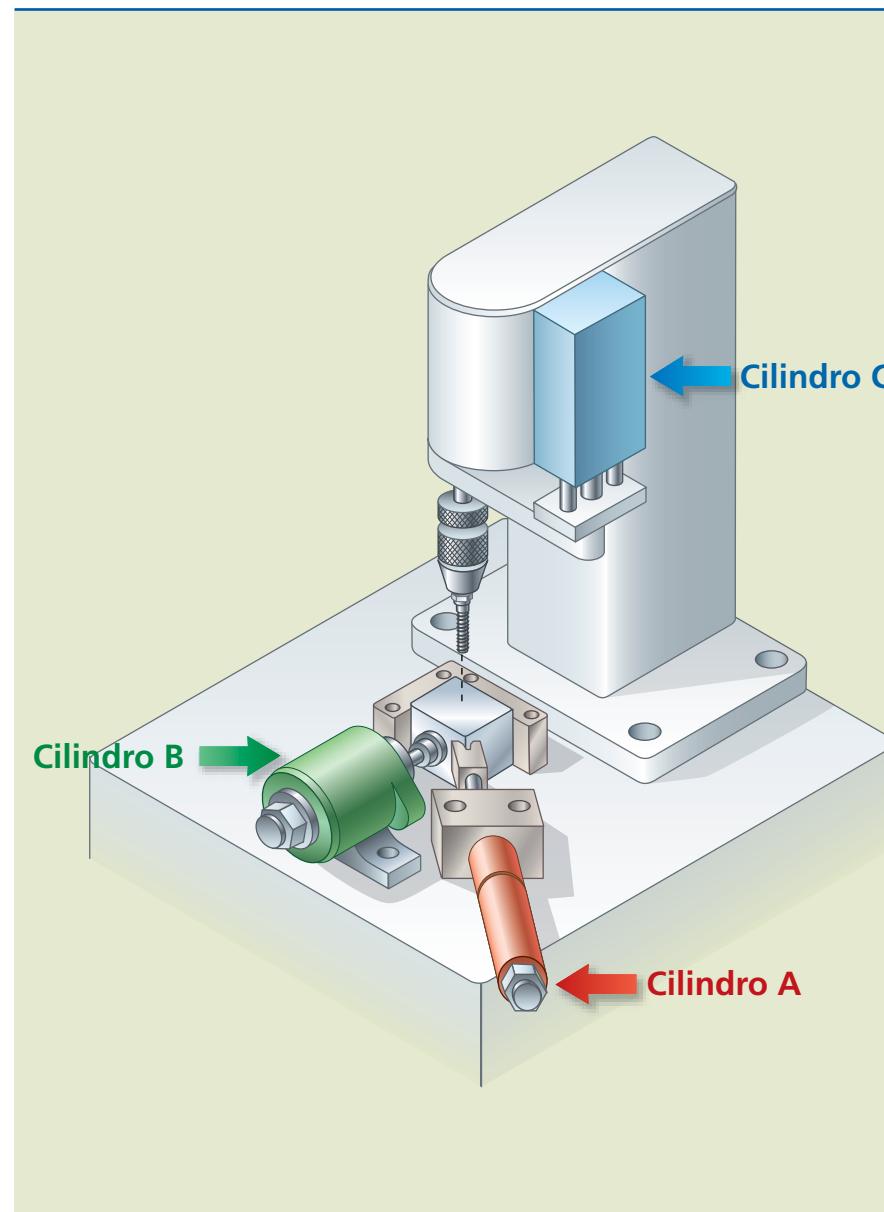
### Método de sequência máxima

A fim de atingir a máxima segurança possível, um desligamento é efetuado após cada passo de sequência. Nesse caso, o número de grupos dependerá exclusivamente do número de passos do diagrama. Ver o próximo exemplo.

#### Exemplo: furadeira vertical (treinamento Festo)

Uma furadeira vertical (ilustrada na figura 7.9) foi automatizada para processar blocos metálicos. O bloco é colocado manualmente, posicionado pelo cilindro A. Somente após ter sido posicionado o bloco é que o cilindro B avança, e em seguida avança o cilindro C, que efetua a furação. Finalizada a operação, o cilindro C retorna, em seguida retorna o cilindro A, e em seguida o cilindro B libera o bloco.

**Figura 7.9**  
Furadeira.

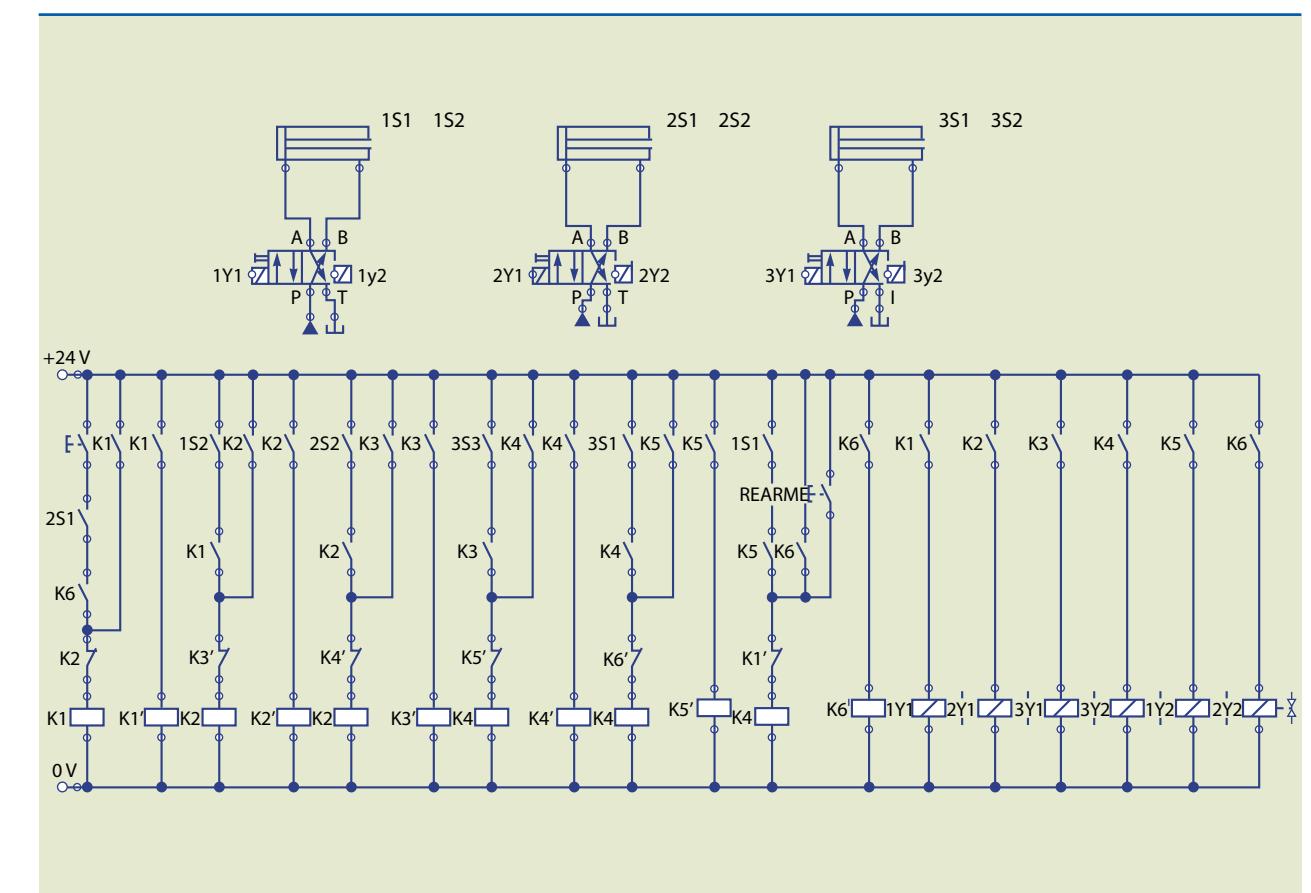


**Figura 7.10**  
Diagrama trajeto passo.

*Solução:*

O esquema eletro-hidráulico é representado na figura 7.11.

**Figura 7.11**



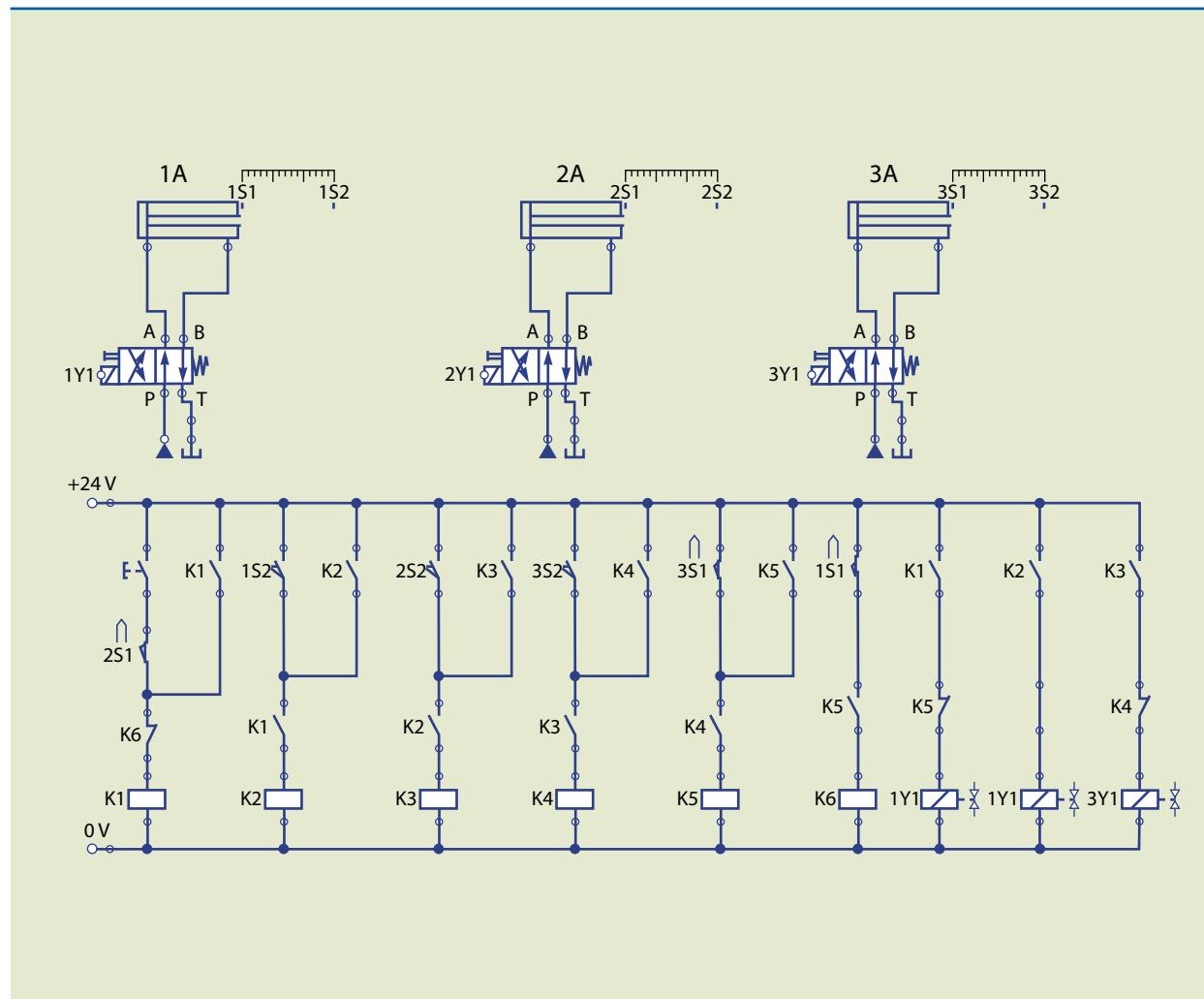
### Método de sequência máxima – cadeia estacionária de comando cíclico

É uma alternativa usada para facilitar a execução do esquema de sequência máxima. São utilizadas válvulas simples solenoides para comando dos cilindros. Naturalmente, o sinal deverá ser retido e só liberado quando houver o retorno do cilindro.

Os relés são energizados e só desarmados quando houver entrada do próximo relé.

**Figura 7.12**

Círculo eletro-hidráulico para furadeira vertical.



### 7.3.3 Simbologia elétrica básica (ver figura 7.13)

**Figura 7.13**

0V	+24V	Conexão el...	Conexão el...
Contato NA	Contato NF	Comutador	Relé
Botão com t...	Botão com t...	Botão com t...	Relé com re...
Botão de ac...	Botão de ac...	Botão de ac...	Relé com re...
Sensor indu...	Relé contador	Pressostato	Solenóide d...

# **Capítulo 8**

## **Controladores lógicos programáveis**



O controlador lógico programável é um dispositivo de estado que permite, por meio de um programa armazenado e de atuações (saídas) e leituras (entradas), o controle de máquinas ou processos. A NEMA (National Electrical Manufacturers Association), em 1978, definiu o CLP – controlador lógico programável – como um aparelho eletrônico digital capaz de realizar o controle de uma máquina ou processo, por meio de funções lógicas, de sequenciamento, de temporização, operações aritméticas. Esse controle é obtido com o emprego de um programa armazenado em uma memória interna contendo instruções para execuções de funções específicas que interagem com o meio externo através de dispositivos de entrada e saída (I/O) digitais ou analógicos.

O controlador lógico programável permite a automatização de processos industriais, de sequenciamento, intertravamento, controle de processos, produção por lote etc.

Praticamente não existem ramos ou aplicações industriais em que não possam ser aplicados os CLPs:

- máquinas industriais (operatrizes, injetoras, extrusoras, têxteis, calçados);
- equipamentos industriais para processos (mineração, siderurgia, petroquímica, química, alimentação, papel e celulose etc.);
- controle de sistemas embarcados em diversas aplicações aeroespaciais;
- equipamentos para controle de energia (demanda, fator de carga);
- aquisição de dados de supervisão em: fábricas, prédios inteligentes etc.;
- controle de processos com realização de controle PID, sinalização e intertravamento;
- bancadas de teste automático de componentes industriais.

Os controladores lógicos programáveis têm basicamente as seguintes características:

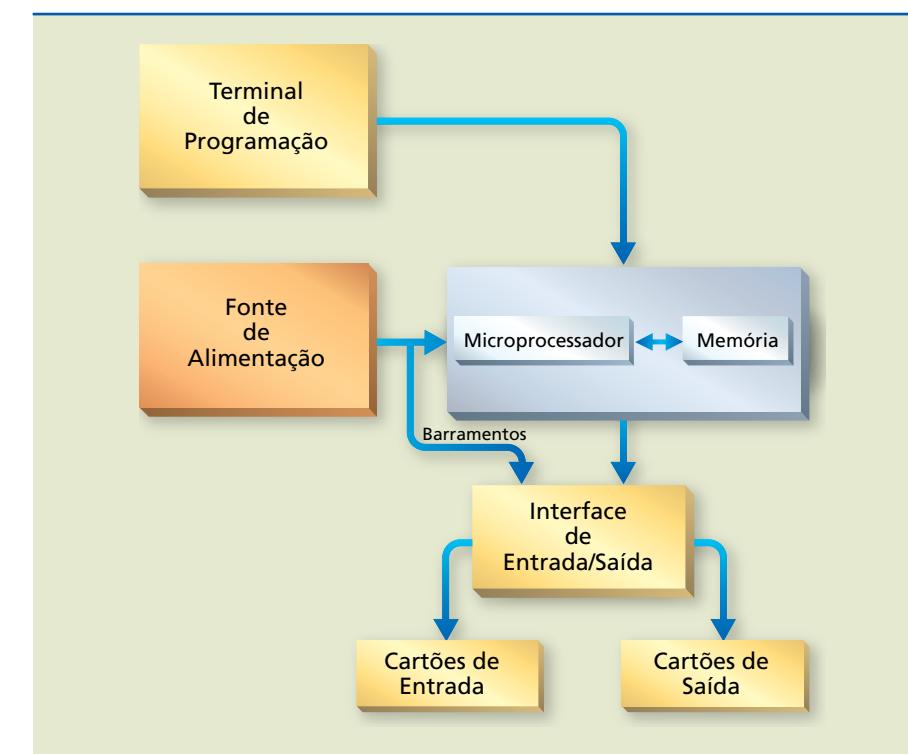
- *hardware e/ou dispositivo de controle, facilmente programável e reprogramável, provocando o mínimo de interrupção da produção;*
- *hardware que ocupa espaço reduzido e baixo consumo de energia;*
- *capacidade de operação em ambiente industrial (trabalha em temperaturas na faixa de 0 a 60º C e em umidade relativa de 5 a 95%);*
- *hardware de controle que permite a expansão em módulos, conforme a necessidade;*
- *sinalizadores de estado e módulos plug-in de fácil substituição e manutenção;*

- possibilidade de monitoração do estado de operação do processo ou do sistema através de sistemas supervisórios de controle e aquisição de dados (SCADA);
- capacidade de alimentar cargas que consomem até 2 amperes de corrente de forma contínua ou chaveada;
- compatibilidade com diferentes sinais de entrada e saída;
- conexão com outros CLPs por meio de redes de comunicação;
- possibilidade de integração com redes de chão de fábrica;
- possibilidade de expansão da capacidade de memória;
- possibilidade de programação de até cinco linguagens diferentes de um mesmo programa;
- custo competitivo em relação aos sistemas de controle convencionais;
- possibilidade de expansão da capacidade de memória;
- conexão com outros CLPs através de rede de comunicação;
- possibilidade de integração com redes de chão de fábrica;
- programação em pelo menos uma linguagem com possibilidade de programação em até cinco linguagens distintas em um mesmo programa.

## 8.1 Estruturação de um CLP

Um CLP é constituído por módulos de entrada e de saída. As funções disponíveis podem ser programadas em uma memória interna por uma linguagem de programação que possui um padrão internacional chamado IEC 61131-3, uma fonte de alimentação e uma CPU (unidade central de processamento).

Entre os componentes integrantes dessa estrutura temos o microprocessador, a memória, as entradas e saídas, o terminal de programação e a fonte de alimentação (figura 8.1).



**Figura 8.1**

Diagrama de blocos com os componentes básicos de um CLP.

### 8.1.1 Microprocessador

É o responsável pelo processamento do programa, que coleta os dados da entrada e efetua o processo segundo o programa do usuário, armazenando na memória e enviando os dados para a saída como resposta ao processamento. Pode ser de 8, 16 ou 32 bits. Em CLPs de maior porte, adiciona-se um coprocessador para aumentar a capacidade de processamento em cálculos complexos com aritmética de ponto flutuante, uma memória RAM (*random access memory*) e uma memória Flash EPROM (*electrically-erasable programmable read-only memory*) ou E2PROM (para cópia do programa em memória não volátil).

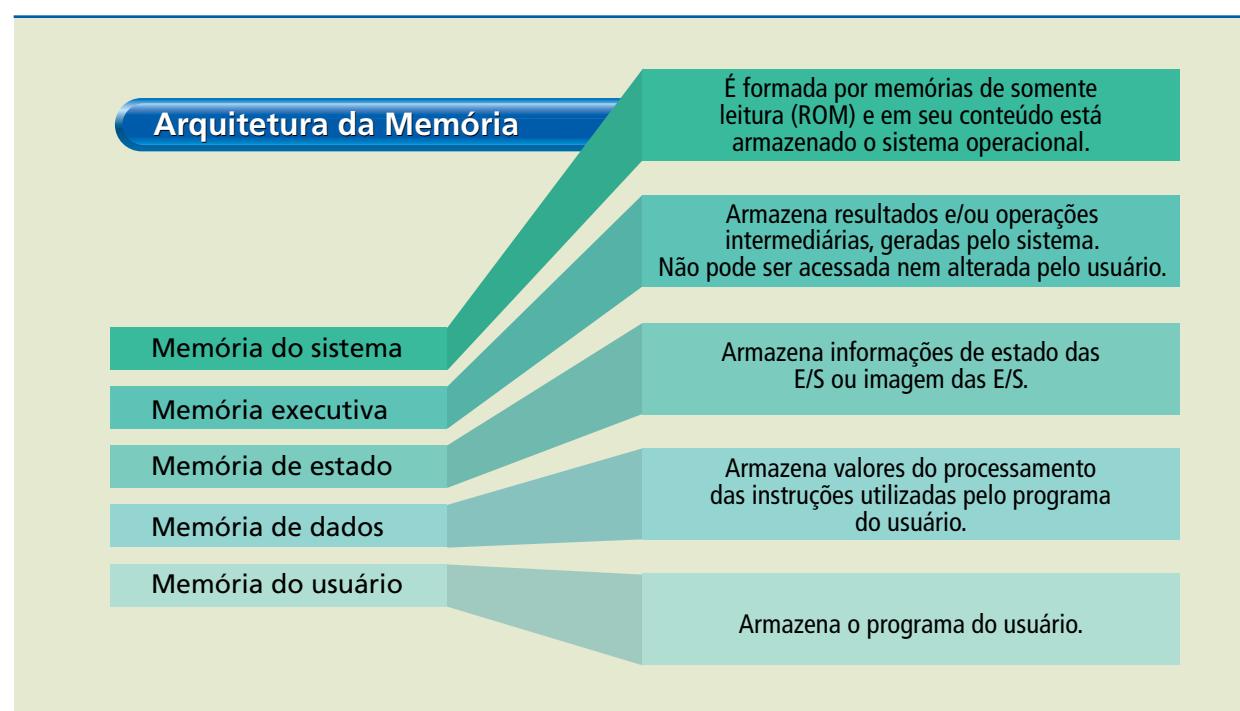
### 8.1.2 Memória

As memórias podem ser divididas em dois grupos, conforme a função:

- memória de dados: serve para armazenar temporariamente os estados de E/S, marcadores de *presets* de temporizadores/contadores e valores digitais para que a CPU possa processá-los. A cada ciclo de varredura a memória de dados é atualizada. Geralmente é uma memória do tipo RAM e é conhecida também como memória de rascunho;
- memória de usuário: armazena as instruções do *software* aplicativo e do usuário – programas que controlam a máquina ou a operação do processo, os quais são continuamente executados pela CPU.

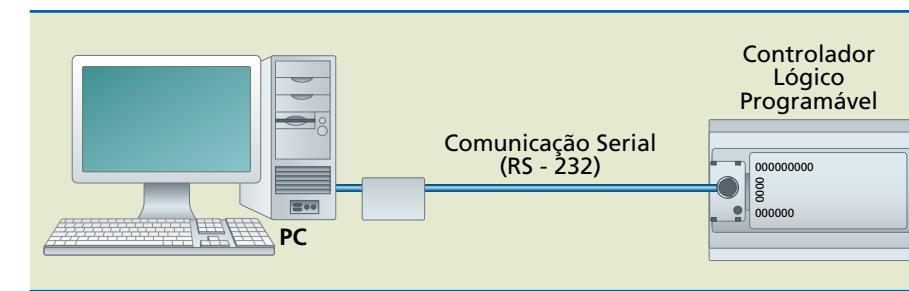
**Figura 8.2**  
Arquitetura da  
memória de um CLP.

A capacidade de memória de um CLP é definida em função do número de palavras de memória previstas para o sistema. Ver um esquema da arquitetura da memória de um CLP na figura 8.2.



### 8.1.3 Terminal de programação

O terminal de programação é um periférico que permite a interação homem-máquina, permitindo ao usuário a introdução de programa (*software*) e a configuração do sistema. Pode ser um terminal exclusivo de um certo fabricante de CLP, ou seja, um equipamento dedicado; ou um *software* capaz de transformar um computador pessoal em um terminal do CLP por ocasião da conexão entre ambos (ver figura 8.3).



**Figura 8.3**  
Terminal não dedicado  
(Manual MicroLogix  
– Allen-Bradley).

Nesse dispositivo de entrada, é realizada a codificação das informações do usuário, numa linguagem que deverá ser entendida pelo processador do CLP.

As funções que poderão ser realizadas de acordo com o tipo de terminal de programação são:

- elaboração do programa;
- introdução de novas instruções;
- modificação de instruções já existentes;
- monitoração do programa do usuário;
- verificação do estado de funcionamento do *hardware* do CLP;
- análise do conteúdo dos endereços de memória;
- atuação de saídas independente da lógica (forçando);
- cópia do programa do usuário em disco ou impressora.

### 8.1.4 Fonte de alimentação

A alimentação de energia do CLP usa uma fonte chaveada e uma única tensão de saída de 24 V. Esse valor é utilizado com a finalidade de alimentar os módulos de entrada e saída de dados e a CPU, ao mesmo tempo. Outra característica importante é que normalmente os componentes eletrônicos das máquinas industriais funcionam com essa tensão por ser bem menos suscetível a ruídos.

### 8.1.5 Componentes de entradas e saídas

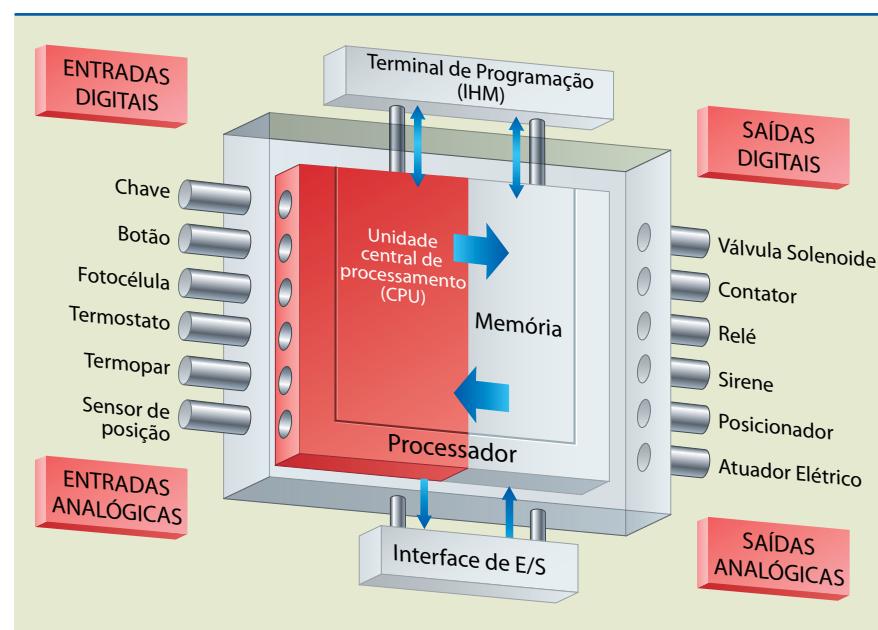
São os circuitos responsáveis pela interação entre o homem e a máquina; pelos quais o homem se comunica com a máquina e pelos quais a máquina externa seus resultados ou controles. Nesses dispositivos, tanto o usuário quanto a máquina podem trocar informações. Os dispositivos de entrada são os responsáveis pela aquisição de dados de variáveis do processo, e os dispositivos de

saída são os responsáveis pelo acionamento de dispositivos físicos como relés, sinalizadores etc.

O acesso a essa interface pode ocorrer por bornes, blocos de bornes ou cabos e conectores. As entradas e saídas de um CLP podem ser divididas em duas categorias: as analógicas e as digitais. Na figura 8.4 são ilustrados os dois modelos de interfaces I/O.

**Figura 8.4**

Arquitetura de um CLP com interfaces de entrada e saída.

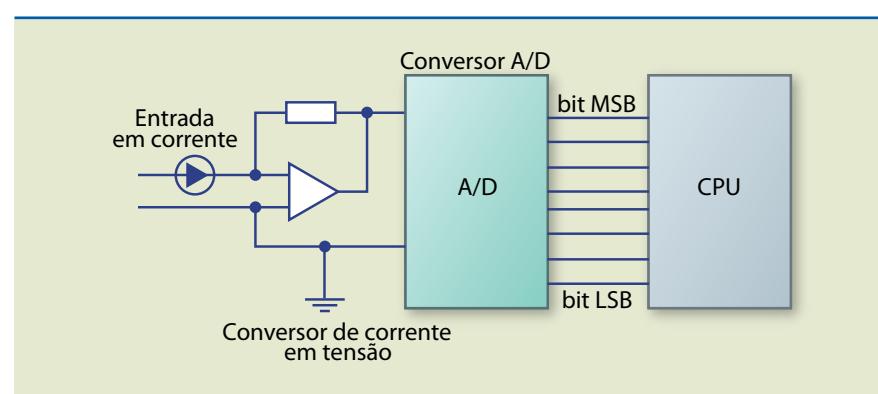


Na entrada, o CLP permite trabalhar com as tensões usuais de comando (24 V em corrente contínua ou 110/220 V em corrente alternada) e as transforma em tensões de nível lógico aceitos pela CPU.

Para que a CPU opere com grandezas analógicas, é necessário que essas entradas sejam convertidas em digitais. O processo utiliza os conversores A/D (análogo para digital), e, assim, grandezas analógicas, como, por exemplo, temperatura, umidade relativa, pressão, entre outras, são convertidas em sequências numéricas binárias interpretadas pela CPU. Na figura 8.5 pode ser visto um esquema de uma interface para entrada analógica.

**Figura 8.5**

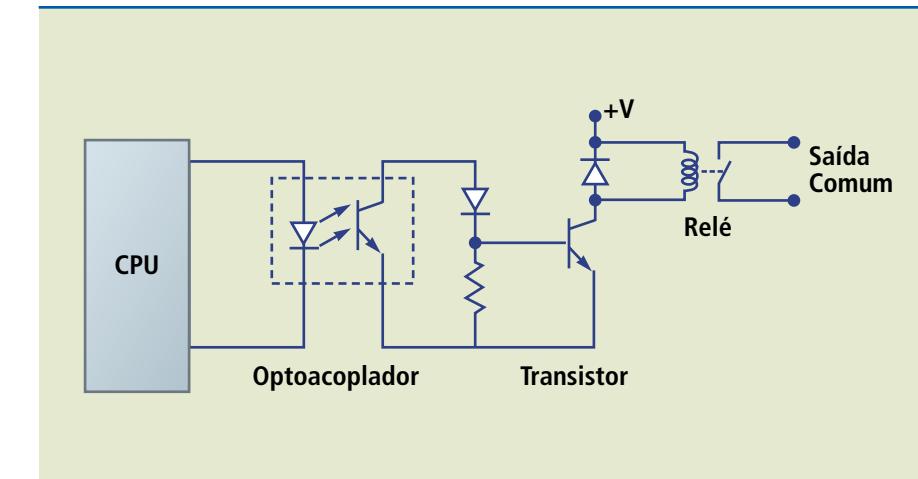
Interface para entrada analógica.



O módulo de saída comuta as tensões de controle fornecidas, necessárias para acionar vários dispositivos conectados. O isolamento é feito por meio de opto-acopladores ou transformadores (isolamento galvânico) – ver figura 8.6.

**Figura 8.6**

Interface para saída de sinal via contato de relé.



As entradas e saídas são organizadas por tipos e funções, em grupos de 2, 4, 8, 16 e até 32. Assim, são agrupadas normalmente como potências do número dois por causa do processamento digital (binário) por interface (cartão eletrônico) de E/S. Os cartões são em geral do tipo de encaixe e, configuráveis, de forma a possibilitar uma combinação adequada de pontos de E/S, digitais e analógicas.

A quantidade máxima de E/S, disponíveis no mercado de CLPs, pode variar de 16 a 8 192 pontos, normalmente, o que caracteriza a existência de pequenos, médios e grandes CLPs.

## 8.2 Interface homem-máquina

O surgimento de novas necessidades do usuário, como a verificação dos processos ou a mudança de certos parâmetros no programa, sem que necessariamente o usuário precise se conectar a um computador para a realização dessa tarefa, fez com que os fabricantes de CLPs desenvolvessem um novo dispositivo que interagisse com o usuário, conhecido como interface homem-máquina ou IHM. Ela é responsável pela comunicação do usuário com o sistema para atuar em variáveis do processo (como temperatura, pressão etc.), sem que interfira no programa ou que entenda perfeitamente como ele funciona.

Existem no mercado duas versões de IHM: a alfa-numérica e a gráfica. Em uma interface alfa-numérica, a IHM é ligada ao CLP por sua porta de comunicação serial. Além dos parâmetros normais, quando se está programando uma IHM, indicam-se qual será a marca e o modelo do CLP com o qual vai se comunicar. Nas interfaces gráficas, o usuário pode, por meio de um programa específico, desenhar comandos em forma de botões, bem como lâmpadas para avisos ou alarmes, escolhendo cores, formatos, tamanhos, e definindo, também, endereços do CLP para cada elemento. Veja uma IHM na figura 8.7.

**Figura 8.7**

IHM



DAVID J. GREEN - TECHNOLOGY / ALAMY / OTHER IMAGES

### 8.2.1 Interface para comunicação em rede

Permite a comunicação do CLP com outros CLPs e com um PC. É colocada no lugar de um dos módulos de E/S ou em uma parte específica da CPU.

O tipo de interface e o cabo utilizado vão definir o padrão físico e o protocolo de rede. Ex.: MPI ou PPI (*point to point*), MODEBUS, FIELDBUS, PROFIBUS.

A comunicação serial usada com maior frequência é feita por simples cabos de par trançado. Os padrões mais comumente utilizados são o RS-232, *loop* de corrente 20 mA, o RS-422, RS-485 e portas USB em alguns casos.

### 8.2.2 Princípio de funcionamento de um CLP

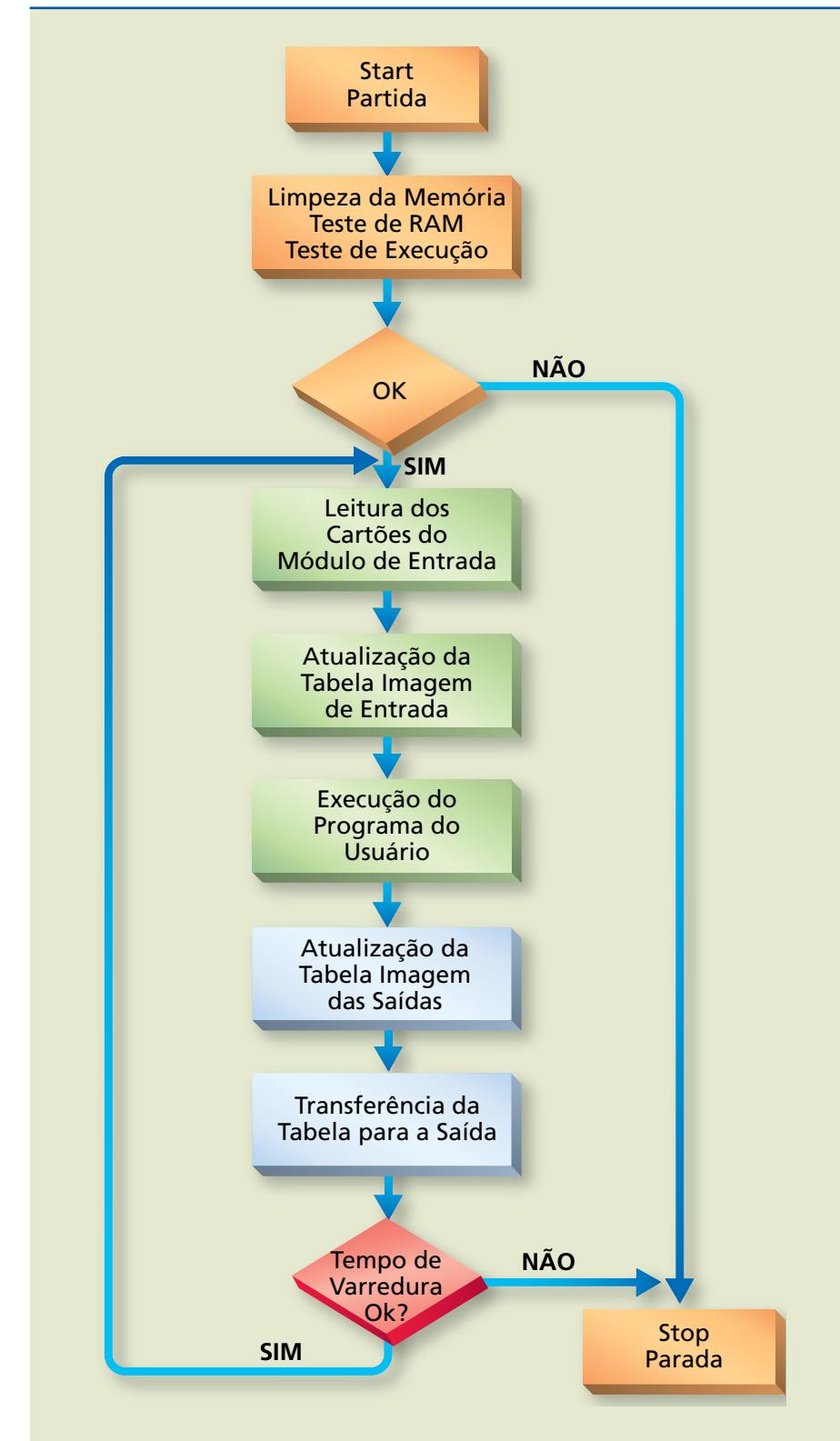
O funcionamento de um controlador lógico programável baseia-se em um sistema de microcomputador em que há uma estrutura de *software* e *hardware* que, através das entradas e saídas de dados, realiza ciclos de varredura, adquirindo, executando e operando, como mostra a figura 8.8.

A CPU do controlador programável possui dois estados de operação: programação e execução, e pode assumir também o estado de erro, quando ocorrem falhas de operação ou de execução do programa.

No estado programação, o CLP não executa o programa, ou seja, não assume lógica de controle, apenas fica preparado para ser configurado ou receber novos programas, ou ainda, modificações de novos programas. A esse tipo de programação chamamos *off-line* (fora de linha).

**Figura 8.8**

Fluxograma simplificado de funcionamento de um CLP.



No estado execução, o CLP assume a função de execução do programa. Em alguns controladores, algumas modificações podem ser feitas no programa durante este estado que é chamado de *on-line* (em linha).

### 8.2.3 Recursos dos softwares

A capacidade de trabalho de um CLP é determinada pelo número de pontos de E/S, pela quantidade de passos de programação, e também pelos recursos de *software* disponíveis, ou seja, pelas funções que podem ser executadas. Os CLPs mais simples possuem pelo menos as seguintes funções básicas de *software*:

- Lógica E, OU e XOR.
- SET e RESET.
- Temporização e contagem.
- Cálculos com aritmética básica (+, -, ×, %).
- Parênteses (para associação de lógicas).
- Comparação de valores.
- Registrador de deslocamento.
- Salto.

À medida que os CLPs aumentam sua capacidade de processamento, são também desenvolvidas novas funções de *software* mais avançadas, como:

- Cálculos com ponto flutuante.
- Cálculos integrais e trigonométricos.
- Malha de controle PID.
- Posicionamento.
- Contagem rápida.
- Leitura de sinais analógicos.
- Linearização de sinais analógicos.
- Lógica *fuzzy*.

## 8.3 Linguagem de programação

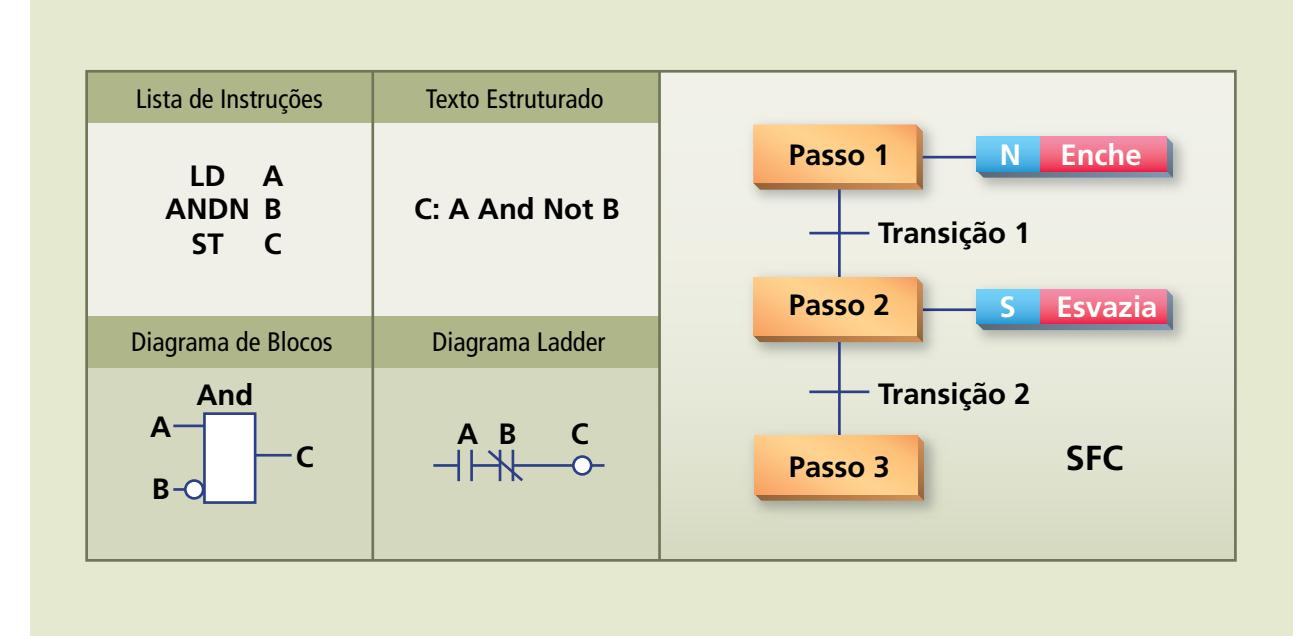
A linguagem de programação é padronizada de acordo com a norma IEC 61131-3, que teve sua segunda edição publicada no ano de 2003. Visa atender tanto os conhecimentos do uso do relé, no qual os sistemas são automatizados quando se faz uso deles, como os conhecimentos da era digital, em que os sistemas são automatizados com os CLPs. No primeiro caso, fazemos a adequação da representação da linguagem pelos diagramas de contatos; no segundo, a representação pelos diagramas lógicos da tecnologia digital, ou ainda, a representação matemática.

Entre as principais vantagens da norma, podemos destacar a facilidade que o usuário tem em utilizar módulos e estruturar a programação em elementos funcionais, bem como definir a linguagem em que vai programar determinada parte do projeto, além de estar usando um ambiente de programação mundialmente conhecido, adaptável aos inúmeros fabricantes.

De acordo com a norma IEC 61131-3 e considerando a forma de representação, as linguagens de programação podem ser classificadas em dois grupos: gráficas e textuais.

Nas linguagens de programação gráficas, temos a *Sequential Function Chart* (SFC), o *Diagrama Ladder* (Ladder Diagram – LD) e Blocos de Função (*Function Block Diagram* – FBD). Nas linguagens de programação textuais temos a Lista de Instruções (*Instruction List* – IL) e Texto Estruturado (*Structured Text* – ST). Uma representação das cinco linguagens de programação é mostrada na figura 8.9.

**Figura 8.9**  
Representação das cinco linguagens de programação.



A SFC estrutura a organização interna do programa, decompõe um problema de controle em partes facilmente gerenciáveis, mantendo a visão global da solução do problema. De outra forma, são passos ligados a blocos de ação e transições, em que cada passo representa um estado do sistema sob controle e a transição é associada à condição. Se verdadeira, desativa o passo anterior e ativa o seguinte.

A Lista de Instruções (IL) é uma linguagem textual, semelhante à linguagem Assembler, e, da mesma forma, seu programa é escrito com instruções abreviadas, chamadas mnemônicos. Alguns fabricantes disponibilizam a Lista de Instruções como uma segunda opção em um pacote que traz também outra linguagem de programação.

O Diagrama de Blocos (FDB), também chamado de Diagrama de Blocos de Funções, é amplamente utilizado na indústria de processos e de manufatura, expressando o comportamento das funções, programas e blocos de funções como um conjunto de gráficos interconectados. Assemelha-se à representação de um sistema de fluxo de sinais entre os elementos e expõe os blocos.

O Texto Estruturado (ST) é uma linguagem muito poderosa e vem substituir todas as linguagens declarativas, como Linguagem de Instruções, BASIC estruturado, pois tem suas raízes na linguagem Pascal e na linguagem C. Essa

linguagem pode ser usada na definição de blocos de funções complexas, com aplicação em qualquer outra linguagem e no detalhamento de ações e ainda em transições de um programa SFC.

A linguagem de programação Diagrama Ladder (LD) é uma linguagem gráfica, que tem como base os diagramas elétricos e que representa contatos e bobinas interconectados, destacando o fluxo de energização entre os elementos. É a linguagem mais difundida por ser semelhante aos esquemas elétricos usados para o comando convencional e pela facilidade de visualização pelo programador.

### 8.3.1 Programação em Ladder

O Diagrama Ladder utiliza lógica de relé, com contatos e bobinas, e é por esse motivo que pessoas que já têm conhecimento de circuitos elétricos, assimilam essa linguagem com muita facilidade. Esses diagramas já eram utilizados para documentar antigos blocos de relés, antes da existência dos CLPs. Ainda hoje se mantém como a mais usada, estando presente praticamente em todos os CLPs disponíveis no mercado.

Os vários circuitos são dispostos horizontalmente, com a bobina na extremidade direita, e alimentados por duas barras verticais laterais, formando uma figura que lembra uma escada. Por esse formato, recebe o nome de Ladder, que significa “escada”, em inglês. A cada linha horizontal está associada uma sentença lógica, sendo os contatos as entradas das sentenças, as bobinas, as saídas das sentenças, e a associação dos contatos, a lógica das sentenças.

Os símbolos básicos são indicados na figura 8.10.

**Figura 8.10**

Símbolos básicos do Ladder:

TIPO	SÍMBOLO	DIAGRAMA ELÉTRICO
CONTATO ABERTO		
CONTATO FECHADO		
SAÍDA		

Os operandos (nome genérico dos contatos e bobinas) no Ladder são identificados com um endereço da memória à qual se associa na lógica do CLP. Esse endereço de memória aparece no Ladder com um rótulo (*label*), nome simbólico para facilitar a programação, arbitrariamente escolhido pelo fabricante do CLP.

O estado de cada operando é representado em um *bit* correspondente na memória imagem (denominada palavra de *status*): este *bit* assume nível 1 (um) se o operando estiver acionado, e 0 (zero) quando não está acionado.

Se a bobina com endereço de saída estiver acionada, um par de terminais no módulo de saída apresentará condição de condução elétrica. Os contatos endereçados como entradas se acionam, enquanto seu respectivo par de terminais no módulo de entrada é acionado: fecham-se, se forem NA, e se abrem se forem NF.

Os contatos que irão energizar bobinas deverão ser de mesmo tipo do contato externo que aciona seu ponto no módulo de entrada e os que tiverem a função de desacionar as bobinas devem ser do tipo oposto do contato externo que os aciona. Veja quadro 8.1.

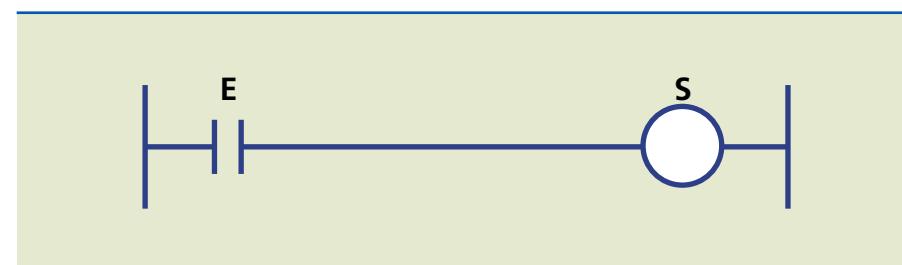
	Se a chave externa for	O contato no Ladder deve ser
Para ligar	NA	NA
	NF	NF
Para desligar	NA	NF
	NF	NA

**Quadro 8.1**

Relação entre a chave externa e o contato Ladder para ligar e desligar.

A lógica indica que a chave externa pode ser de qualquer tipo, desde que no diagrama Ladder se utilize o tipo de contato conveniente. Contudo, por segurança, não se deve utilizar chave externa NF para operação de ligar, nem NA para operação de desligar.

Na figura 8.11 temos um circuito exemplo básico para acionamento em Ladder:



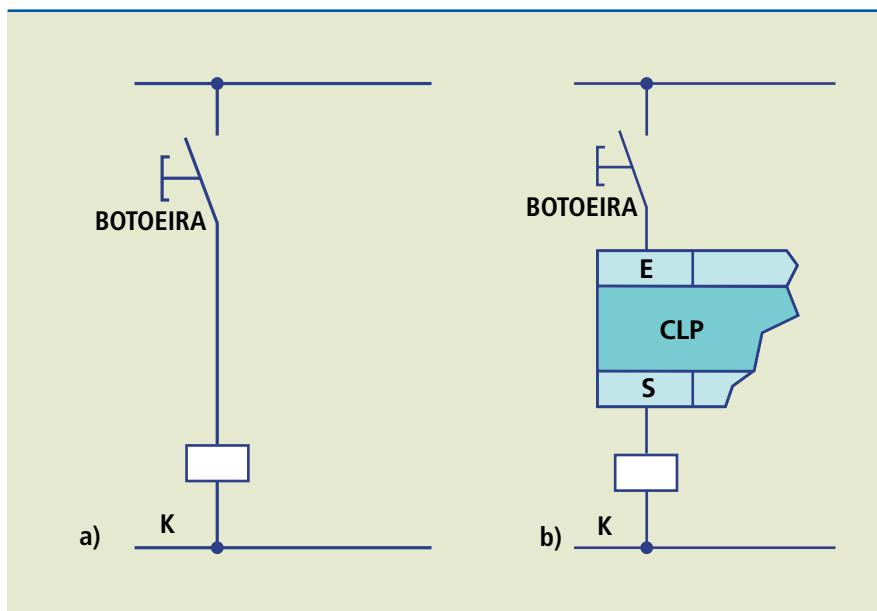
**Figura 8.11**

Circuito para análise de um acionamento em Ladder.

Ao analisarmos os módulos de entrada e saída do CLP, vemos que, quando o dispositivo (botoeira, sensor, fim de curso) ligado à entrada E fechar, este acionará o contato E, que estabelecerá uma continuidade de forma a acionar a bobina S (saída). Assim, o dispositivo ligado à saída S será acionado. Os termos E e S têm aqui fins didáticos para indicar entradas e saídas; cada fabricante utiliza uma nomenclatura diferente. Na figura 8.12, vemos a montagem física do Diagrama Ladder indicado na figura 8.11, em duas versões, com o circuito elétrico e com a ligação de entrada e saída ao CLP.

**Figura 8.12**

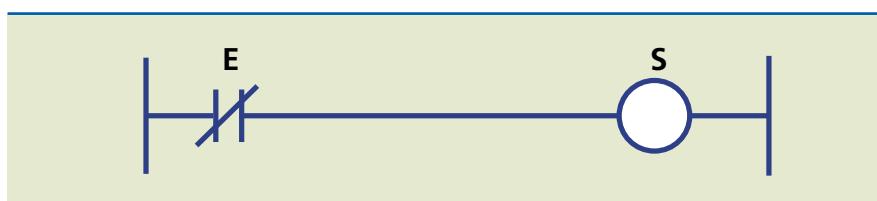
Círcito básico de acionamento: a) diagrama elétrico de comando; b) mesmo círcito com a ligação de entrada e saída ao CLP.



O contato normalmente fechado NF é um contato de negação (também chamado inversor), como pode ser visto no exemplo abaixo, similar ao programa anterior substituindo o contato NA por um NF (ver indicação na figura 8.13).

**Figura 8.13**

Acionamento de uma saída por um contato inversor NF.

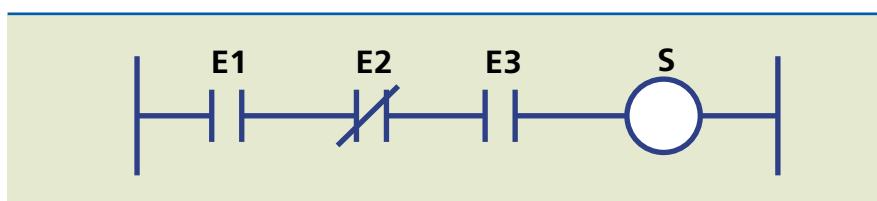


Na análise dos módulos de entrada e saída, vemos que, quando o dispositivo ligado à entrada E abrir, desacionará o contato E, o qual, por ser NF, estabelecerá uma continuidade elétrica de forma a acionar a bobina S. Portanto, o dispositivo ligado à saída S será acionado.

No diagrama Ladder, os contatos são associados para criar as lógicas E e OU com a saída. Quando em série, executam a lógica E, pois a bobina só é energizada quando todos os contatos estiverem fechados.

**Figura 8.14**

Associação de contatos em série em Ladder.



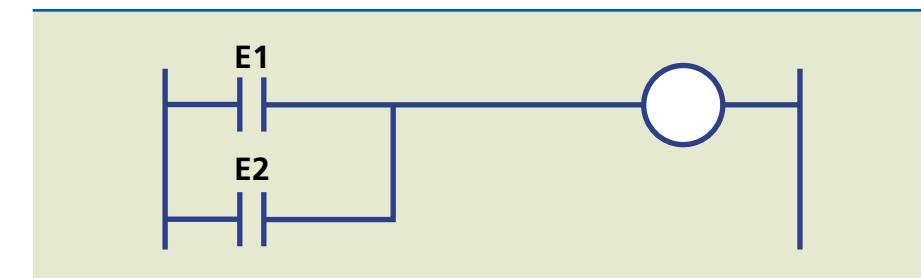
A saída S será acionada quando:

E1 estiver acionada e E2 estiver não acionada e E3 estiver acionada.

A lógica OU é conseguida com a associação paralela de contatos NA acionando a saída, desde que pelo menos uma das entradas esteja fechada.

**Figura 8.15**

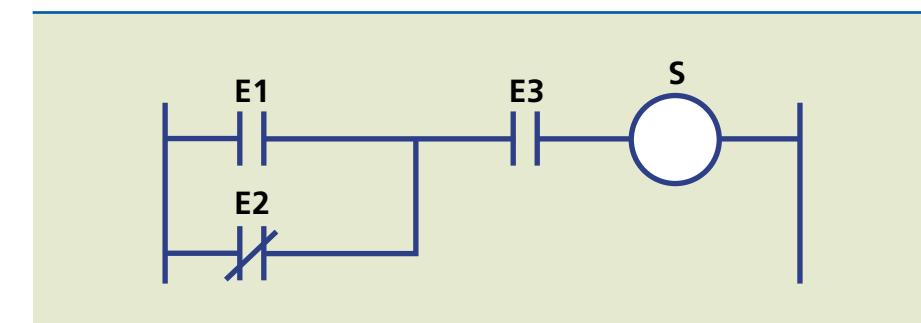
Associação de contatos em paralelo em Ladder.



Muitas vezes algumas resoluções obrigam a utilizar as associações mistas (figura 8.16), com soluções mais complexas, como a do exemplo a seguir.

**Figura 8.16**

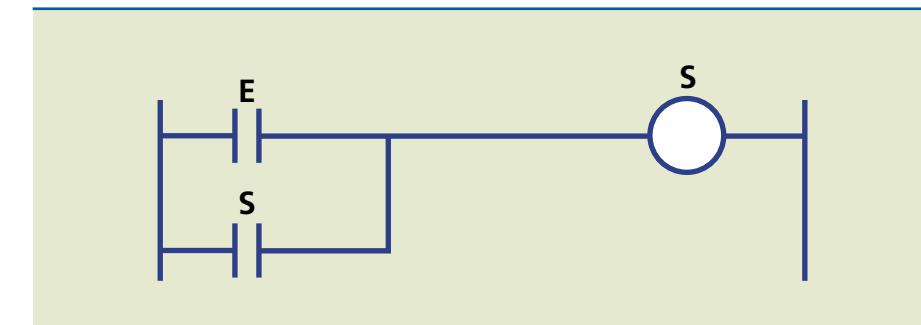
Associação mista de contatos em Ladder.



Em várias circunstâncias na programação em Ladder fazemos o uso da técnica do selo (figura 8.17), utilizando um contato da saída, que pode ser um relé interno do CLP ou uma memória auxiliar. Com isso, conseguimos manter a saída energizada usando uma técnica simples, mesmo que a entrada E seja um botão pulsador.

**Figura 8.17**

Técnica do selo utilizando a programação Ladder.

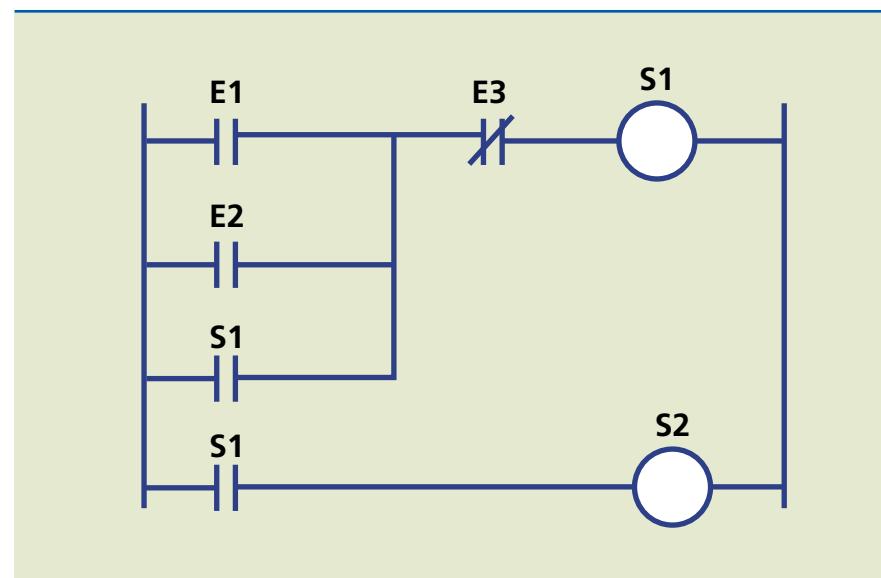


### Exemplo

Elaborar um programa em Ladder que permita o acionamento de um motor quando acionarmos um botão pulsador E1 ou E2 e desligá-lo ao acionarmos um botão pulsador E3.

*Solução:*

**Figura 8.18**  
Diagrama Ladder para solução do exemplo proposto.

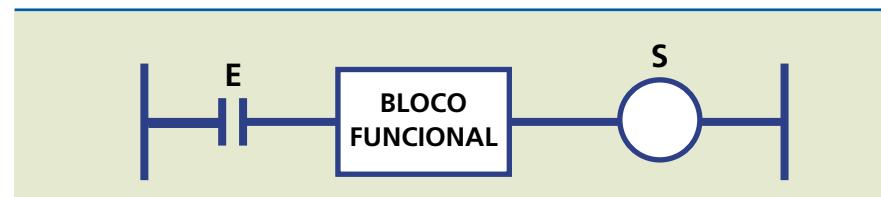


Ao acionarmos E1 ou E2, S1 é ligada e um primeiro contato S1 cria o selo ao fechar, mantendo a bobina S1 acionada, mesmo quando desacionamos E1 e E2. O segundo contato S1 também fecha, mantendo a bobina S2 ligada. Então, o motor entra em rotação, desligando somente quando acionamos o botão pulsador E3.

### 8.3.2 Algumas instruções básicas

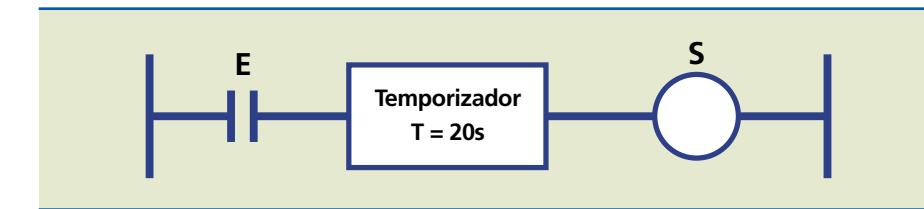
Por causa da grande quantidade de fabricantes de CLP, os blocos funcionais normalmente apresentam-se de diferentes formas, mas o princípio de funcionamento é o mesmo. Esses blocos têm a função de auxiliar ou completar o controle do equipamento, usando na lógica Ladder, instruções como contagem, temporização, instruções *SET*, *RESET*, soma, divisão, subtração, multiplicação, PID, conversão BCD/Decimal etc. Ver exemplo de indicação de bloco funcional no diagrama Ladder (figura 8.19).

**Figura 8.19**  
Introdução de um bloco funcional em um diagrama Ladder.



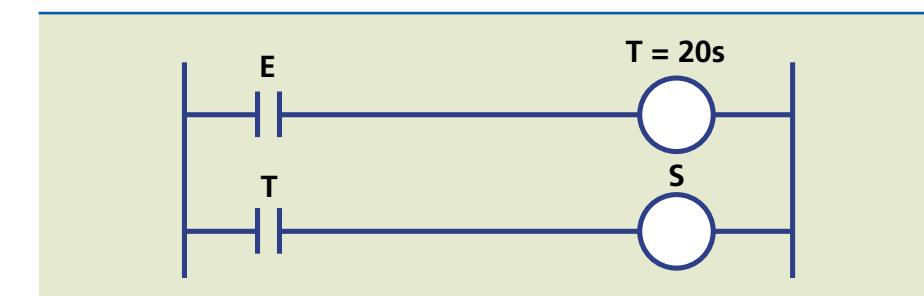
### Temporização

O temporizador compara o intervalo de tempo transcorrido desde sua habilitação até este se igualar ao tempo preestabelecido. Quando completar a temporização, a CPU eleva a nível 1 um *bit* próprio na memória de dados e aciona a saída a ela associada.



Na figura 8.20 há um exemplo de aplicação. Nesse caso, quando a entrada E é acionada, habilita-se o temporizador que após 20 segundos aciona a saída S. Quando E for desativada, o temporizador será desabilitado e desacionará a saída S. Normalmente, os temporizadores voltam para o valor inicial quando o sinal de condição é removido. Alguns são retentivos; significa que, apesar de o sinal da condição ter sido desativado, o temporizador armazena o valor alcançado e recomeçará a partir daquele valor, quando o sinal for novamente estabelecido. Para zera-lo é necessário o uso da instrução RST. Em alguns CLPs, essa instrução apresenta duas entradas, uma de habilitação da contagem e outra para zermamento ou *reset* da saída. Uma forma alternativa de programação para alguns CLPs é mostrada no diagrama Ladder (figura 8.21).

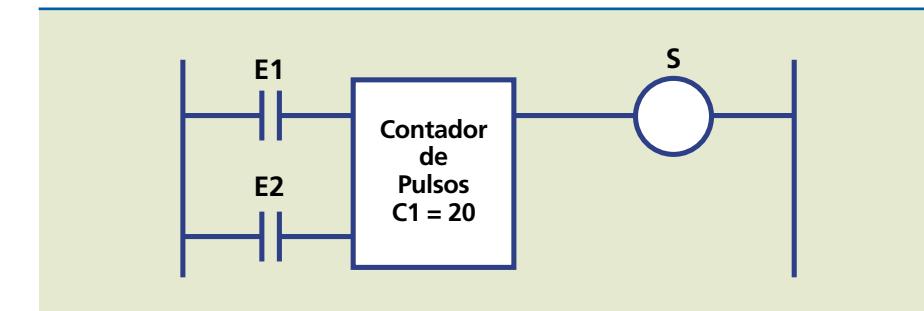
**Figura 8.20**  
Bloco funcional de temporização.



### Contagem

Essa instrução é bloco funcional especial; no diagrama Ladder, ela aparece no meio de uma linha de programação e, usualmente, o contador após computar o número de eventos, deposita essa contagem em byte reservado. Quando a contagem for igual ao valor prefixado, essa instrução energizará um bit de contagem completo o qual é utilizado para energizar ou desenergizar um dispositivo. Os contadores são encontrados em diferentes formas e os mais comuns são: o contador *up*, o contador *down*, o contador bidirecional, o contador de duas fases A e B, o contador de 16 bits, o contador de 32 bits etc. Veja a linha de programação com um bloco funcional de contagem na figura 8.22.

**Figura 8.21**  
Outra forma de apresentação de temporização.



**Figura 8.22**  
Linha de programação com bloco funcional de contagem.

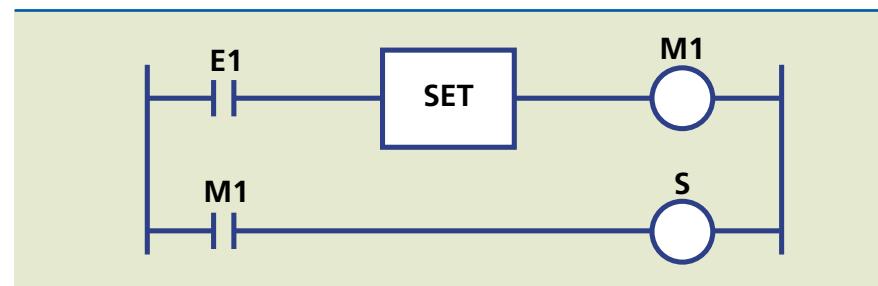
Todos os contadores são retentivos e essa característica é essencial para sua operação, visto que eles contam o número de vezes que vão de OFF (desligado) para ON (ligado), através dos pulsos recebidos do contato que os controlam, para poder operar as saídas. Os contadores devem ser zerados após o evento, para desacionar as saídas que estão até então mantidas acionadas.

#### Instrução SET

A instrução *SET* é uma saída especial vinculada ativa; é ativada como resultado de um conjunto verdadeiro de condições. Ao ser acionada, todos os contatos de saída a ela associados (relés, memórias, saídas) permanecem acionados, como uma contadora. Ver exemplo na figura 8.23.

**Figura 8.23**

Instrução *SET*.



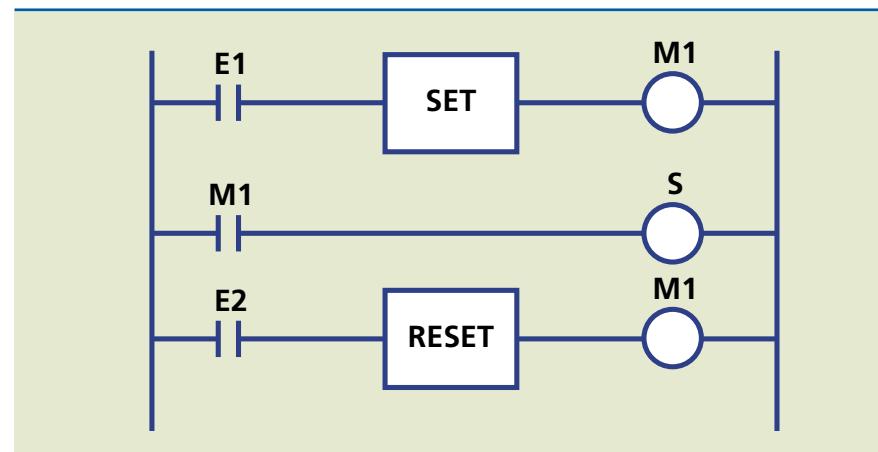
O exemplo da figura 8.23 mostra que a saída S não é ativada até que a entrada E1 tenha sido ativada. O sinal de E1 ativará a memória M1. Esse contato controla diretamente, mesmo que a entrada E1 tenha sido desativada, M1 permanece ativada e, consequentemente, S permanece ativada.

#### Instrução RESET

A instrução *RESET* é uma instrução especial vinculada ativa (desativa); é ativada como resultado de um conjunto verdadeiro de condições. Ao ser acionada a instrução *Reset*, todos os contatos da saída a ela associados (relés, memórias, saídas, contadores, temporizadores, *flags*) serão desacionados, como se fosse uma contadora. Ver figura 8.24, que contém as funções *SET* e *RESET*.

**Figura 8.24**

Linhas de programação com as instruções *SET* e *RESET*.



O esquema da figura 8.24 indica que a saída S é ativada pela instrução *SET*, ao ser acionado E1. Para desativar M1 e, consequentemente, S, basta que E2 seja acionado, introduzindo a instrução *RESET*.

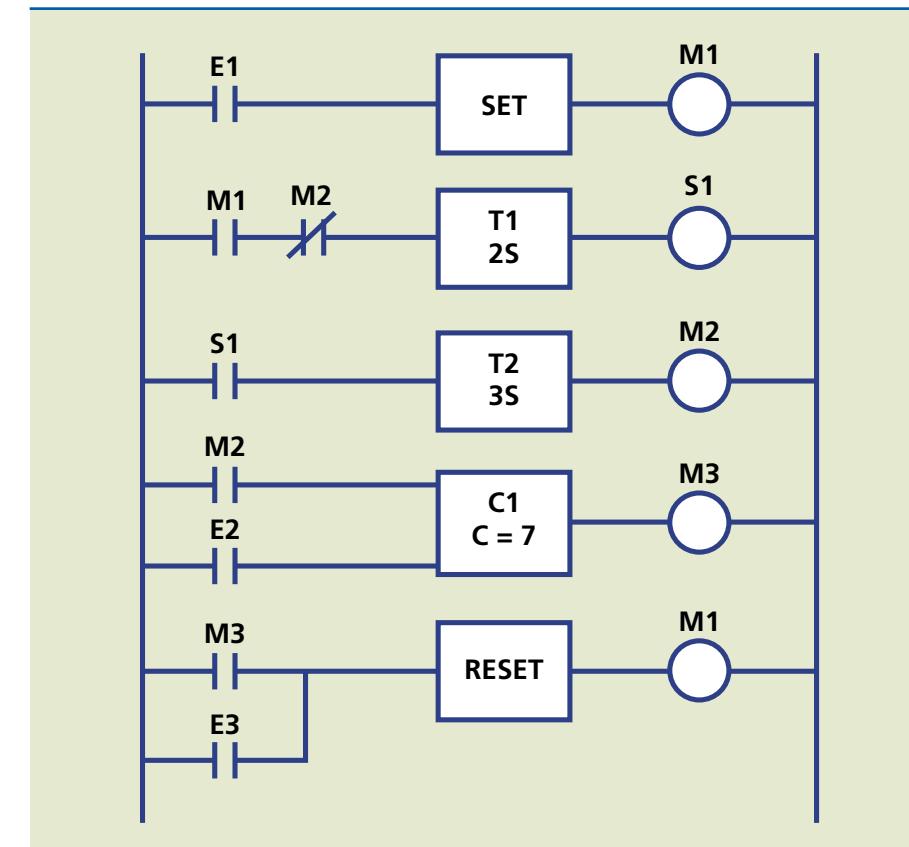
## 8.4 Exercício para fixação de conceito

Vamos elaborar um exercício utilizando uma programação em Ladder, no qual uma lâmpada é ativada pelo botão pulsador E1, demorando 2 segundos para acender. A lâmpada permanece acesa durante 3 segundos e se desliga automaticamente, ficando assim por 2 segundos. Após esse período, acende novamente por mais 3 segundos, repetindo o ciclo inicial. O ciclo da lâmpada se repete automaticamente, a menos que seja encerrado manualmente ou que a lâmpada já tenha se desligado por 7 vezes. Quando a lâmpada desligar-se por 7 vezes, a entrada E2 deverá ser utilizada para resetar o contador.

Este exercício foi elaborado para programação em um controlador lógico programável que obedece aos parâmetros definidos neste capítulo. Em um CLP específico, teremos outras disposições de instruções, blocos lógicos, saídas etc., que variam de um fabricante para outro. Observar ainda que nesta resolução foram utilizadas praticamente todas as instruções apresentadas neste capítulo.

*Solução:*

**Figura 8.25**

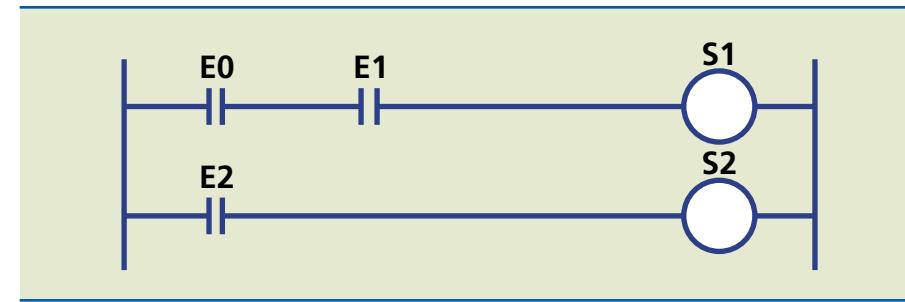


O exemplo (figura 8.25) mostra que, ao ser acionado o botão pulsador E1, a memória M1 fica ativada pela instrução *SET* e o contato M1 fecha, energizando o temporizador com retardo no acionamento T1. Após 2 segundos, a lâmpada S1 acende e aciona o fechamento de seu contato S1, que energiza o temporizador com retardo no desligamento T2. Ao terminar a contagem de tempo de 3 segundos, a memória M2 é acionada e ativa os dois contatos M2. A lâmpada S1 apaga ao abrir o contato M2 normalmente fechado, que desativa T1; o contato M2 normalmente aberto emite um pulso para o contador C1, que faz a primeira contagem de desligamento da lâmpada. O ciclo se repete por 7 vezes, quando então C1 ativa a memória M3, cujo contato aciona a instrução *RESET*, que desaciona M1, apagando definitivamente a lâmpada. Caso se deseje interromper o ciclo de funcionamento, basta acionar E3; o contador C1 é zerado com o botão pulsador E2.

# Capítulo 9

## Comandos eletropneumáticos com CLP

A figura 9.2 indica qual deve ser o diagrama Ladder para solucionar o problema.



**Figura 9.2**  
Diagrama Ladder para o exemplo 1.

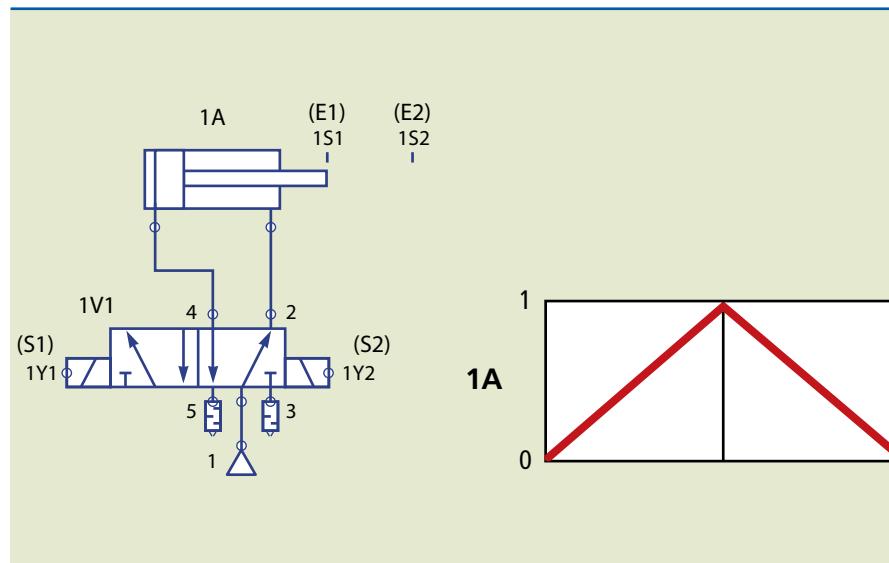
**O**s controladores lógicos programáveis encontram um campo de aplicação bastante amplo na realização de trabalhos que utilizam os atuadores pneumáticos e hidráulicos. As válvulas direcionais que acionam os atuadores são movidas por solenoides, e os sinais enviados pelos elementos de fim de curso são sinais elétricos, tornando relativamente simples programar um CLP para automatizar a realização de tarefas.

As entradas e saídas, normalmente digitais para esse tipo de trabalho, também contribuem para a aplicação dessa técnica em automatizações de processos que utilizam esses tipos de atuadores. A seguir, veremos algumas sequências de aplicações com os atuadores na realização de trabalho.

## 9.1 Atuador comandado por válvula atuada por duas solenoides

Exemplo 1: programação em Ladder para o circuito eletropneumático que cumpra o diagrama trajeto-passo representado na figura 9.1 e que seja acionado por botão pulsador (E0).

**Figura 9.1**  
Figura ilustrativa para o exemplo 1.



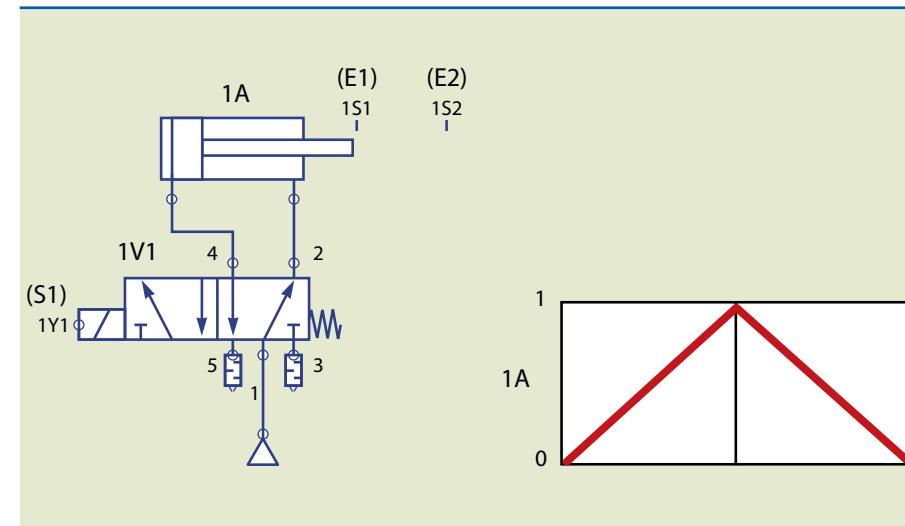
Inicialmente, a entrada E1 está com o contato fechado, em função do atuador estar recuado; ao ser pressionado o botão E0, a solenoide 1Y1 (correspondente à saída S1) é energizada e comuta a válvula direcional 1V1, fazendo o atuador avançar. Chegando ao fim de curso, o êmbolo aciona 1S2 (que corresponde à entrada E2), acionando a solenoide 1Y2 (indicada no diagrama como S2). O atuador então retorna ao início do curso, mesmo que o operador continue apertando E0, graças à presença do elemento 1S1 (E1) que, nesse momento, está com o contato aberto.

Essa é uma solução bastante simples, porém um controlador lógico programável possui capacidade para várias possíveis soluções. Vejamos no próximo exemplo uma resolução para a realização de trabalho utilizando um atuador de dupla ação comandado por uma válvula atuada por uma única solenoide.

## 9.2 Atuador comandado por válvula atuada por simples solenoide

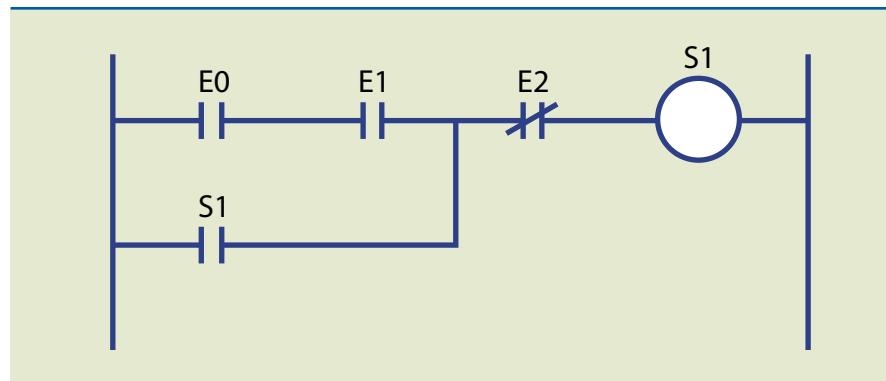
Exemplo 2: programação em Ladder para o circuito eletropneumático com atuador de dupla ação que cumpra o diagrama trajeto-passo representado a seguir e que seja acionado por botão pulsador (E0).

**Figura 9.3**  
Figura ilustrativa para o exemplo 2.



Em uma programação Ladder, podemos ter várias soluções; vamos ver ao menos duas delas (a figura 9.4 apresenta a primeira delas).

**Figura 9.4**  
Diagrama Ladder para o exemplo 2.

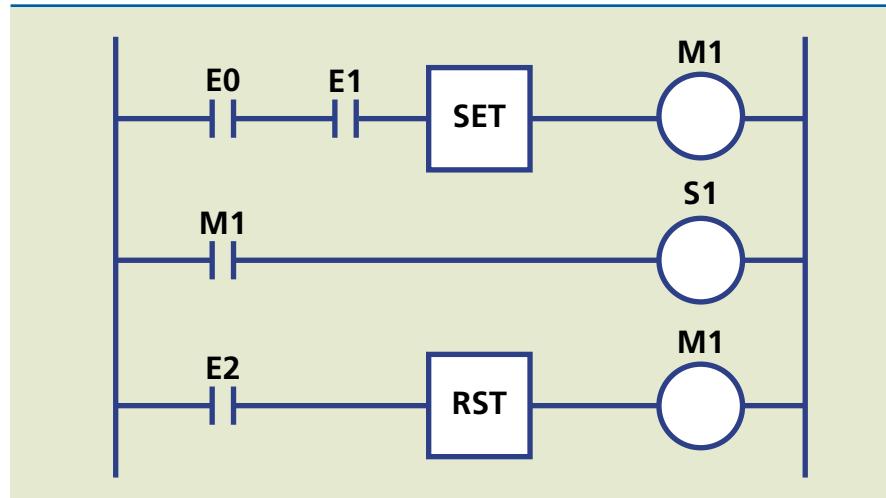


Como a válvula direcional utilizada para acionamento do atuador é comandada por uma única solenoide, o sinal elétrico deve ser mantido enquanto o êmbolo avança, mesmo após o operador parar de apertar o pulsador E0. O contato aberto de S1 (1Y1) mantém essa energização usando a técnica do selo.

Ao chegar ao final do curso, o atuador aciona o contato NF de E2, desativando o selo. Na sequência, a mola faz a válvula 1V1 alterar sua disposição interna; com isso, o atuador 1A recua para a posição inicial, mesmo que o operador continue apertando o pulsador E0. O sistema está pronto para iniciar um novo ciclo.

Outra solução é a utilização da instrução *SET*, conforme podemos ver na figura 9.5.

**Figura 9.5**  
Diagrama Ladder indicando solução alternativa para o exemplo 2.

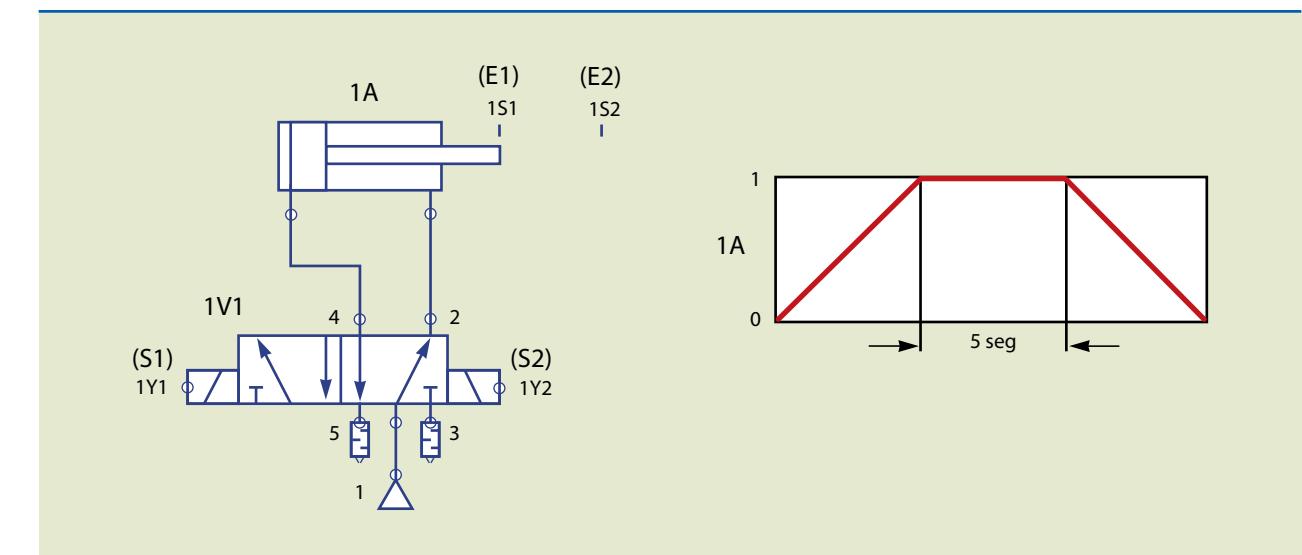


Ao pulsar E0, é ativada a instrução *SET*, que acionará a memória M1, cujo contato NA energiza a saída S1 (1Y1); dessa forma, o atuador 1A avança e aciona o elemento fim de curso E2 (1S2). A instrução *RESET* é ativada e desliga a memória M1, provocando a comutação da válvula direcional 1V1 e o retorno do atuador.

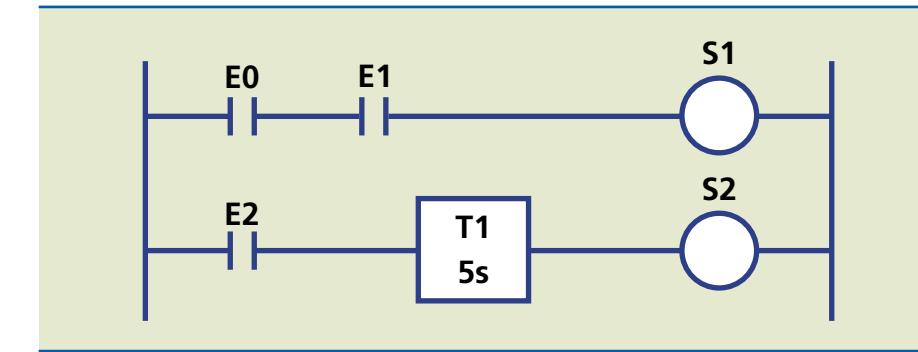
### 9.3 Recuo do atuador com temporização

Exemplo 3: programação em Ladder do circuito eletropneumático que cumpra o diagrama de tempos representado na figura 9.6 e obedeça aos seguintes critérios: acionamento por botão pulsador (E0) e manutenção do atuador parado após avanço por 5 segundos.

**Figura 9.6**  
Figura ilustrativa para o exemplo 3.



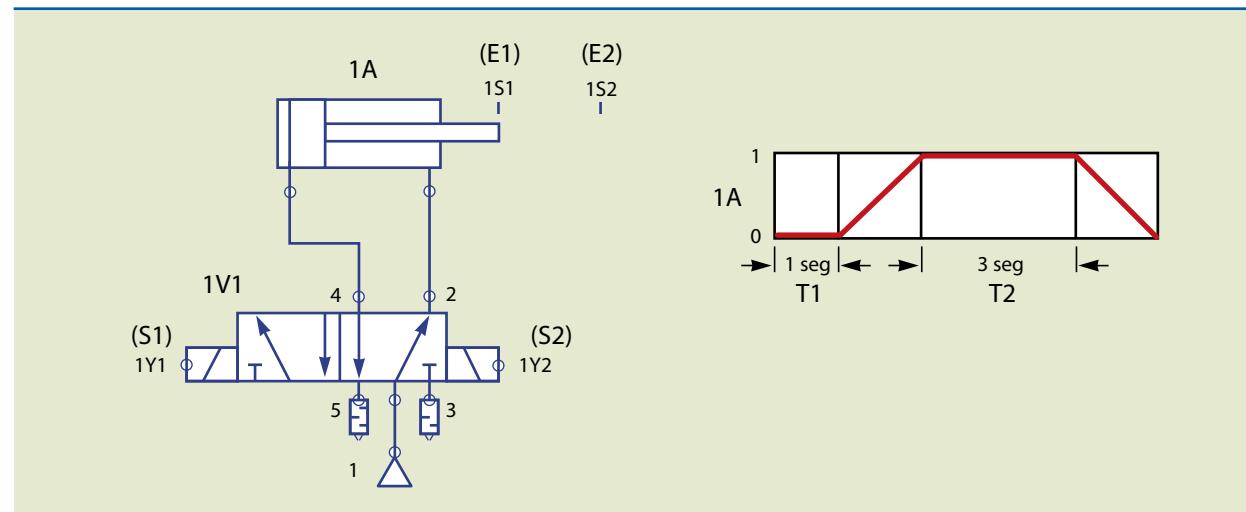
**Figura 9.7**  
Diagrama Ladder para o exemplo 3.



A solução é indicada na figura 9.7. Ao ser pulsado o botão E0, a solenoide 1Y1 (correspondente à saída S1) é energizada e comuta a válvula direcional 1V1, fazendo o atuador avançar. Chegando ao fim de curso, o êmbolo aciona 1S2 (que corresponde à entrada E2), o que permite o início da contagem do tempo pelo temporizador T1. Como o temporizador utilizado é do tipo T-ON, ele ativará a saída S2 (1Y2) após o tempo de 5 segundos, permitindo então o retorno do atuador.

### 9.4 Circuito com dupla temporização e contagem

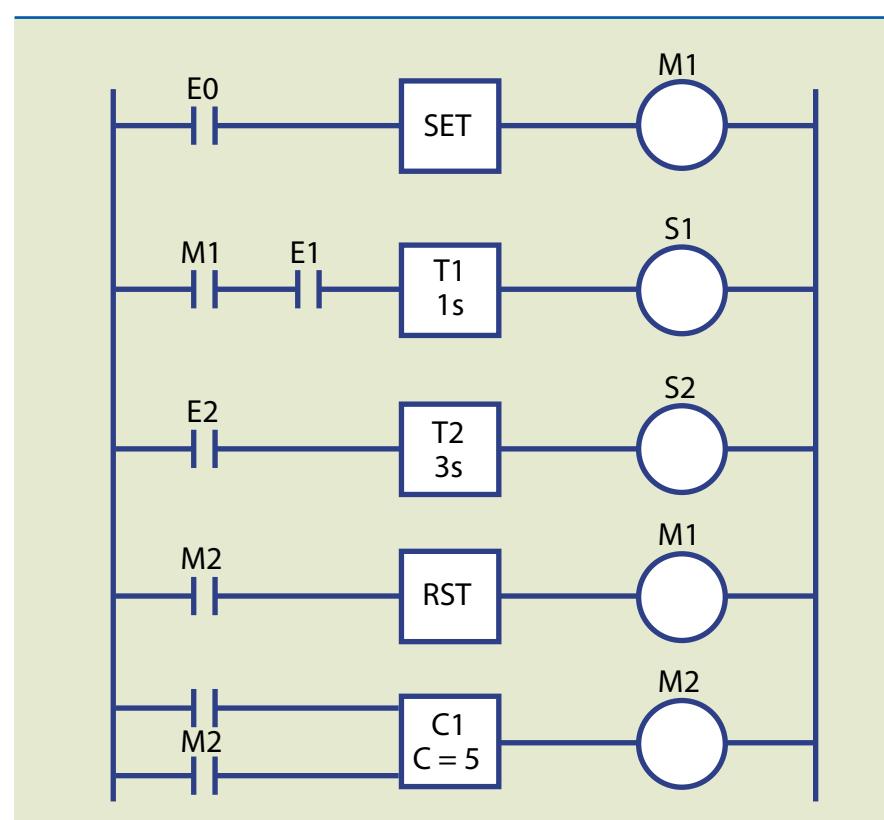
Exemplo 4: programação em Ladder do circuito eletropneumático que cumpra o diagrama de tempos representado na figura 9.8 e obedeça aos seguintes critérios: acionamento por botão pulsador E0 e execução automática de 5 ciclos.



**Figura 9.8**

Figura ilustrativa para  
o exemplo 4.

Nesse circuito, temos a oportunidade de utilizar dois temporizadores e um contador, além de podermos usar também as instruções *SET* e *RESET*. Ver a solução apresentada no diagrama Ladder da figura 9.9.



A solução é indicada na figura 9.9. Ao pulsar E0, é ativada a instrução *SET* que aciona a memória M1, cujo contato NA energiza um temporizador T1, ajustado para 1 segundo; decorrido esse tempo, a saída S1 (1Y1) é acionada e o atuador 1A avança. O elemento fim de curso 1S2 (E2) é então ativado e aciona o temporizador T2.

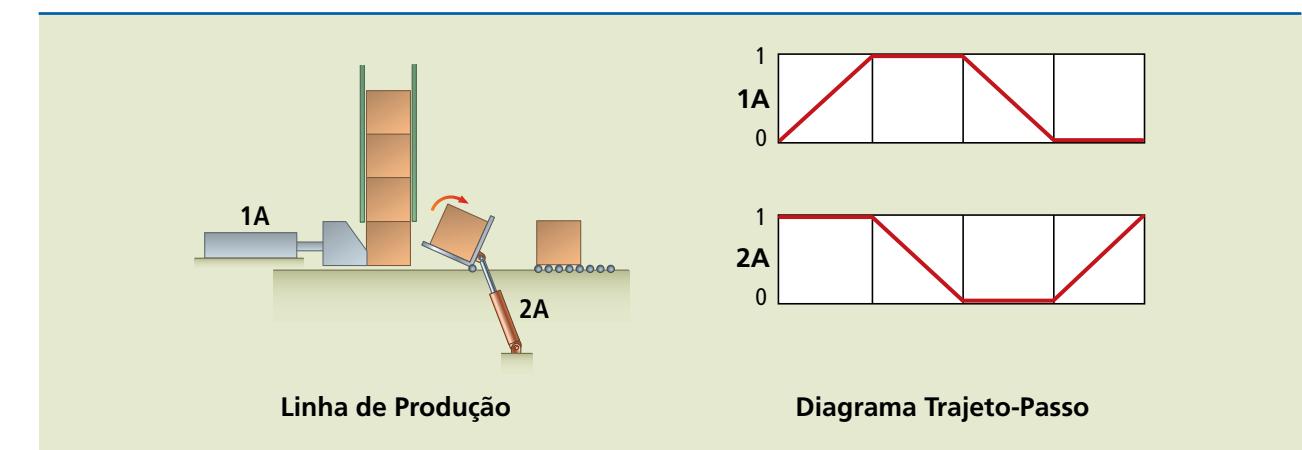
rizador T2, ajustado para 3 segundos, ao mesmo tempo que gera um pulso de contagem no contador C1.

Na sequência, a saída S2 (1Y2) é acionada, fazendo o atuador retornar para sua posição original; o processo de avanço é novamente iniciado e o ciclo vai se repetir por 5 vezes. Quando a contagem de ciclos atinge o valor 5, uma memória auxiliar M2 é ativada, resetando a memória M1, ao mesmo tempo que zera o contador C1. A partir desse momento, o sistema está pronto para ser reiniciado.

## 9.5 Circuito com dois atuadores em uma linha de produção

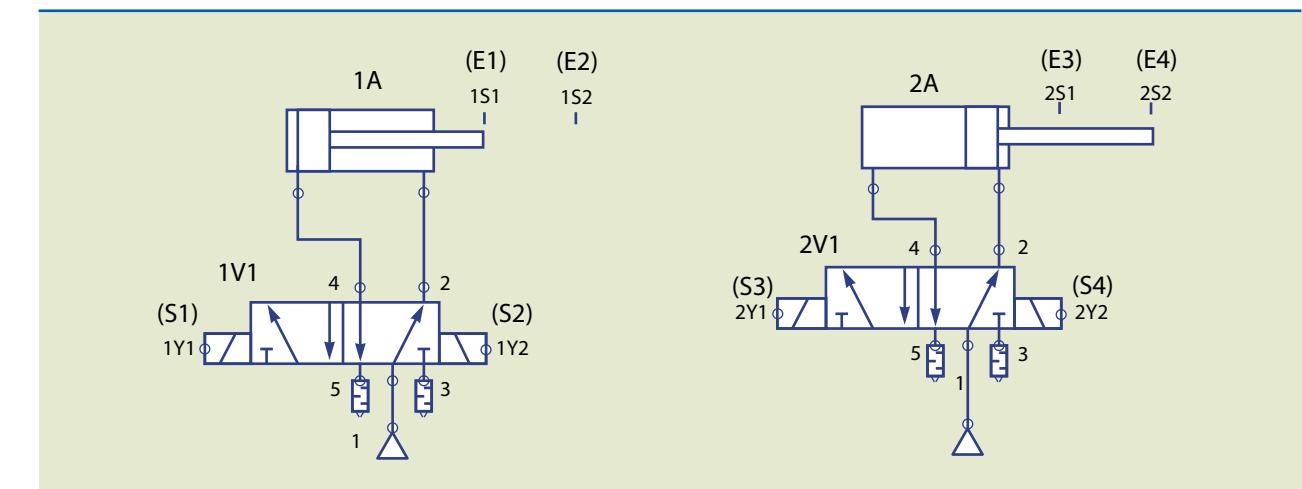
Exemplo 5: indicar qual deve ser a programação em Ladder do circuito eletropneumático mostrado na figura 9.10 e que cumpra o diagrama trajeto-passo representado na mesma figura.

## Figura 9.10



## **Figura 9.11**

### Círculo pneumático para o exemplo 5.

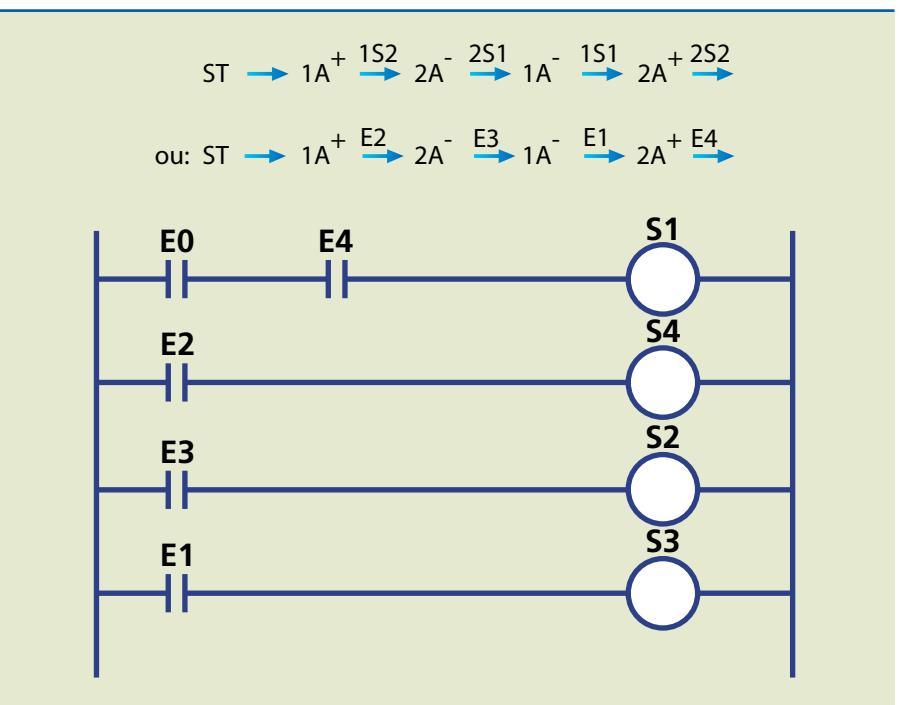


*Solução:*

O diagrama algébrico será:

**Figura 9.12**

Diagrama Ladder para o exemplo 5.



Esse circuito aborda uma linha de produção em que as peças são tombadas a 90° a partir do momento em que deixam o magazine. Uma característica marcante desse processo é o fato de que, para realizar essa tarefa, o atuador 2A inicia avançado, como mostrado no diagrama trajeto-passo e no circuito pneumático (respectivamente indicados nas figuras 9.10 e 9.11).

A lógica de comando é mostrada no diagrama algébrico indicando a sequência utilizada para o circuito eletropneumático e também para o diagrama Ladder.

No diagrama Ladder (figura 9.12), o contato do botão pulsador E0 trabalha em série com a entrada E4, que corresponde ao elemento fim de curso 2S2, garantindo a obrigatoriedade do atuador 2A completar o percurso antes que nova peça seja inserida na linha de produção.

Quando o botão pulsador E0 é acionado, e o atuador 2A concluiu seu percurso, a saída S1 (1Y1) é energizada e o atuador 1A avança, empurrando a peça para fora do magazine. Esse avanço aciona o elemento de fim de curso 1S2 (E2), que ativa a saída S4 (2Y2); o êmbolo do atuador 2A é recolhido e gira a peça a 90°.

A seguir, a entrada E3 (2S1) aciona a saída S2 (1Y2) e o atuador 1A retorna à sua posição inicial. Ao fazer isso, é ativada a entrada E1 (1S1), que aciona a saída S3 (2Y1), e então o atuador 2A avança para o final do curso, preparando-se para receber uma nova peça.

# Capítulo 10

## Comandos elétricos com CLP

Após a energização da bobina, os NA se fecham e os NF se abrem enquanto a bobina permanecer alimentada pela corrente elétrica. Pelo fato de os contatos móveis estarem acoplados mecanicamente ao núcleo móvel, o deslocamento do núcleo móvel no sentido do núcleo fixo movimenta também os contatos móveis. No fim do curso do núcleo móvel, as peças fixas rígidas do sistema de comando elétrico estarão em contato e sob pressão suficiente com as peças do núcleo móvel. Cada conjunto de contatos fixos ou móveis pode ser do tipo normalmente aberto (NA), ou normalmente fechado (NF). O comando da bobina é efetuado por meio de uma botoeira ou chave-boia com duas posições, cujos elementos de comando estão ligados em série com a bobina. Veja na figura 10.1a o esquema de um contator e, na figura 10.1b, uma fotografia indicando a montagem de um contator.

## 10.1 Comandos elétricos

Comandos elétricos são circuitos com componentes cuja função é comandar e controlar o funcionamento de sistemas elétricos. Os comandos elétricos iniciaram seu desenvolvimento com a utilização de relés e, a partir daí, evoluíram vigorosamente, utilizando nos dias de hoje os controladores e chaves de controle eletrônico.

Um exemplo de comando elétrico automático é uma lâmpada de iluminação pública que acende de noite e apaga de dia, independentemente da ação do homem. Uma das funções dos comandos elétricos é principalmente automatizar os processos de produção.

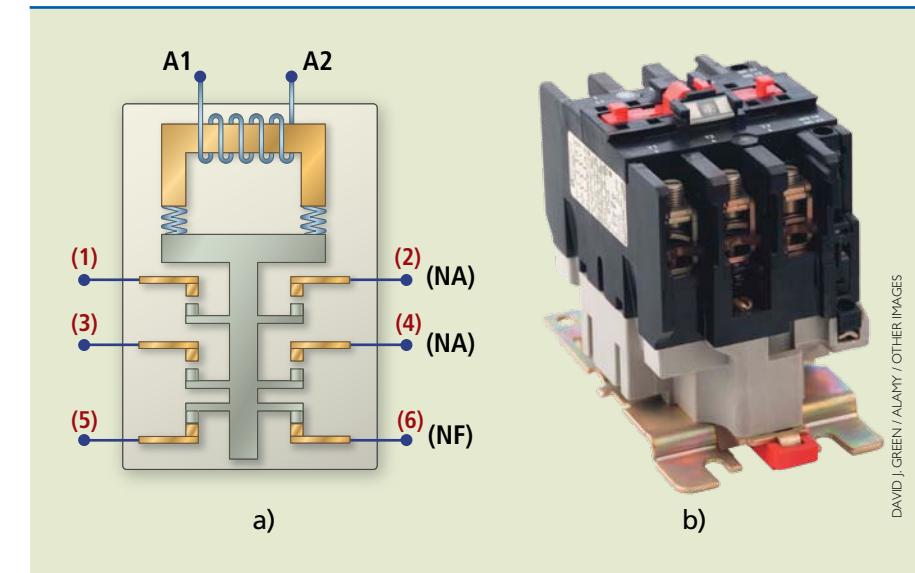
As chaves, dispositivos de comando empregados em circuitos elétricos de baixa tensão, são dos tipos mais variados e com características de funcionamento também bastante distintas, em consequência das funções específicas que cada dispositivo deve efetuar, dependendo de sua posição no circuito.

## 10.2 Contatores

Entre os componentes usados nos comandos elétricos, os mais importantes são os contatores. Eles se igualam funcionalmente aos interruptores, portanto são dispositivos de manobra mecânica que utilizam força eletromagnética gerada pela passagem de uma corrente elétrica através da bobina, fazendo com que o corpo móvel se desloque provocando a mudança de estado em seus contatos NA (normalmente aberto) e NF (normalmente fechado).

Os contatores são utilizados como dispositivos de comando de motores e grandes cargas, ou como dispositivos de proteção contra sobrecarga, se acoplados aos relés.

As principais características dos contatores são a capacidade do comando à distância, a grande vida útil mecânica, o elevado número de manobras que podem ser realizadas, a garantia de contato muito rápido e o pequeno espaço para montagem.



**Figura 10.1**  
a) Esquema de um contator;  
b) montagem de um contator.

A velocidade de operação dos contatores é resultado da ação da força da bobina e da força mecânica oposta oferecida pelo sistema de molas de separação que atuam em sentido contrário. As molas são responsáveis pela velocidade de abertura do contator, pois nessa operação a bobina magnética é desligada, e somente as forças das molas operam fazendo com que o corpo móvel retorne a sua posição de repouso.

Os contatores podem ser classificados como de potência ou auxiliares. Simplificadamente, os contatores auxiliares têm corrente máxima de 10 A, possuem de 4 a 8 contatos, chegando a 12, enquanto os contatores de potência têm corrente máxima de até 600 A. Geralmente possuem 3 contatos principais do tipo NA, para manobra de cargas trifásicas a 3 fios.

## 10.3 Símbolos gráficos

Para se compreender o gráfico de um circuito elétrico, é importante conhecer a simbologia utilizada. Para definir melhor os circuitos, é também necessário conhecer os símbolos que vamos utilizar.

Símbolos para os comandos elétricos, conforme NBR 12523, estão indicados na figura 10.2.

**Figura 10.2**

Símbolos para os comandos elétricos, conforme NBR 12523.

Símbolo	Descrição	Símbolo	Descrição
E---	Batoeira NA	E-----	Batoeira NF
E-←\	Boeira NA com retorno por mola	E-←---\	Batoeira NF com retorno por molas
\ /\ /\	Contatos tripolares NA, ex.: contator de potência		Fusível
—	Acionamento eletromagnético, ex.: bobina do contator	\	Contato normalmente aberto (NA)
[ ]	Relé térmico	\	Contato normalmente fechado (NF)
H---□---Q1	Disjuntor com elementos térmicos e magnéticos, proteção contra correntes de curto e sobrecarga	X —	Acionamento temporizado na ligação
H---□---	Disjuntor com elemento magnético, proteção contra corrente de curto-circuito	○X	Lâmpada/Sinalização
\ /\ /\	Transformador trifásico	M 3~	Motor trifásico

## 10.4 Símbolos literais

Os símbolos literais são caracteres que representam os símbolos gráficos e permitem que se dê a eles uma sequência numérica dentro de um diagrama (ver a figura 10.3).

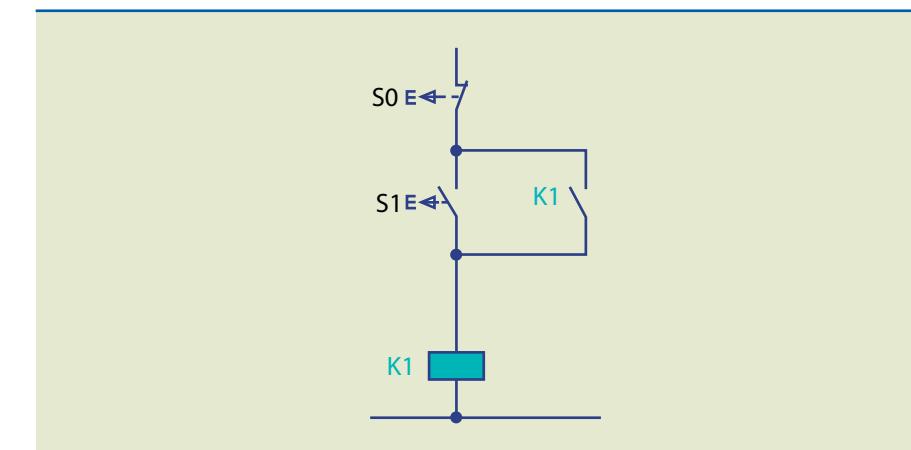
Símbolo	Componente	Exemplos
F	Dispositivo de proteção	Fusíveis, para-raios, disparadores, relés
H	Dispositivos de sinalização	Indicadores acústicos e ópticos
K	Contatores	Contatores de potência e auxiliares
M	Motores	
Q	Dispositivos de manobra para circuitos de potência	Disjuntores, seccionadores, interruptores
S	Dispositivos de manobra, seletores auxiliares	Dispositivos e botões de comando e de posição (fim-de-curso) e seletores
T	Transformadores	Transformadores de distribuição, de potência, de potencial, de corrente, autotransformadores

**Figura 10.3**  
Símbolos literais, conforme NBR 5280.

## 10.5 Sistemas de acionamento, segurança e proteção

### 10.5.1 Selo

O selo sempre liga um contato auxiliar do próprio contator em paralelo com o contato de fechamento da batoeira. Ele serve para manter a corrente circulando pelo contator, após o operador ter soltado a batoeira (ver exemplo na figura 10.4).



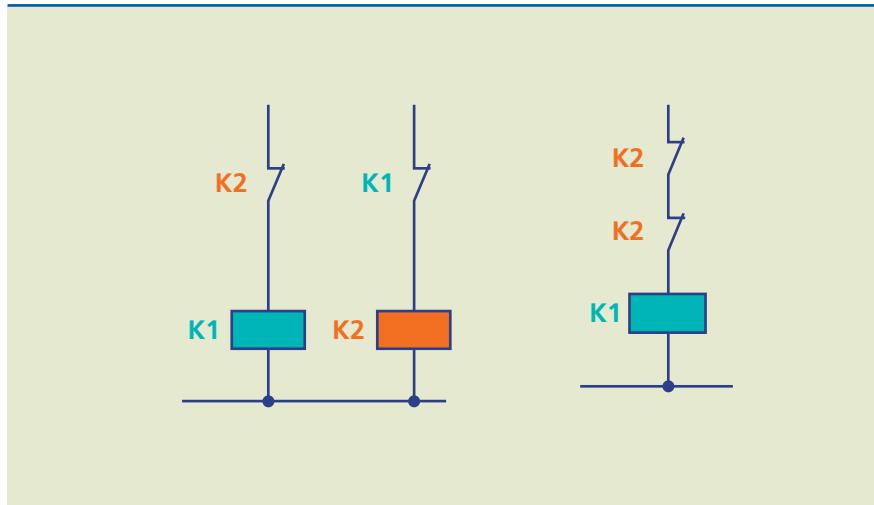
**Figura 10.4**  
Selo.

## 10.5.2 Intertravamento

Em algumas manobras, em que existem dois ou mais contatores, para evitar curtos-circuitos, impede-se o funcionamento simultâneo de dois contatores. Utiliza-se, assim, o intertravamento e, nesse caso, os contatos devem ficar antes da alimentação da bobina dos contatores. Na realização de manobras com acionamento de altas cargas, podemos usar dois contatos de intertravamento, ligados em série, elevando a segurança do sistema. A figura 10.5 exemplifica um intertravamento simples e um intertravamento de dois contatos.

**Figura 10.5**

À esquerda, temos um intertravamento simples, e à direita, um intertravamento com dois contatos.

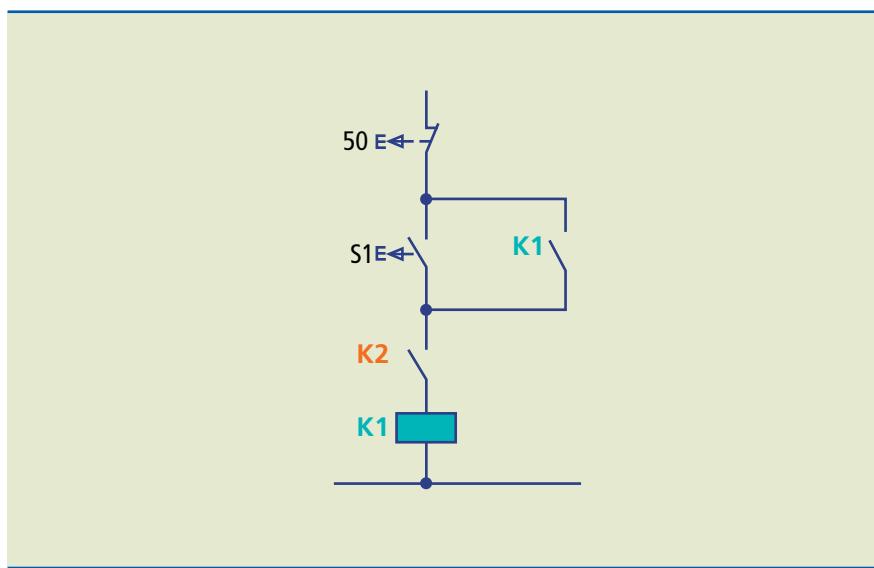


## 10.5.3 Ligação condicionada

A instalação de um contato NA do contator K2, antes do contator K1, implica que K1 só pode ser operado quando K2 estiver acionado. Assim, condiciona-se o funcionamento do contator K1 ao acionamento do contator K2 (ver figura 10.6).

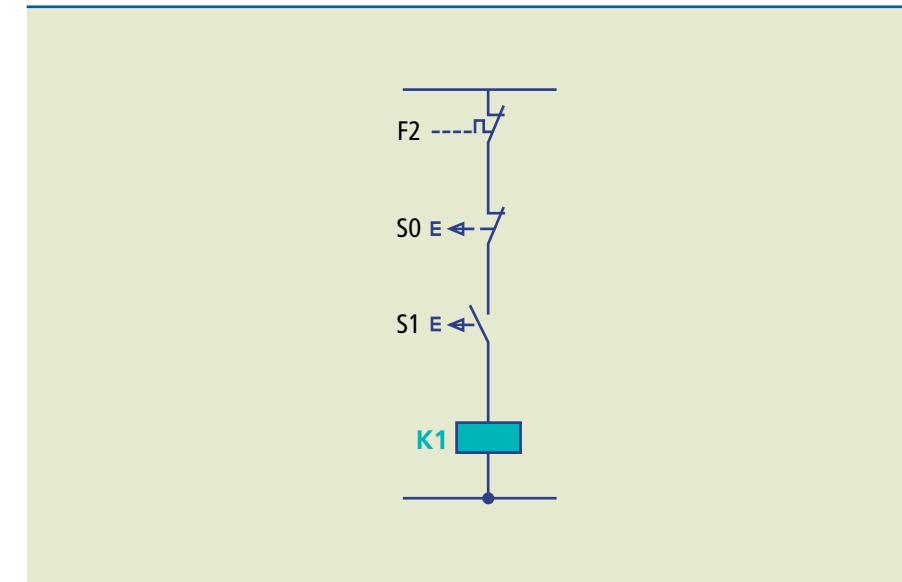
**Figura 10.6**

Ligação condicionada.



## 10.5.4 Proteção do circuito

Os relés de proteção contra sobrecarga e as botoeiras de desligamento devem estar sempre em série, pois a operação de abertura do relé provocará o desligamento do contator (ver exemplo na figura 10.7).



**Figura 10.7**

Ligaçāo em série de relés de proteção e botoeira de desligamento.

## 10.6 Diagrama elétrico

O diagrama elétrico é um desenho que mostra como as várias partes de um dispositivo, rede, instalação, grupo de aparelhos ou itens de um aparelho elétrico são inter-relacionados e/ou interconectados. É a representação de uma instalação elétrica ou de uma parte dela por meio de símbolos gráficos, definidos nas normas NBR 5259, NBR 5280, NBR 5444, NBR 12519, NBR 12520 e NBR 12523.

O diagrama de comando faz a representação esquemática dos circuitos elétricos permitindo a leitura do funcionamento do circuito. Ele mostra os seguintes aspectos: o funcionamento sequencial dos circuitos, a representação dos elementos, suas funções e as interligações, conforme as normas estabelecidas, a visão analítica das partes ou do conjunto e a possibilidade de rápida localização física dos componentes e falhas do circuito.

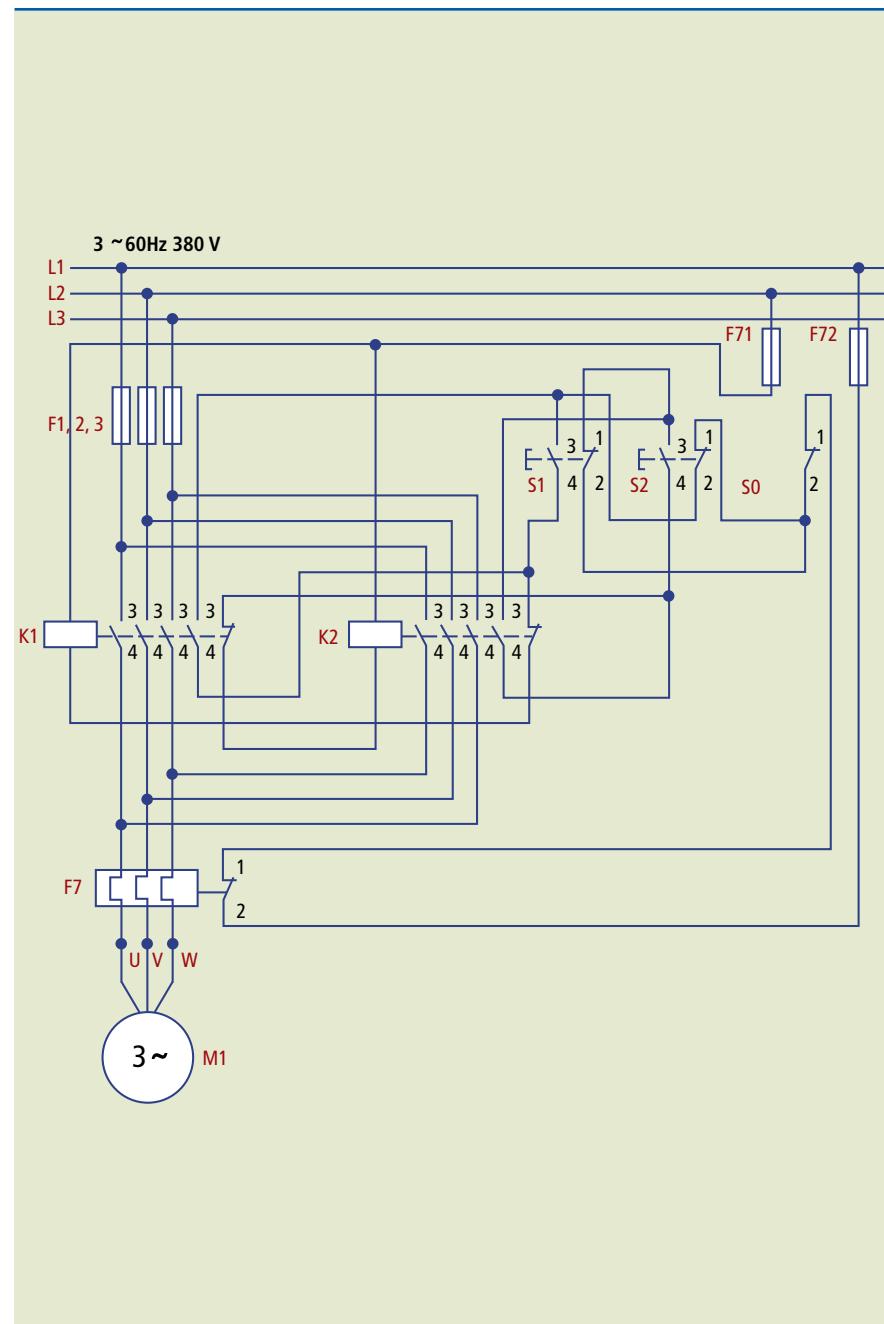
Os diagramas podem ser: multifilar completo (ou tradicional), funcional e de execução.

O diagrama multifilar completo (ou tradicional) é o retrato do circuito elétrico, mostra a forma como ele é montado, quais são seus elementos componentes e todas as ligações dos circuitos. Esse tipo de diagrama é difícil de ser interpretado e elaborado, principalmente quando os circuitos a serem representados são complexos.

Ver o exemplo de um diagrama elétrico do tipo multifilar na figura 10.8.

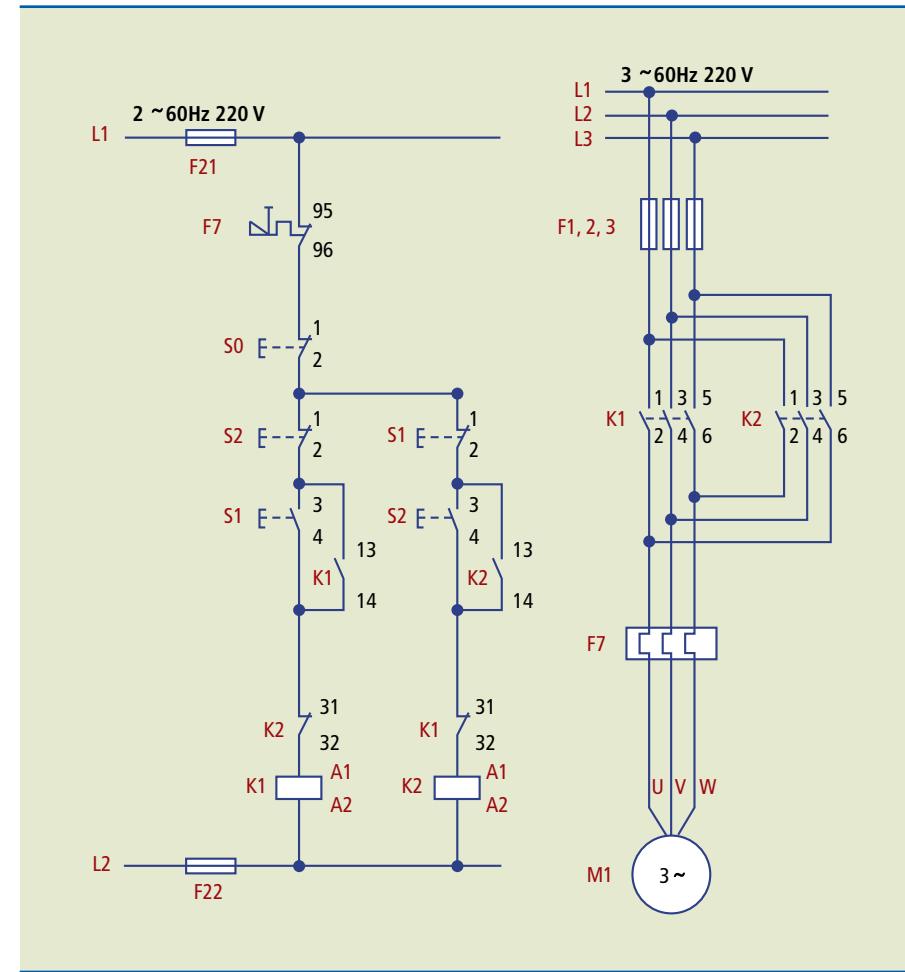
**Figura 10.8**

Exemplo de um diagrama multifilar elétrico.



Em razão das dificuldades de interpretação desse tipo de diagrama, os caminhos de circulação da corrente, os elementos e suas funções e a sequência funcional são separados e representados por diagramas diferentes.

O diagrama simplificado, no qual os aspectos básicos são representados de forma prática e de fácil compreensão, é chamado diagrama funcional. Ver exemplo de um diagrama funcional na figura 10.9, na qual temos, à esquerda, o circuito de comando e, à direita, o circuito de potência.



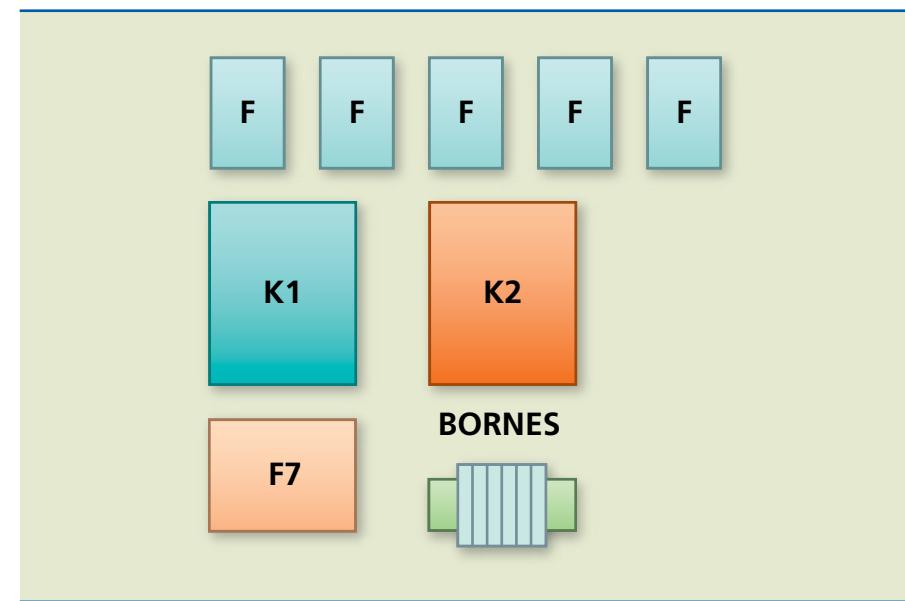
A representação, identificação e a localização física dos elementos se tornam mais compreensíveis com o diagrama de execução mostrado na figura 10.10.

**Figura 10.9**

Exemplo de diagrama funcional. À esquerda, o circuito de comando e, à direita, o circuito de potência.

**Figura 10.10**

Diagrama de execução na placa.



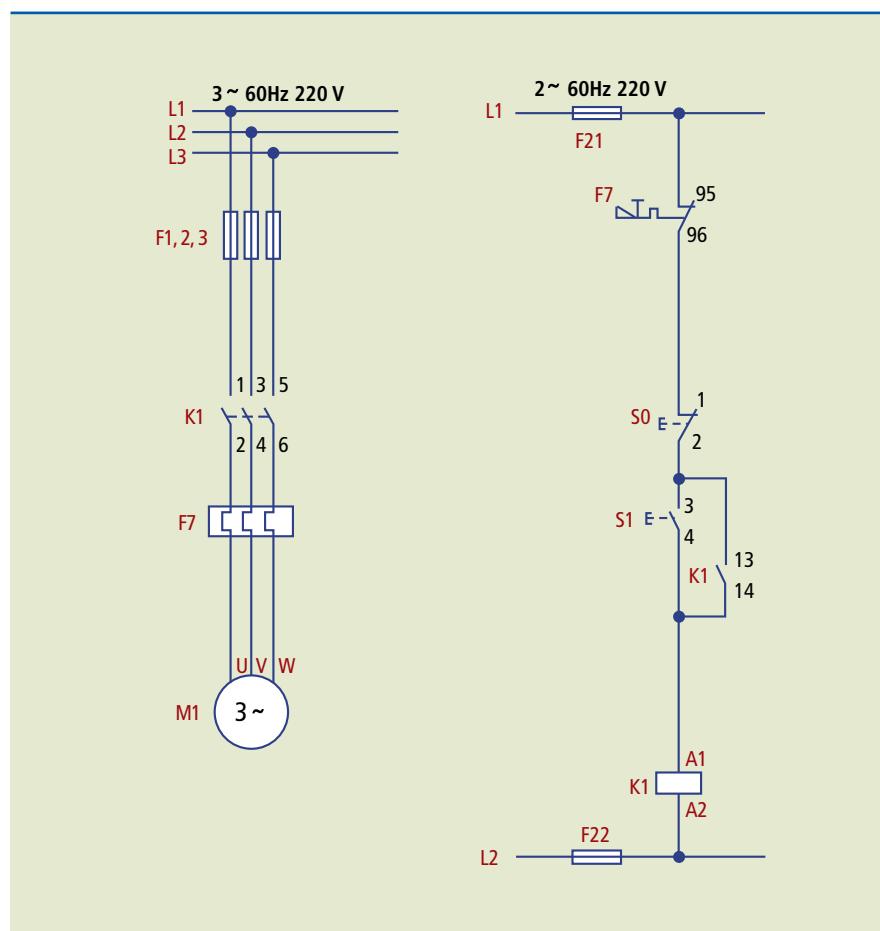
## 10.7 Aplicações dos comandos na partida de um motor

Em uma combinação entre os elementos de comando estudados e as lógicas apresentadas, temos na figura 10.11 um diagrama funcional para a execução da partida direta de um motor elétrico. O objetivo é conhecer a sequência utilizada, observando as dificuldades e a lógica de funcionamento, bem como entender a aplicação prática do conceito de selo.

### 10.7.1 Diagrama elétrico para a partida de um motor

**Figura 10.11**

Diagrama funcional para a execução da partida direta de um motor elétrico.

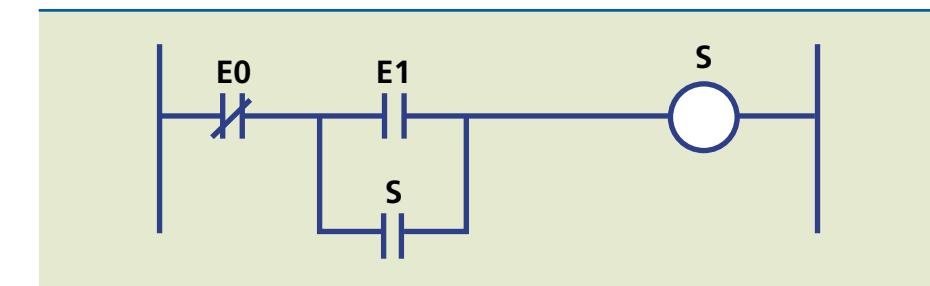


A análise do diagrama mostrado na figura 10.11 indica que os condutores L1, L2 e L3 estão energizados; quando o botão pulsador S1 é acionado, a bobina do contator K1 é energizada. Essa ação faz fechar o contato de selo K1 que manterá a bobina energizada, enquanto os contatos principais se fecharão e o motor funcionará.

Para interromper o funcionamento do contator e, logo, do motor, aciona-se o botão S0. Isso interrompe a alimentação da bobina, provoca a abertura do contato de selo K1 e dos contatos principais, fazendo o motor parar.

## 10.7.2 Aplicação do CLP para a partida de um motor

O circuito para a partida de um motor elétrico pode ser comandado por um controlador lógico programável utilizando um programa em Ladder, com entradas e saídas que podem ser representadas facilmente, como vemos na figura 10.12.



**Figura 10.12**  
Diagrama Ladder para um circuito com o objetivo de obtenção da partida de um motor elétrico.

No diagrama da figura 10.12, a indicação E1 corresponde a um botão pulsador NA de partida do motor, E0 é um botão NF correspondente ao desligamento do motor, e S corresponde à bobina do contator responsável pela energização do motor. O contato S normalmente aberto é responsável pela retenção, ou seja, manterá a bobina energizada mesmo após o operador parar de pressionar o botão E1.

## 10.8 Aplicações dos comandos na reversão de um motor

Em alguns circuitos, muitas vezes utilizamos a reversão de rotação de um motor. Para tanto, fazemos uso do conceito de intertravamento, como mostra a figura 10.13.

### 10.8.1 Diagrama elétrico para a reversão de um motor

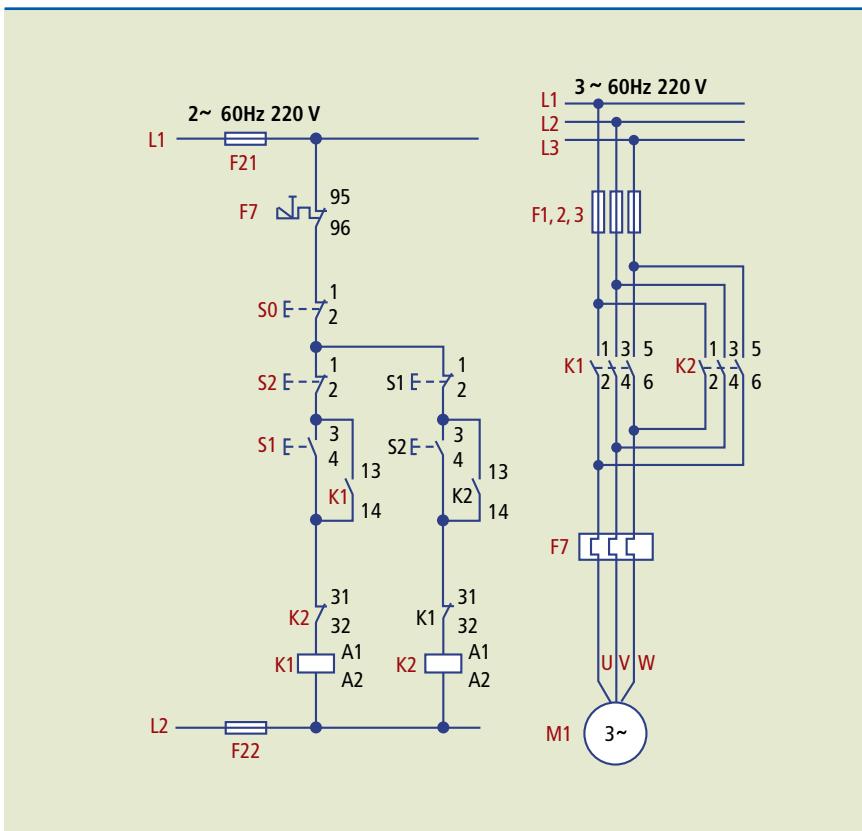
A reversão é feita pela inversão das fases de alimentação. Esse trabalho é realizado por dois contatores comandados por dois botões cujo acionamento fornece rotações nos sentidos horário (S1) e anti-horário (S2). Ver a figura 10.13.

Os condutores L1, L2 e L3 estão energizados, enquanto S1 e S2 estão desligados. Ao pulsar o botão S1, a bobina do contator K1 é energizada e acontece o fechamento do contato de selo (que mantém a bobina energizada) e dos contatos principais; com isso, o motor é acionado e gira no sentido horário.

Quando a bobina é desenergizada por meio de S0, os contatos principais se abrem, cortando a alimentação do motor. Para reverter o sentido do movimento do motor, temos de acionar o botão S2; acontece então a energização de K2 e seu contato fechado se abre, impedindo a alimentação de K1. O contato de selo K2 também fecha, mantendo a bobina energizada mesmo após o operador parar de pressionar o botão S2. Com a bobina energizada, ocorre o fechamento dos contatos principais. Como consequência, o motor é acionado, girando no sentido inverso até que seja novamente acionado o botão S0, que faz abrir os contatos principais e corta a alimentação do motor.

**Figura 10.13**

Diagrama funcional para a execução da reversão de um motor elétrico.

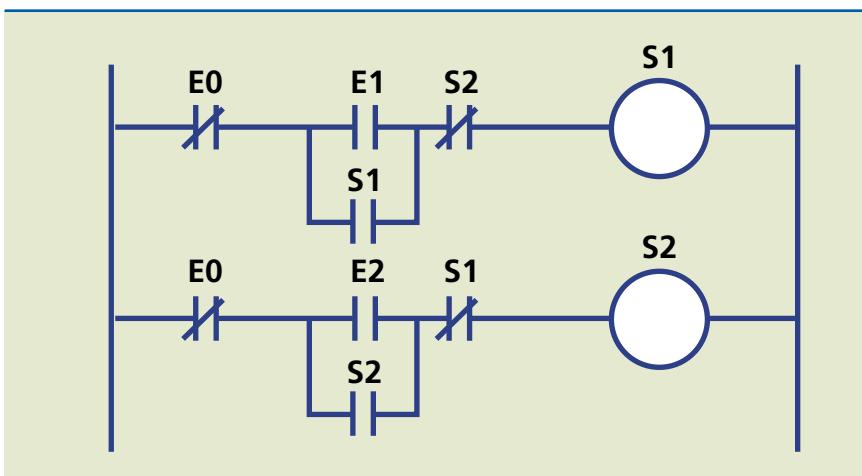


### 10.8.2 Aplicação do CLP para a reversão de um motor

Em um diagrama Ladder, podemos ter a disposição para o circuito de reversão no sentido de rotação de um motor elétrico no diagrama da figura 10.14.

**Figura 10.14**

Diagrama Ladder para a obtenção de reversão no sentido de rotação de um motor elétrico.



De acordo com a figura 10.14, a saída S1 do controlador acionará K1, enquanto a saída S2 acionará K2. Nesse caso, K1 e K2 jamais poderão ser acionados simultaneamente, o que provocaria um curto-círcuito. Portanto, é necessário o intertravamento realizado pelo contato NF de S2 em série com a bobina S1 e o

contato NF de S1 em série com a bobina S2. Tanto o intertravamento quanto a retenção são realizados utilizando comandos Ladder sem a necessidade dos contatos auxiliares dos contatores K1 e K2.

## 10.9 Ligação estrela-triângulo

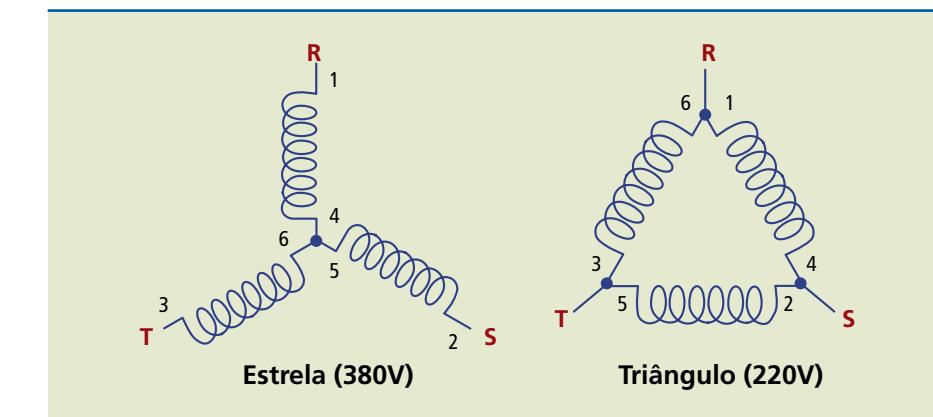
As altas correntes necessárias para a partida de motores de altas potências exigem um dimensionamento de cabos com diâmetros bem maiores do que o necessário para operação em regime, o que provoca um aumento no custo de instalação. Além disso, podem haver quedas momentâneas do fator de potência, que é monitorado pela concessionária de energia elétrica, causando multas à indústria usuária.

Para evitar essas altas correntes na partida, existem algumas estratégias empregadas nos comandos. Uma delas é alimentar o motor com 50% ou 65% da tensão nominal, que é o caso da partida estrela-triângulo.

A partida do motor dá-se na configuração estrela, desta forma a corrente de partida é minimizada, e após algum tempo, comuta-se para a configuração triângulo, ou seja, regime normal de trabalho do motor (ver como são as configurações estrela e triângulo na figura 10.15)

**Figura 10.15**

Esquema de ligação estrela-triângulo.



Dessa forma, o motor parte em dois pequenos picos de corrente, em vez de um pico de grande intensidade, como na partida direta.

São utilizados três contatores K1, K2 e K3:

K1 alimenta as pontas 1, 2 e 3 do motor com as três fases respectivamente, L1, L2 e L3;

K2 alimenta com a mesma sequência as pontas 6, 4 e 5.

K3 interliga as pontas 4, 5 e 6.

A ligação simultânea de K1 e K3 corresponde à estrela e a de K1 e K2 corresponde à ligação triângulo. Ver o diagrama elétrico para a partida estrela-triângulo na figura 10.16.

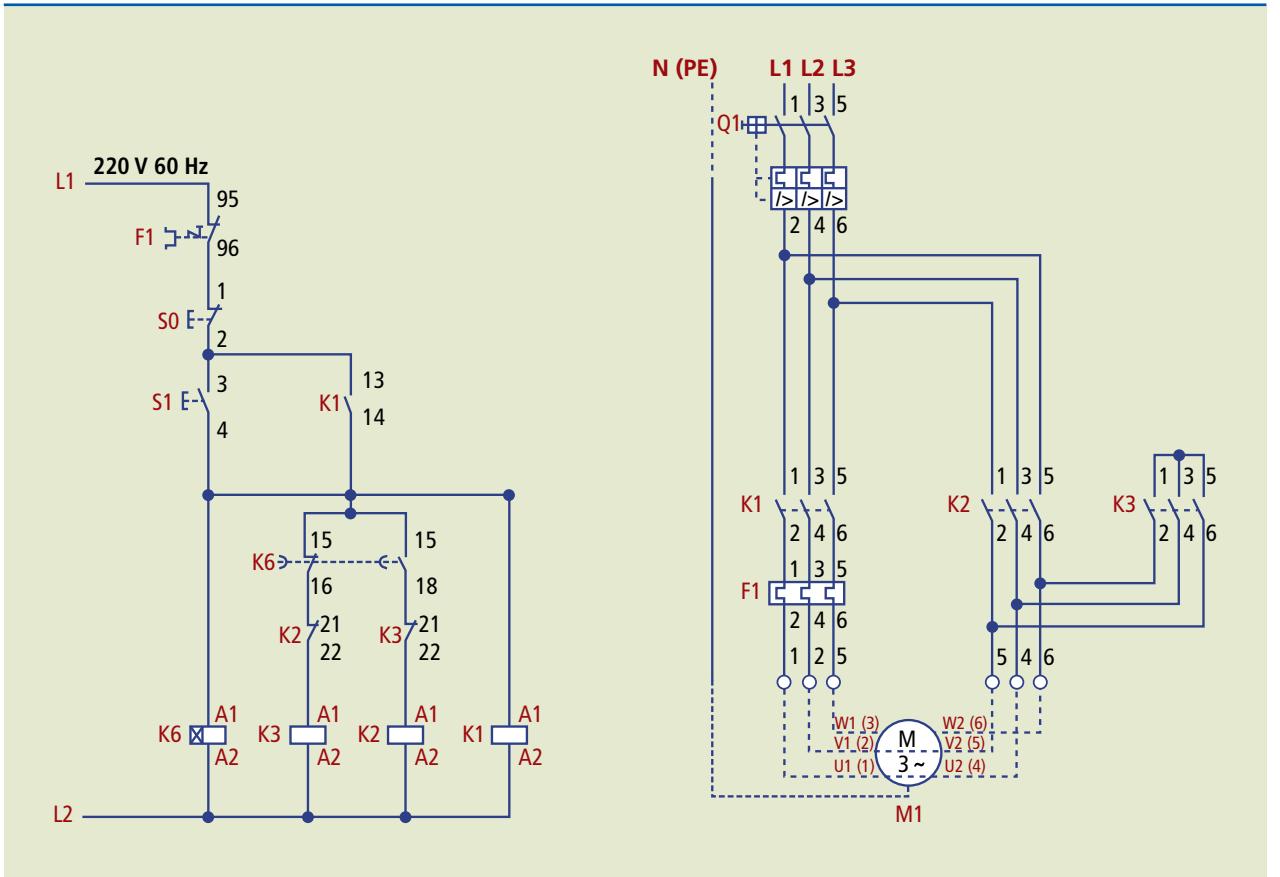
**Figura 10.16**

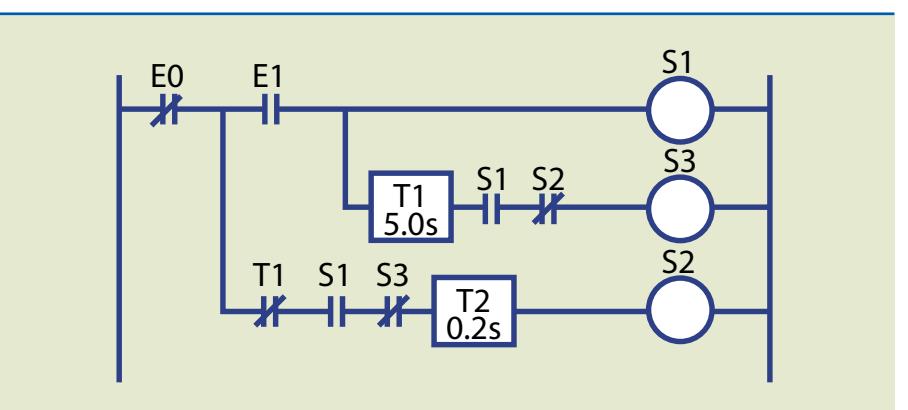
Diagrama elétrico para a partida estrela-triângulo de um motor elétrico.

### 10.9.1 Aplicação do CLP para a partida estrela-triângulo

O diagrama Ladder mostrado na figura 10.17 representa a partida estrela-triângulo de um motor, no qual o tempo é ajustado para 5 segundos.

**Figura 10.17**

Diagrama Ladder para partida estrela-triângulo.



Observamos no diagrama da figura 10.17 as ações de temporização (T1 e T2), retenção (S1) e intertravamento, evitando que as saídas S2 e S3 sejam acionadas simultaneamente. S1, S2 e S3 correspondem aos contadores K1, K2 e K3, enquanto E0 e E1 correspondem aos botões de partida S0 e S1 mostrados no circuito de comando.

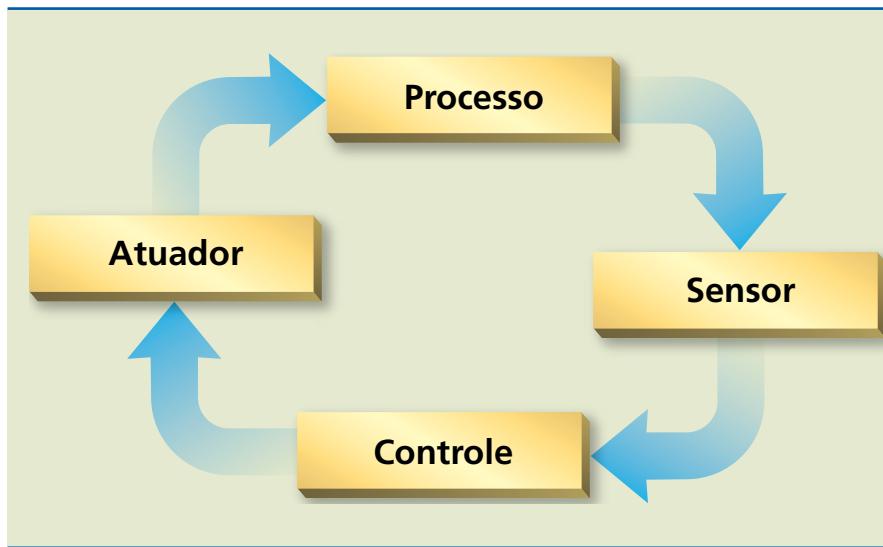
# Capítulo III

## Sensores

**A**utomação está diretamente ligada ao controle automático, ou seja, à execução de ações que não dependem da intervenção humana. Um dos objetivos principais da automação é obter a melhora da produtividade e da qualidade dos processos considerados repetitivos.

Os sistemas automatizados podem ser aplicados em um simples equipamento ou em toda uma indústria, como, por exemplo, um processo de manufatura ou um processo petroquímico. Simplificadamente, um processo sob controle possui um diagrama bem parecido com o que vemos na figura 11.1, em que temos, em lados opostos, os sensores e os atuadores.

**Figura 11.1**  
Fluxograma simplificado de um sistema de controle.



Os sensores são os elementos que fornecem informações sobre o processo, correspondendo às entradas do sistema de controle. Eles podem indicar variáveis físicas, como pressão e temperatura, ou simples estados, como uma chave de fim de curso posicionada em um cilindro pneumático.

No processo, definimos como atuadores os dispositivos responsáveis pela realização de trabalho.

Há vários tipos de atuadores. Entre eles, podemos citar os magnéticos, os hidráulicos, os pneumáticos, os elétricos, ou aqueles com acionamento misto.

O sistema de controle é responsável pela comparação do valor da variável controlada e o valor desejado. O resultado dessa comparação é usado para calcular a ação corretiva necessária e emitir o sinal de correção para o atuador.

O sistema de controle tem uma tarefa especial, que é a medição das variáveis envolvidas no processo, etapa fundamental para o bom desempenho desse sistema. Medir uma variável equivale a adquirir dados e comparar as quantidades envolvidas na grandeza associada a essa variável com a quantidade padrão, estabelecida previamente.

Dá-se o nome de instrumentação às técnicas e dispositivos empregados na medição, tratamento e transmissão das variáveis do processo na área industrial.

Os instrumentos utilizados para realizar essas medições, denominados sensores, são classificados de acordo com a grandeza física que medem. A resposta de saída dos sensores pode ser da mesma espécie ou de outra diferente, reproduzindo certas características do sinal de entrada, com base em uma relação definida. A classificação dos sensores usados na maioria dos processos industriais divide-se em medidores de temperatura, de nível, de pressão e de vazão.

## II.1 Medição de temperatura

O conceito de temperatura nos diz que ela indica indiretamente o grau de agitação molecular de um corpo, enquanto a energia térmica é o somatório de energia cinética das moléculas do corpo. O calor é definido como energia térmica em trânsito, que se transmite normalmente do corpo com maior energia (maior temperatura) para o corpo com menor energia (menor temperatura). Em linguagem menos precisa, como dito popularmente, do corpo mais “quente” para o corpo mais “frio”. Incitamos o leitor a utilizar a linguagem tecnicamente mais precisa.

Vamos conhecer os elementos de sensoreamento de temperatura mais importantes nos processos industriais.

### II.1.1 Elemento bimetálico

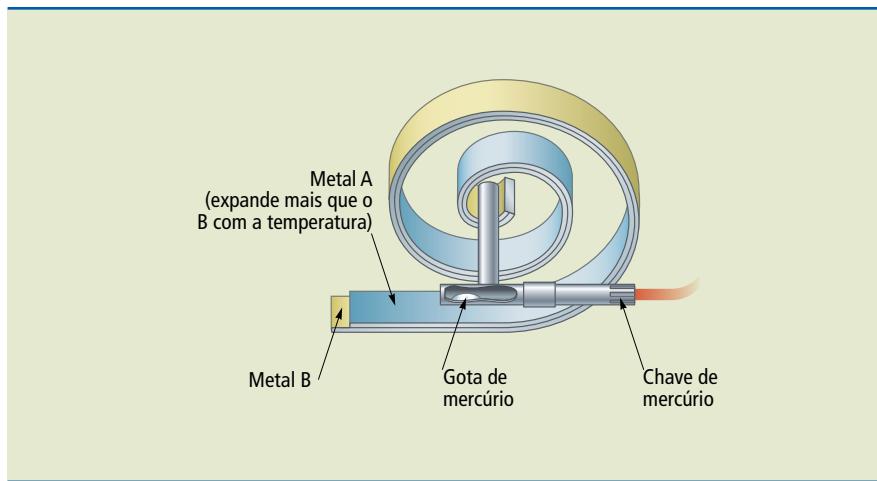
O termômetro bimetálico é um equipamento composto por duas lâminas sobrepostas e rigidamente solidárias (ligadas/soldadas). Os metais que compõem a lâmina possuem coeficientes de dilatação diferentes; com a mudança de temperatura do conjunto, observa-se um encurvamento, devido à dilatação diferente dos metais, proporcional à temperatura. Em um formato especial e sempre muito utilizado, a lâmina bimetálica é enrolada em forma de espiral ou hélice. Esses formatos possibilitam o aumento da sensibilidade.

Normalmente, utilizamos em uma parte uma liga ferro-níquel com baixo coeficiente de dilatação e, em outra o latão, como metal de alto coeficiente de dilatação. O par metálico tem grande eficiência na medição de temperatura. Em automação industrial, elementos bimétálicos são muito usados, e também são empregados na construção de termostatos e dispositivos de proteção. A figura 11.2

mostra o princípio de funcionamento de uma chave elétrica tipo ON-OFF (liga-desliga) com fechamento do contato com mercúrio.

**Figura 11.2**

Princípio de funcionamento.



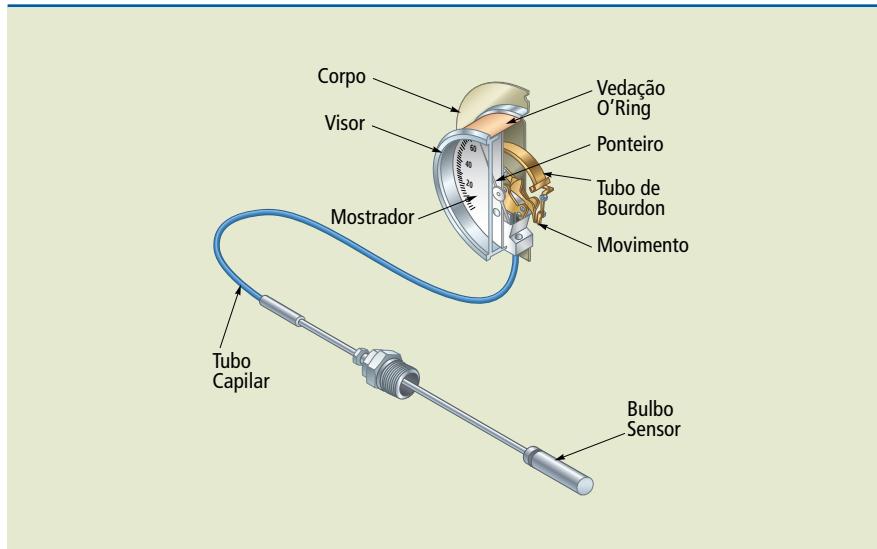
Esse tipo de sensor tem como características principais o baixo custo, a construção robusta, tempo de resposta elevado (o tempo de resposta é o tempo necessário para que o medidor faça a leitura correta após o início da medição) e aplicação nas faixas de temperatura entre  $-50^{\circ}\text{C}$  e  $500^{\circ}\text{C}$ .

### 11.1.2 Elemento bulbo-capilar

Nesse elemento de medição, um fluido preenche todo o recipiente do bulbo sensor e se dilata devido ao efeito de aumento de temperatura, deformando um tubo de Bourdon (sensor volumétrico).

**Figura 11.3**

Exemplo de um termômetro bulbo-capilar.



Nesse tipo de sensor, o fluido pode ser um líquido volátil e o dispositivo poderá medir temperaturas entre  $-100^{\circ}\text{C}$  a  $+300^{\circ}\text{C}$ . Caso o fluido cuja temperatura se deseja medir esteja no estado de vapor, a faixa de temperatura poderá situar-se

entre  $-200^{\circ}\text{C}$  e  $+300^{\circ}\text{C}$ . Se o fluido for um gás, a temperatura a ser medida deverá estar na faixa entre  $-260^{\circ}\text{C}$  e  $+760^{\circ}\text{C}$  e, se for mercúrio, poderá estar entre  $-40^{\circ}\text{C}$  e  $600^{\circ}\text{C}$ .

Esse tipo de sensor tem como características principais o baixo custo, a robustez e a capacidade de ser acoplado a um transmissor ou a um termostato. A deflexão sofrida pelo tubo de Bourdon é proporcional à pressão, e a pressão é proporcional à temperatura, resultando em uma relação linear (na faixa de medições indicada pelo fabricante). As variações na temperatura ambiente podem afetar a leitura do instrumento e devem ser compensadas pelo uso de uma lâmina bimetálica.

### 11.1.3 Sensor por resistência elétrica

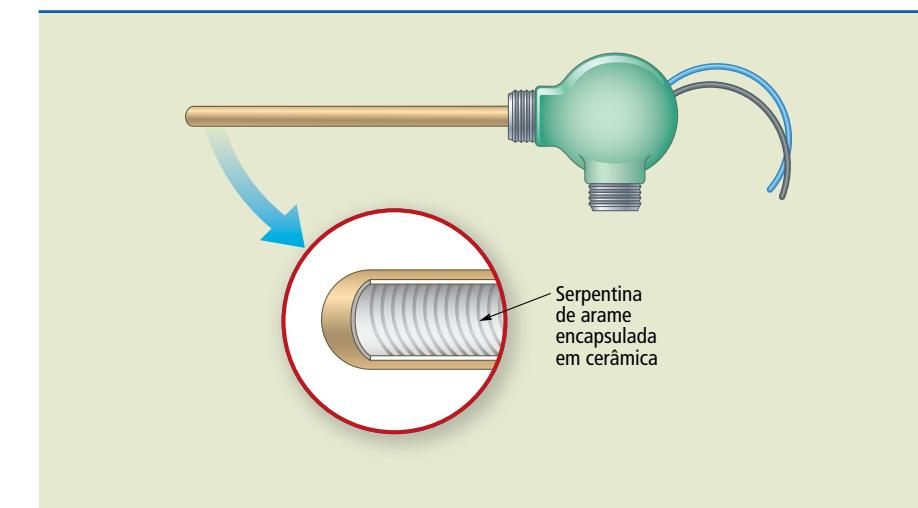
São sensores de temperatura que se baseiam no fato de que os metais aumentam sua resistência elétrica com o aumento de temperatura. Os exemplos mais comuns desses tipos de sensores são: o RTD, sensor por termorresistência ou Pt 100 e o termistor.

#### Sensor RTD

O nome RTD é a sigla, em inglês, de *resistance temperature detector*. Também conhecido como bulbo de resistência de fio metálico, pode ser constituído de platina, níquel, cobre ou liga de 70% Ni e 30% Fe. Ver figura 11.4.

**Figura 11.4**

Medidor de temperatura por resistência RTD.



A platina é o material mais utilizado para os RTDs, pois apresenta comportamento muito linear na resistência *versus* temperatura e tem uma escala de operação relativamente ampla. A platina é um elemento muito estável, o que assegura a estabilidade em longo prazo. Os sensores de platina têm sido fabricados com elementos de resistência muito finos, que usam pouca platina, o que faz RTDs de platina competirem em preço com outros metais (a platina é um material muito caro). O sensor RTD apresenta boa precisão, superando os termopares.

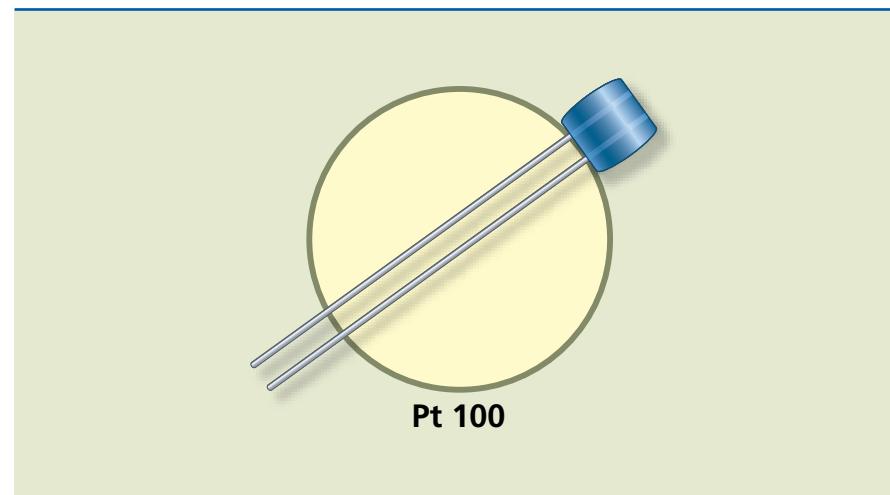
### Sensor por termorresistência – PT 100

É constituído de platina e possui uma resistência padronizada de 100 ohms à temperatura de 0 °C e 138,4 ohms a 100 °C. Apresenta na medição de temperatura boas características de estabilidade, repetibilidade e resolução, além de ampla faixa de medição (-250 °C a +850 °C). É um componente muito preciso e estável, porém possui baixa sensibilidade e resposta lenta a variações bruscas de temperatura, além de apresentar alto custo. Os PT 100 são da classe dos *platinum resistance thermometers*, ou PRTs.

Existem diversas formas de apresentação dos elementos PT 100, mas normalmente se encontra o dispositivo na forma de serpentina ou de um fino filme de platina encapsulados em um sistema de proteção, por serem extremamente frágeis. Ver o elemento PT 100 (sem encapsulamento) na figura 11.5.

**Figura 11.5**

Elemento Pt 100 fabricado com filme de platina.

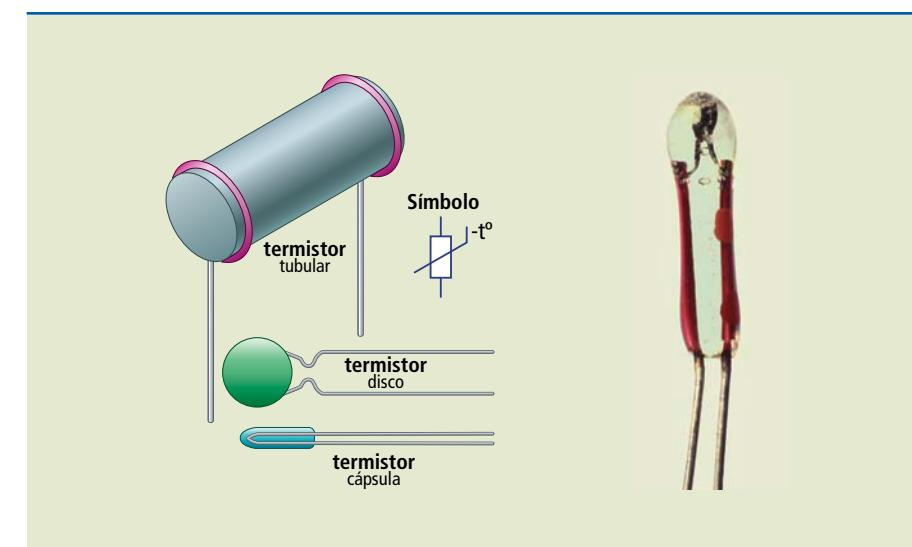


Os sensores Pt 100 fabricados na forma de filme fino de platina são manufaturados de forma similar àqueles fabricados como circuito integrado. Um filme fino de platina é depositado sobre um substrato cerâmico, que é então encapsulado, gerando um dispositivo pequeno, de resposta rápida e de sensoreamento muito bom.

### Termistores

Os termistores, também conhecidos como resistores termicamente sensíveis, são dispositivos fabricados de materiais semicondutores, tais como: óxido de manganês, cobalto, ferro, níquel e titânio e apresentam grandes variações da resistência com a variação da temperatura. Essa variação da resistência com a temperatura pode resultar em um coeficiente negativo da resistência: NTC (*negative thermal coefficient*), onde a resistência diminui com um aumento na temperatura. Nos casos em que a resistência aumenta com um aumento na temperatura PTC (*positive thermal coefficient*), o resultado é um coeficiente positivo da temperatura. Em ambos os casos tem-se aplicação para temperaturas entre -100° C e 300° C.

Podem ser encontrados modelos de termistores tanto de baixa precisão (5 a 10%) quanto de alta precisão ( $\pm 0,05^\circ \text{C}$ ), sendo os primeiros utilizados como proteção e os mais precisos para medição.



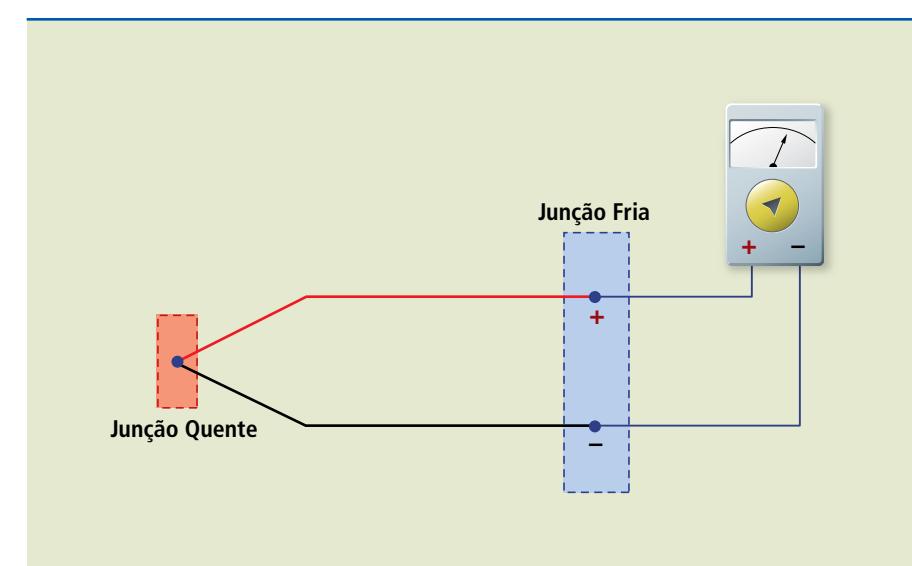
**Figura 11.6**

- a) Diferentes tipos de termistores;
- b) termistores de alta precisão encapsulados com resina epóxi.

A grande vantagem dos termistores em relação a outros sensores de temperatura reside em seu tamanho reduzido, facilitando o posicionamento na região em que se deseja efetuar a medida.

### II.1.4 Termopar

O termopar é um elemento constituído de um par de condutores metálicos diferentes, unidos em uma extremidade formando uma ligação denominada junção quente ou de detecção. A outra extremidade, a chamada junção fria ou ponto de referência, é conectada a um instrumento de medição elétrica, por exemplo, um milivoltímetro ou um circuito (ver montagem na figura 11.7).



**Figura 11.7**

Funcionamento de um termopar.

Esses elementos são muito utilizados na área industrial pela capacidade que possuem de medir uma grande faixa de temperatura, geralmente variando entre  $-200^{\circ}\text{C}$  e  $1\,800^{\circ}\text{C}$ , com respostas muito rápidas.

Ao subir a temperatura da junção quente do termopar, há uma diferença de temperatura entre as junções, o que provoca um fluxo de corrente no circuito, devido às duas forças eletromotrices geradas nas junções.

A diferença de potencial resultante é medida em um milivoltímetro, ou em um potenciômetro, e convertida em graus de temperatura.

Os termopares dividem-se em três categorias: padronizados de metal nobre (R, S, B); padronizados de metal base (K, J, N, E, T); e não definidos por letras. Na prática, a distinção entre “base” e “nobre” é o fato de que metais nobres contêm platina, e metais base contêm níquel.

**Termopar tipo T** (cobre/cobre-níquel,  $180^{\circ}\text{C}$  a  $370^{\circ}\text{C}$ ): sua principal característica é a excelente resistência à corrosão, sendo bastante utilizado em temperaturas negativas.

**Termopar tipo J** (ferro/constantan,  $0^{\circ}\text{C}$  a  $800^{\circ}\text{C}$ ): é indicado para aplicações no vácuo e em atmosferas oxidantes. É contraindicado para locais que contenham enxofre, por causa de interações químicas.

**Termopar tipo E** (níquel-cromo/cobre-níquel,  $200^{\circ}\text{C}$  a  $870^{\circ}\text{C}$ ): é indicado para as atmosferas oxidantes e inertes; em ambientes redutores ou no vácuo, as características de dilatação se alteram e, nesses casos, não é indicado.

**Termopar tipo K** (cromel/alumel,  $0^{\circ}\text{C}$  a  $1\,200^{\circ}\text{C}$ ): é o mais utilizado na indústria em geral, pois tem excelente resistência à oxidação em alta temperatura e à corrosão em baixas temperaturas.

**Termopar tipo N** (níquel-cromo-silício/níquel-silício,  $0^{\circ}\text{C}$  a  $1\,260^{\circ}\text{C}$ ): apresenta excelente resistência a oxidação até  $1\,200^{\circ}\text{C}$ , curva força eletromotriz *versus* temperatura, similar ao tipo K, maior estabilidade e menor histerese, porém menor potência termoelétrica.

**Termopar tipo S** (platina 90%-ródio/platina,  $0^{\circ}\text{C}$  a  $1\,500^{\circ}\text{C}$ ): é o mais utilizado entre os termopares nobres e tem como características a precisão altíssima, a ampla faixa de utilização, a alta repetibilidade de leitura e baixa potência termoelétrica; permite que o termopar seja usado em laboratórios de calibração como termopar padrão. Sua liga é de 90% platina e 10% ródio. Em locais oxidantes, em sua faixa de trabalho é recomendado para uso em montagem de tubos de proteção cerâmica.

**Termopar tipo R** (platina 13%-ródio/platina,  $0^{\circ}\text{C}$  a  $1\,500^{\circ}\text{C}$ ): possui os mesmos componentes do termopar S. As quantidades envolvidas na liga variam para 87% de platina e 13% de ródio. Esse termopar tem alta utilização e é também empregado em laboratórios como padrão.

**Termopar tipo B** (platina 30%-ródio/platina 6%-ródio,  $870^{\circ}\text{C}$  a  $1\,800^{\circ}\text{C}$ ): possui características de uso idênticas às do tipo S e R. Recomenda-se o tubo de proteção como os S e R em locais onde existam vapores de metais. Esse tipo de termopar possui uma resistência mecânica dos fios maior que os S e R e gera um sinal termoelétrico muito baixo. Sua utilização é recomendada para temperaturas altas, e a composição de sua liga é de 70% platina e 30% ródio.

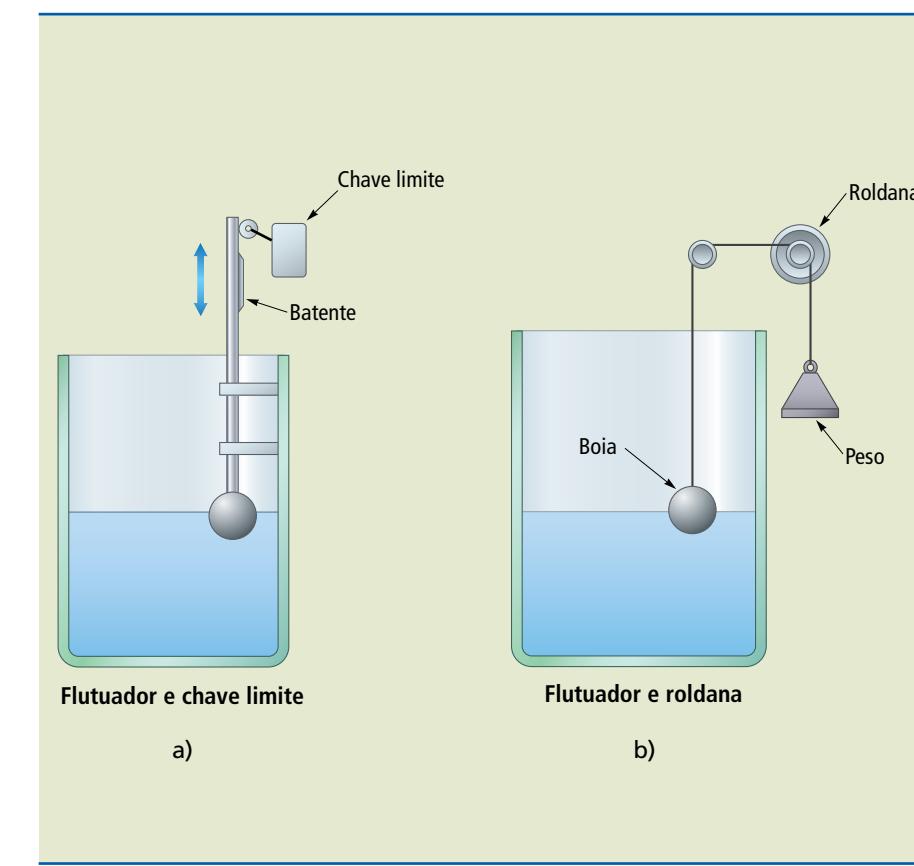
## II.2 Medição de nível

A medição de nível pode ser realizada em líquidos ou sólidos, de forma contínua ou de forma discreta, fornecendo valores para tratamento e adequação do sinal para o controle de um processo.

Existem diversos tipos de medidores para o controle de nível e eles utilizam os mais variados meios para realizar seu trabalho, destacando-se os medidores por flutuadores, os baseados na pressão, os baseados nas propriedades elétricas e alguns que utilizam outros tipos de propriedades.

### II.2.1 Medição por flutuadores

Baseia-se no princípio do empuxo e pode ser utilizado mesmo em locais onde ocorrem grandes variações de nível, sofrendo pouca influência da variação de densidade do fluido. Pode ser usado de forma contínua ou discreta. Ver construção mecânica típica na figura 11.8.



**Figura 11.8**

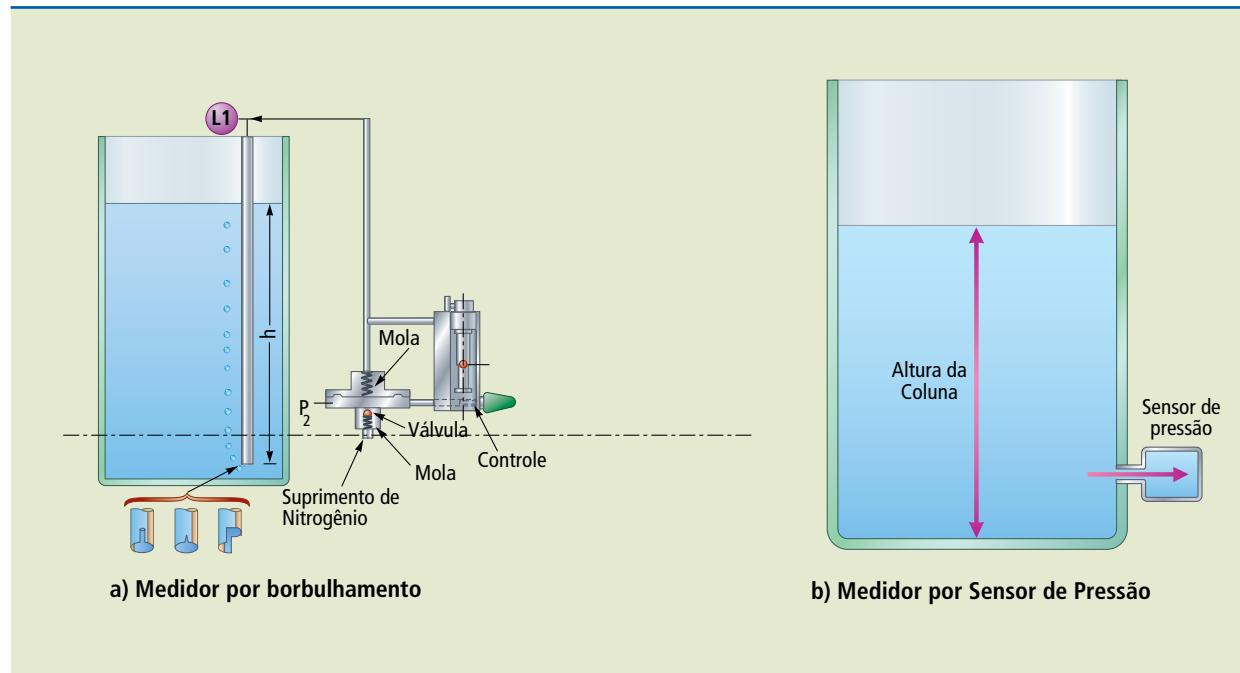
a) medidor discreto;  
b) medidor contínuo.

O sinal de saída de qualquer um dos dois tipos de medidores pode ser usado para atuação como controle. A saída do sinal no medidor contínuo pode ser utilizada, por exemplo, em um transmissor pneumático ou em um transmissor eletrônico. Esses tipos de medidores não são apropriados para sistemas com nível de fluido sujeito a grande agitação.

## 11.2.2 Medição por pressão

**Figura 11.9**  
a) Medição por borbulhamento de gás;  
b) medição por pressão de coluna.

Nesse tipo de sensor, a medida de pressão no fundo do tanque é proporcional ao nível (lembre-se do teorema de Stevin). Esse sistema é recomendado para líquidos limpos, pouco viscosos e pouco corrosivos. Ver construção mecânica de dois tipos de medidores por pressão na figura 11.9.



A medição de nível mostrada na figura 11.9a é determinada em função da pressão necessária para provocar borbulhamento do líquido. É utilizada em tanques abertos e também fechados, para líquidos que mantenham densidade constante.

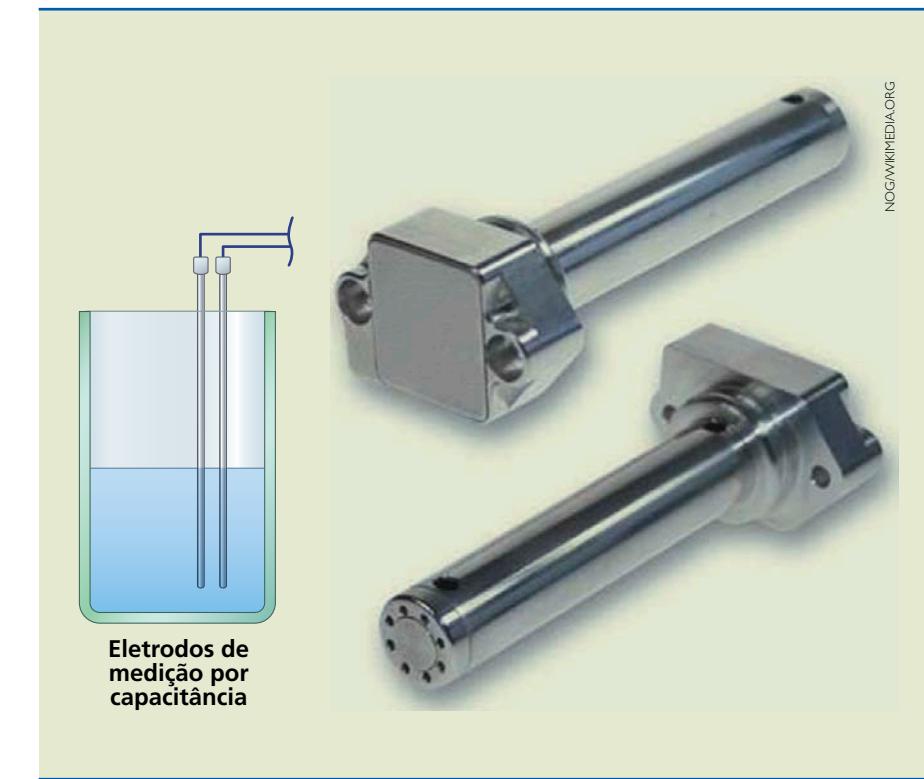
A medição por borbulhamento de gás apresenta como desvantagens a necessidade de assegurar uma pressão de gás constante e um fluxo de gás pequeno, além da possibilidade de os sólidos obstruírem os tubos de ligação e haver contaminação do líquido. Também fica inviabilizado o uso em tanques fechados que trabalhem pressurizados.

O tipo de medidor mostrado na figura 11.9b tem como característica a possibilidade de o sinal poder ser transmitido, pneumática ou eletronicamente, para indicação, registro ou controle remoto, além de existir disponibilidade de grande variedade de materiais de cápsulas, para uso em aplicações corrosivas.

As desvantagens dos medidores por sensor de pressão são a impossibilidade de utilização em líquidos voláteis e também em situações em que há variação da densidade do líquido do tanque, pois causam erros na medição.

## 11.2.3 Medição por variação de propriedades elétricas

Um dos tipos de sensores que usam esse princípio é o de medição por variação da capacidade de eletrodos mergulhados dentro do nível de líquido que se pretende medir.



**Figura 11.10**  
a) Esquema de montagem dos sensores tipo capacitivo;  
b) sensor tipo capacitivo.

Trabalhando com o sistema de medição por variação da capacidade, parte-se do princípio de que três elementos são necessários para constituir um capacitor: duas placas condutoras e um meio dielétrico. Um eletrodo capacitivo é a primeira placa condutora, a parede metálica do reservatório constitui-se na segunda placa e o produto interno é o dielétrico. Caso a parede do reservatório seja confeccionada em concreto, fibra de vidro, acrílico etc., que são materiais isolantes, um tubo metálico denominado camisa deverá ser colocado ao redor da haste da sonda, de modo a produzir a segunda placa que atua como referência.

O sensor de nível capacitivo mede o nível por meio da aplicação de um sinal de radiofrequência (RF), entre a haste capacitiva e a parede do tanque. As ondas de RF induzem uma pequena quantidade de corrente de deslocamento, que flui através do meio interno, denominado dielétrico, desde a sonda até a parede. Quando o nível sofre alguma variação, a dielétrica do conjunto, que é propor-

cional à leitura da capacidade, sofre também variação. Em outras palavras, a mudança de nível do produto resulta em uma variação de parâmetro capacitivo constituído pelo sistema.

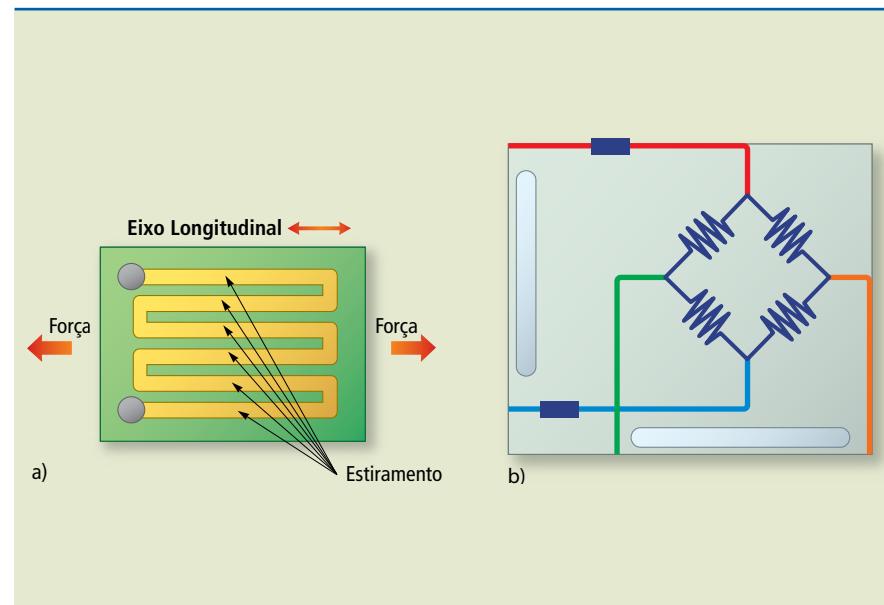
A capacidade do equipamento é alterada quando o produto toca na ponta da haste, indicando presença de nível. Quando a medição necessita de nível contínuo, a sonda converte o sinal de RF em um sinal de saída na faixa de mA, proporcional à mudança de nível.

Outra forma de medição de nível por variação de propriedades elétricas é a utilização de células de carga. O funcionamento das células de carga baseia-se na variação da resistência ôhmica do extensômetro (*strain gauge*) quando submetido a alguma deformação.

Na figura 11.11 é possível ver a indicação esquemática de um extensômetro e o modo como é ligado em um circuito elétrico conhecido como ponte de Wheatstone.

**Figura 11.11**

- a) Extensômetro;
- b) ponte de Wheatstone.



A ponte de Wheatstone mostrada na figura 11.11 é composta de quatro extensômetros ligados entre si, formando uma célula de carga. O desbalanceamento dessa célula, em razão da deformação dos extensômetros, é proporcional à força aplicada.

O corpo da célula de carga é uma peça metálica (alumínio, aço ou liga cobre-berílio), na qual os extensômetros são colados ficando inteiramente solidários a sua deformação. A atuação da força sobre o corpo da célula de carga provoca deformação na mesma e essa deformação é transmitida aos extensômetros que são os responsáveis em medir sua intensidade.

Veja montagem típica das células de carga para medição de nível do tanque na figura 11.12b.



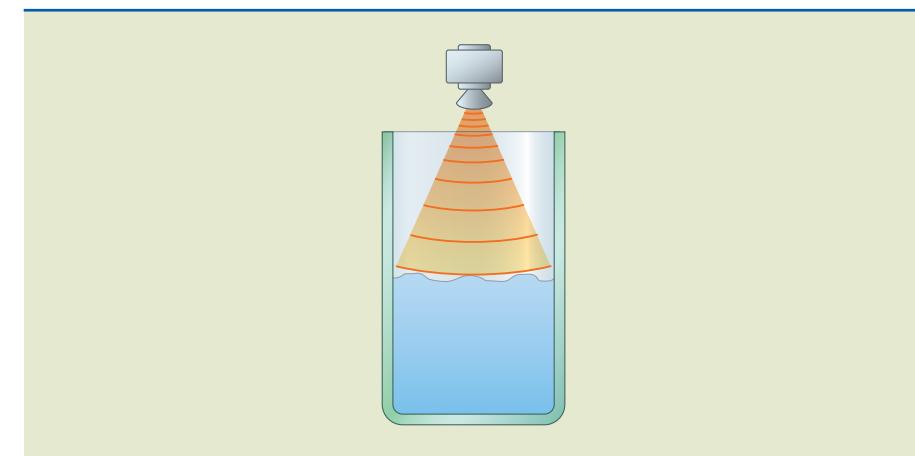
**Figura 11.12**

- a) Célula de carga;
- b) montagem das células de carga para medição de líquido.

#### 11.2.4 Medição de nível com utilização de diferentes propriedades

Esse tipo de medição é utilizado quando o fluido a ser medido apresenta alguma característica que impõe dificuldades para aplicação de um dos métodos anteriormente citados, em geral relacionadas à viscosidade, à corrosividade, às temperaturas altas, contaminação etc. Entre os sistemas mais comuns destacam-se os que utilizam o ultrassom e os que usam a radiação emitida por um elemento radioativo.

O sistema de medição por ultrassom emprega o princípio de emissão de uma onda sonora e o tempo que ela leva para retornar até um receptor, após ter atingido a superfície cujo nível se quer medir. O sensor utilizado é constituído por um cristal piezoeletro, que vibra em uma faixa entre 20 e 50 kHz e envia um sinal em direção ao nível a ser medido; ao incidir sobre a superfície, parte do sinal é refletido, sendo então enviado de volta a um detector de ultrassom. A medição é feita tomando como base o tempo transcorrido entre os impulsos emitidos e os recebidos de volta. Ver figura 11.13.



**Figura 11.13**

- Montagem de um sensor ultrassônico para medição de nível.

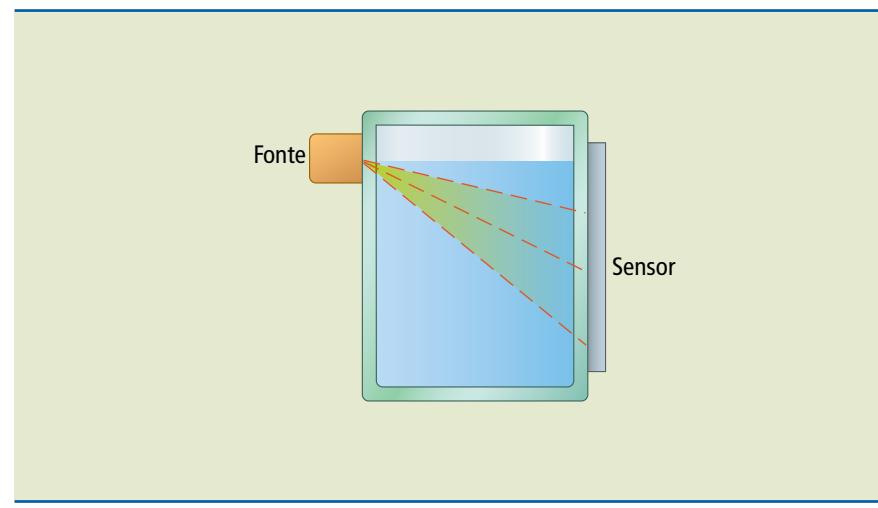
A medição com sensor ultrassônico apresenta alguns problemas. Entre eles, o fato de que a reflexão da superfície de nível é baixa, a superfície pode conter espuma, dificultando a leitura do sensor, bem como a formação de gases entre a superfície livre do líquido e o sensor que absorve o feixe ultrassônico, o que modifica sua velocidade de propagação.

Esse problema pode ser corrigido parcialmente com a instalação de sensor no fundo do equipamento. Esse sensor envia um sinal através do líquido, de baixo para cima. Nesse caso, o sensor tem de possuir excelente estanqueidade e resistir ao ataque químico do líquido com o qual está em contato, resultando em um tipo de instalação mais cara.

Quando a medição de nível é realizada em produtos muito viscosos ou corrosivos, ou sujeita à alta pressão e alta temperatura, por vezes se utiliza o sensoramento radioativo; nesse sistema é usada uma fonte externa de raios gama de um lado do reservatório e, no lado oposto dele, um conjunto de células de medição, conhecido como sensor radioativo ou contador de cintilação (ver figura 11.14).

**Figura 11.14**

Montagem de um medidor radioativo.



A quantidade de radiação recebida pelo sensor é inversamente proporcional ao nível do líquido.

Na maioria dos sensores, é utilizado o célio como fonte radioativa, podendo também ser usado o cobalto ou ainda o amerício.

A medição realizada dessa forma pode ser contínua ou discreta em sólidos ou líquidos, não existe contato entre o emissor, o receptor e o produto a ser medido, bem como independe da pressão, temperatura, viscosidade ou corrosividade do meio.

Em virtude do custo elevado do sistema, da radiação emitida no local e dos cuidados com a fonte radioativa, o uso desse tipo de medição fica restrito à impossibilidade de utilizar outro método de medição.

## 11.3 Medição de pressão

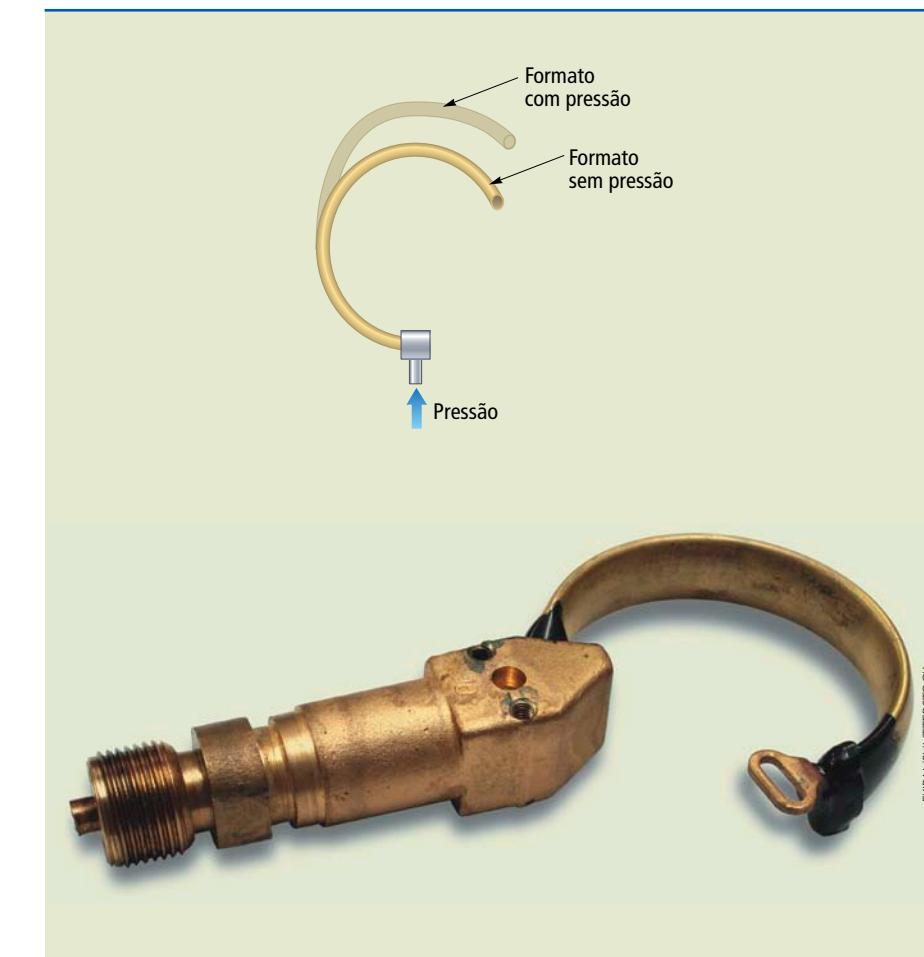
Nos processos industriais, a medição de pressão é essencial para o controle do sistema, já que sua variação implica também a variação do volume e da temperatura.

### 11.3.1 Medidores de pressão mecânicos

Essa medição é realizada em um fluido que pode ser líquido, vapor ou gás; quando só é necessária uma indicação do valor, é mais prático e barato utilizar um dispositivo denominado manômetro.

Esse tipo de instrumento indica o valor da pressão do sistema, e é referida como pressão manométrica; suas unidades mais usuais são  $\text{kgf}/\text{cm}^2$ , psig ou  $\text{lbf}/\text{in}^2$  e também o bar. Lembramos que a unidade para medição de pressão dentro do SI é o pascal (Pa).

O princípio de funcionamento do manômetro baseia-se na deformação sofrida por um tubo de parede fina, denominado tubo de Bourdon, quando submetido à pressão. Essa deformação induz a um movimento que é aproveitado por um conjunto mecânico devidamente ajustado para indicar a pressão.



**Figura 11.15**

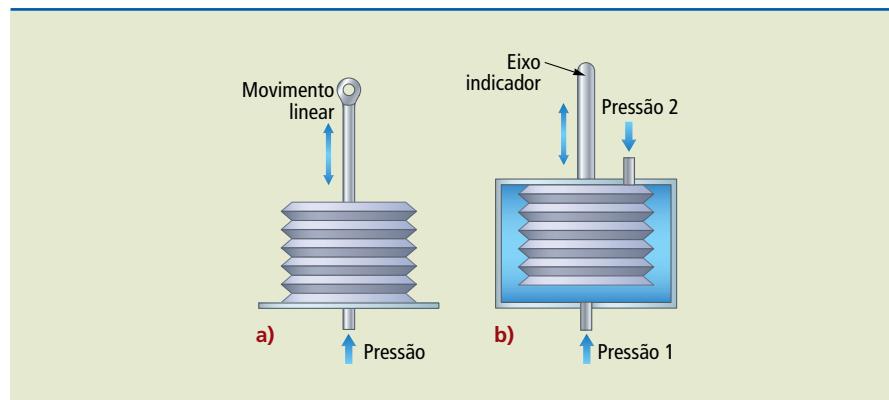
Deformação de um tubo Bourdon.

Se ligarmos a ponta do tubo de Bourdon a um controlador pneumático, este será um sensor mecânico; se a ligarmos a um sensor de posição, este emitirá um sinal elétrico proporcional à pressão do sistema e, nesse caso, será classificado como sensor de pressão elétrico.

O mesmo princípio de deformação é aplicado aos medidores que trabalham com a transformação da pressão em um movimento linear, denominados foles (ver figura 11.16).

**Figura 11.16**

- a) Medidor de pressão de fole simples;
- b) medidor de pressão diferencial.



Na figura 11.16a, um medidor de pressão por deformação de um fole simples; na figura 11.16b, vemos um medidor da diferença de pressão entre dois sistemas, com o fole montado dentro de um dispositivo conhecido como canister.

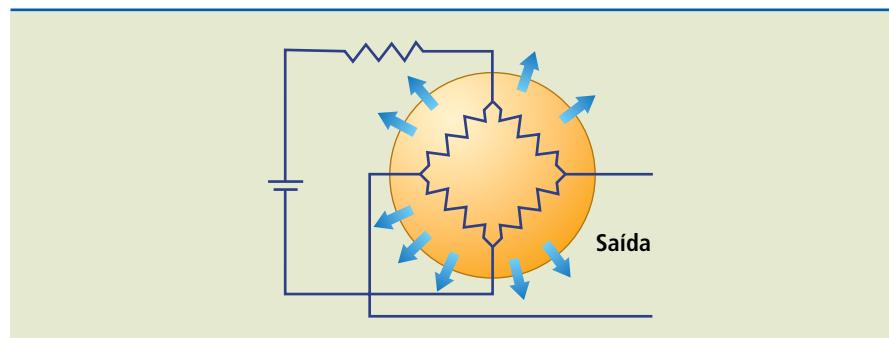
O movimento linear dos foles pode estar ligado a um sistema mecânico ou a um sistema elétrico, permitindo a indicação ou o controle de um atuador pneumático, hidráulico, elétrico ou misto.

### 11.3.2 Medidores de pressão elétricos

Alguns medidores de pressão operam de acordo com uma mudança na resistência, capacidade ou indutância. Um dos mais utilizados é o sensor tipo extensômetro ou *strain-gauge*. Um sensor desse tipo (figura 11.17) une esse elemento a uma membrana que é esticada à medida que a pressão é aplicada a ela. Se uma corrente constante for aplicada ao *strain-gauge*, sua tensão de saída varia de forma correspondente à mudança na pressão.

**Figura 11.17**

Representação de um sistema de medição por *strain-gauge*.

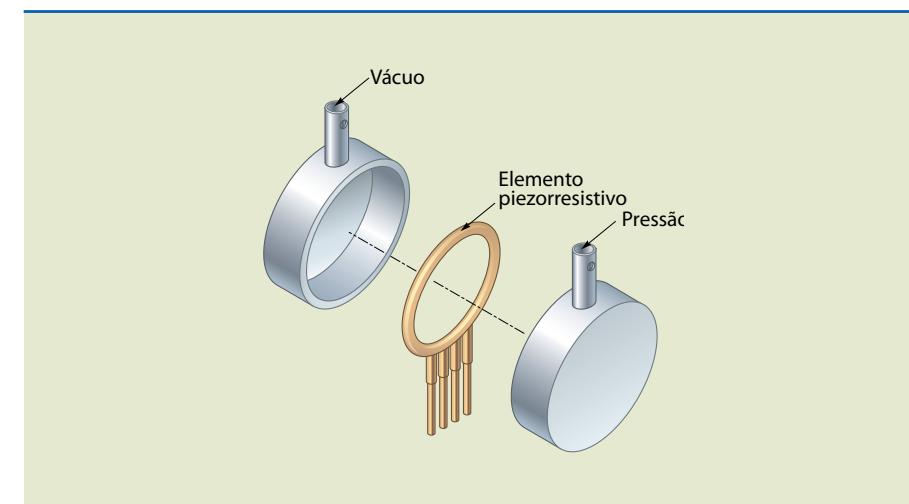


Outro tipo de medidor de pressão utiliza a característica de semicondutividade de alguns materiais, e especificamente a piezoresistividade. Alguns materiais cerâmicos apresentam variação de voltagem ao serem comprimidos, e esse comportamento pode ser aproveitado nos transdutores de pressão piezoelétricos.

A figura 11.18 mostra a montagem de um sensor piezoelétrico dentro de uma célula de medição de pressão. Ao ser comprimido em função da pressão aplicada, o sensor apresenta uma variação de resistência elétrica, correspondendo a uma variação de pressão.

**Figura 11.18**

Montagem de um sensor piezoelétrico.



Esses tipos de sensores aproveitam as propriedades piezoelétricas do silício e de alguns outros materiais cerâmicos. Podem ser usados para medição de pressão de líquidos e gases.

### 11.4 Medidores de vazão

A medição de vazão é extremamente importante na maioria dos processos industriais; o conceito de vazão ou fluxo significa a quantidade de um fluido deslocado em determinado intervalo de tempo. Utiliza-se a vazão volumétrica ( $m^3/h, L/min, GPM$ ), ou a vazão massica (também conhecida como gravimétrica, que no Sistema Internacional tem unidade de  $m^3/s$ ), quantidade em termos de massa ( $kg/h, lb/min$  – no Sistema Internacional,  $kg/s$ ).

Entre os medidores de vazão, temos os medidores baseados em pressão diferencial, os medidores volumétricos, os medidores elétricos e os medidores ultrassônicos.

#### 11.4.1 Medidores por pressão diferencial

Os medidores por pressão diferencial possuem uma restrição na linha de fluxo, a qual gera um aumento da velocidade do fluido no local e, consequentemente, uma queda de pressão, que varia com a quantidade de fluido escoando pelo tubo e é proporcional à raiz quadrada da diferença de pressão medida.

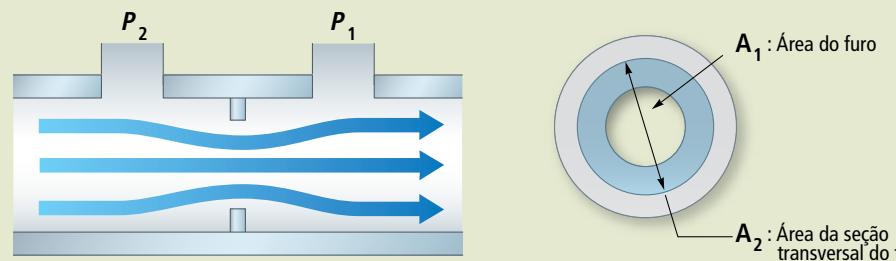
São necessárias duas tomadas de pressão: uma antes, e uma depois da restrição. Os valores coletados precisam ser tratados, antes de serem enviados para controlar algum dispositivo ou processo; para isso podem ser utilizados transmissores, que podem ser pneumáticos ou eletrônicos. Os medidores de vazão aqui referenciados são específicos para trabalhar com líquidos, gases ou vapores.

Entre os medidores mais comuns, encontramos a placa de orifício, o tubo Venturi e o tubo Pitot.

A placa de orifício (figura 11.19) é o dispositivo mais comum na medição de vazão, em função de sua simplicidade, baixo custo de fabricação e instalação. Esse tipo de componente produz grande perda de carga, mas na maioria das medições essa perda não tem grande relevância.

**Figura 11.19**

Indicação esquemática de uma placa de orifício.



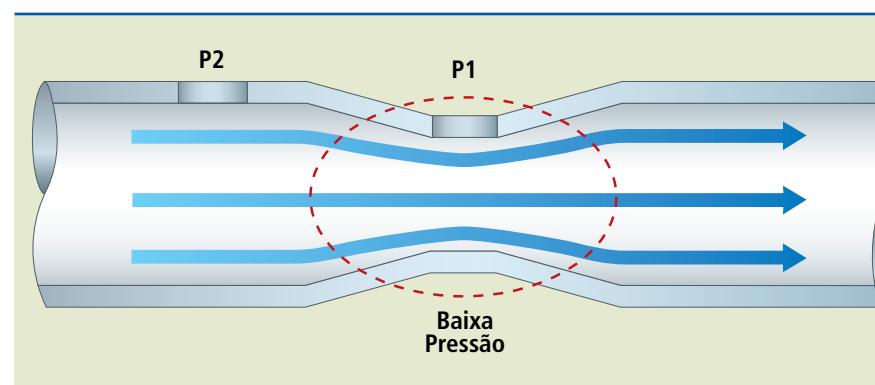
Na prática, uma placa de orifício precisa ser instalada entre um par de flanges parafusados, para permitir sua manutenção preventiva, já que a alta velocidade do fluido em contato com sua seção furada provoca erosão ao longo do tempo, resultando em leituras falsas. As placas de orifício são normalmente fabricadas em aço inoxidável, para aumento do tempo de vida.

Outro dispositivo bastante empregado como medidor de vazão é o tubo Venturi, que utiliza o mesmo princípio da placa de orifício, restringindo a passagem e aumentando a velocidade no local da tomada de pressão.

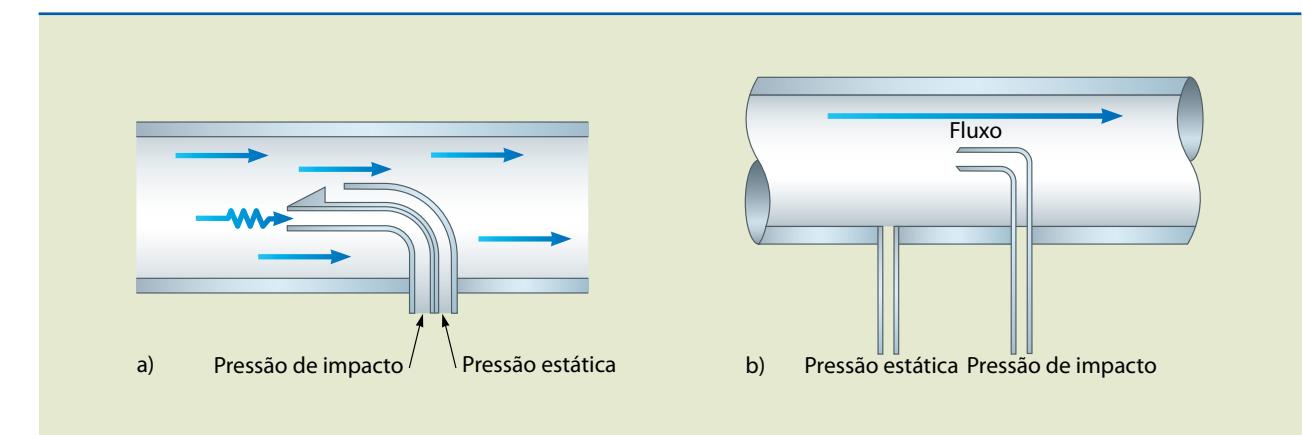
A diferença básica entre o tubo Venturi e a placa de orifício é o fato de que o tubo de Venturi (ver figura 11.20), se bem projetado, tende a perturbar menos o escoamento.

**Figura 11.20**

Tubo de Venturi.



O terceiro tipo de medidor de vazão que se baseia na utilização da pressão diferencial é o tubo Pitot. Usa como tomada de pressão um tubo de pequeno diâmetro colocado antagonicamente ao fluxo que está sob medição.



**Figura 11.21**

- a) Montagem das tomadas no centro do tubo;
- b) montagem com a tomada de pressão estática fora de centro.

Como vemos na figura 11.21a, são utilizadas a tomada de pressão estática e a tomada de pressão de estagnação (pressão de impacto). A tomada de pressão de estagnação obriga o fluido a atingir velocidade zero e a transformar toda a energia cinética do escoamento em energia de pressão. A tomada de pressão estática é feita na perpendicular à direção do escoamento.

Na figura 11.21b, indica-se a montagem alternativa àquela apresentada pela figura 11.21a, situação em que o tubo principal situa-se isoladamente no centro do tubo, medindo a pressão de impacto, enquanto o outro tubo mede lateralmente a pressão estática. Nas duas montagens, o princípio de funcionamento é o mesmo.

A pressão de estagnação (ou de impacto) será sempre maior que a pressão estática, se houver fluxo, e as pressões serão iguais quando não houver fluxo. Então, a diferença entre elas é proporcional à velocidade, consequentemente, à vazão. O tubo Pitot é utilizado em aeronaves e em indicadores de velocidade marítima por seu princípio de funcionamento.

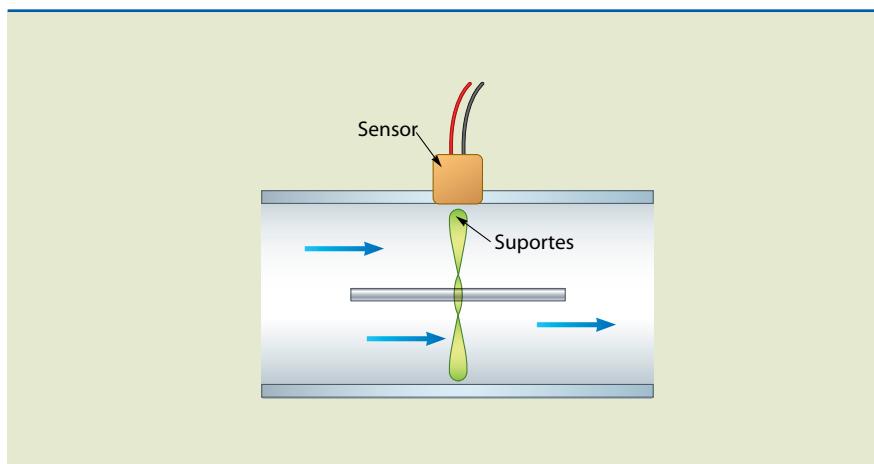
## 11.4.2 Medidores volumétricos

Esses tipos de medidores utilizam o princípio de medição do volume do fluido que passa por eles em um intervalo de tempo. Os medidores volumétricos mais importantes são os medidores do tipo turbina e os medidores de engrenagens.

Os medidores que usam as turbinas são constituídos por um rotor de palhetas que possui eixo de rotação paralelo à direção do fluxo. O rotor é acionado pelo fluido em movimento sobre as palhetas e sua velocidade de giro é proporcional à do fluido, que por sua vez, é proporcional à vazão. Um sensor na parte externa do corpo do medidor detecta o giro do rotor da turbina cujas pás são de material magnético.

**Figura 11.22**

Medidor com acionamento por turbina.



Os medidores acionados por turbina são muito usados na medição de vazão de líquidos limpos, em tubulações de pequeno diâmetro. Um dos problemas desse tipo de medidor são suas peças móveis e com folgas restritas, necessitando de manutenção constante. Também é fator limitante a escolha de materiais adequados para as palhetas, restringindo sua resistência à corrosão e limitação quanto à temperatura e pressão elevadas.

Outro tipo de medidor de vazão bastante utilizado é o medidor acionado por engrenagens. São giradas pelo fluxo que passa por elas e transmitem o movimento a um sistema de contagem ou de transmissão a dispositivos eletrônicos. Esses medidores são mais adequados para fluidos viscosos como óleos, mel, resinas, chocolates, vernizes etc.

Um par de engrenagens recebe o fluxo que, ao ser direcionado sobre elas, provocará sua rotação, sendo então transportado ao interior do medidor, ocupando as câmaras que se formam entre os dentes das engrenagens e o corpo do medidor. O fluxo se dirige à saída da câmara e a velocidade com que as engrenagens giram é proporcional à vazão. Assim, como a cada volta corresponde determinado volume, um sistema gerador de pulsos é acoplado ao corpo do medidor permitindo a medição.

Esse tipo de medidor apresenta como vantagem o custo relativamente baixo, e algumas desvantagens como, por exemplo, o fato de o dispositivo não ser apropriado para medição de pequenas vazões. O processo de transformação/movimentação das engrenagens gera grande perda de carga. Destaca-se o alto custo de manutenção, pois a presença de partículas em suspensão ou de bolhas de gás pode afetar muito a precisão do equipamento.

### 11.4.3 Medidores eletromagnéticos

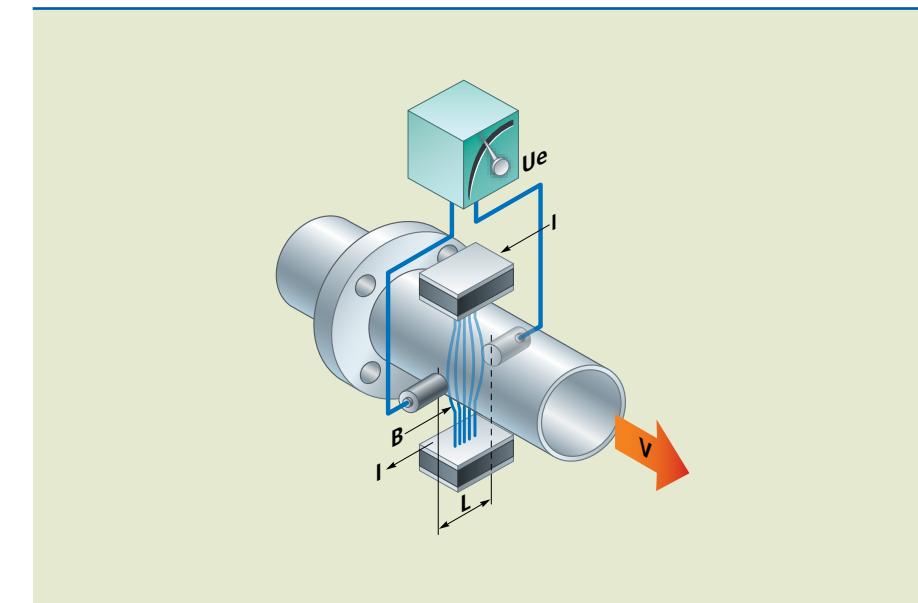
Esses tipos de medidores são dos poucos que não impõem obstruções de qualquer espécie ao escoamento do fluido. O medidor de vazão magnético é um dos mais utilizados para a medição de vazão pelo motivo de sua perda de carga ser equivalente a de um trecho reto de tubulação.

É praticamente insensível à densidade e à viscosidade do fluido a ser medido. Portanto, representa baixa interferência na medição. Por seu princípio de funcionamento, os medidores magnéticos são indicados para medir produtos químicos corrosivos, fluidos com partículas sólidas em suspensão, lama, água e polpa de papel. Por essas aplicações, é muito utilizado em empresas de saneamento, até indústrias químicas, papel e celulose, mineração e indústrias que manipulam líquidos como, por exemplo, as alimentícias. A restrição se deve ao fato de que o fluido tem de ser eletricamente condutivo para que a vazão gere o campo magnético.

A lei de Faraday de indução magnética estabelece que, se uma tensão é induzida em um condutor que se move em um campo magnético, então uma tensão proporcional à velocidade do fluido pode ser detectada por eletrodos colocados aos lados do tubo. Como a área da seção do duto é conhecida, o volume do fluido no tubo pode ser calculado. Ver esquema indicado na figura 11.23.

**Figura 11.23**

Esquema de funcionamento de um medidor magnético.



A tensão pode ser determinada pela equação 11.1:

$$U_e = B \cdot L \cdot V \quad (11.1)$$

em que:

$U_e$  = tensão (V)

$B$  = campo magnético (tesla)

$L$  = distância entre os eletrodos (m)

$V$  = velocidade do fluido (m/s)

O tubo de passagem do fluido é normalmente fabricado em aço inoxidável austenítico, não magnético. Os materiais do revestimento interior do tubo e os eletrodos são escolhidos em função do fluido a medir.

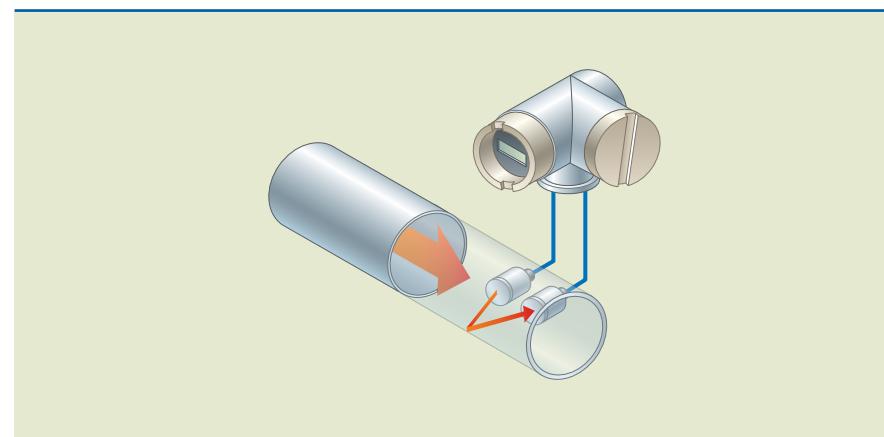
#### 11.4.4 Medidores ultrassônicos

Composto de um emissor e um receptor de ultrassom, esse método de medição se baseia na velocidade do som como meio auxiliar de medição, utilizando cristais piezoeletétricos como transdutores-emissores de ultrassom, para enviar sinais acústicos (ondas mecânicas) que passam de molécula em molécula do fluido antes de atingir os sensores receptores correspondentes.

Em alguns medidores ultrassônicos, os transdutores são presos à superfície externa da tubulação, não tendo contato com o fluido, de maneira a não interferir no fluxo. Em outros, os transdutores estão em contato direto com o fluido.

No tipo de construção mais simples (figura 11.24), o conjunto é formado por um transdutor de ultrassom e um receptor que também é um transdutor. A onda ultrassônica que é enviada através de pulsos atravessa o fluido duas vezes, uma na ida e outra na volta, após ter refletido na parede oposta. A onda é arrastada pelo líquido em movimento e o percurso total e a atenuação da onda dependem da velocidade do movimento.

**Figura 11.24**  
Montagem dos transdutores ultrassônicos.



Esse tipo de medidor tem resolução melhor que a da placa de orifício e não introduz qualquer obstrução, da mesma forma que o medidor eletromagnético. É bastante utilizado para líquidos viscosos e pastosos ou perigosos (alta pressão, corrosivos, radioativos), empregando a técnica de medição por efeito Doppler, na qual a frequência do sinal emitido é alterada pela reflexão do feixe nas partículas do fluido. Também é usado para líquidos limpos e gases e, nesse caso, utiliza a técnica de tempo de trânsito, na qual o tempo de trânsito do sinal é medido. Esse tipo de medição requer correção automática em função da alteração de temperatura através de um termistor pois a velocidade do som no fluido é alterada em função da temperatura.

#### 11.5 Controladores PID

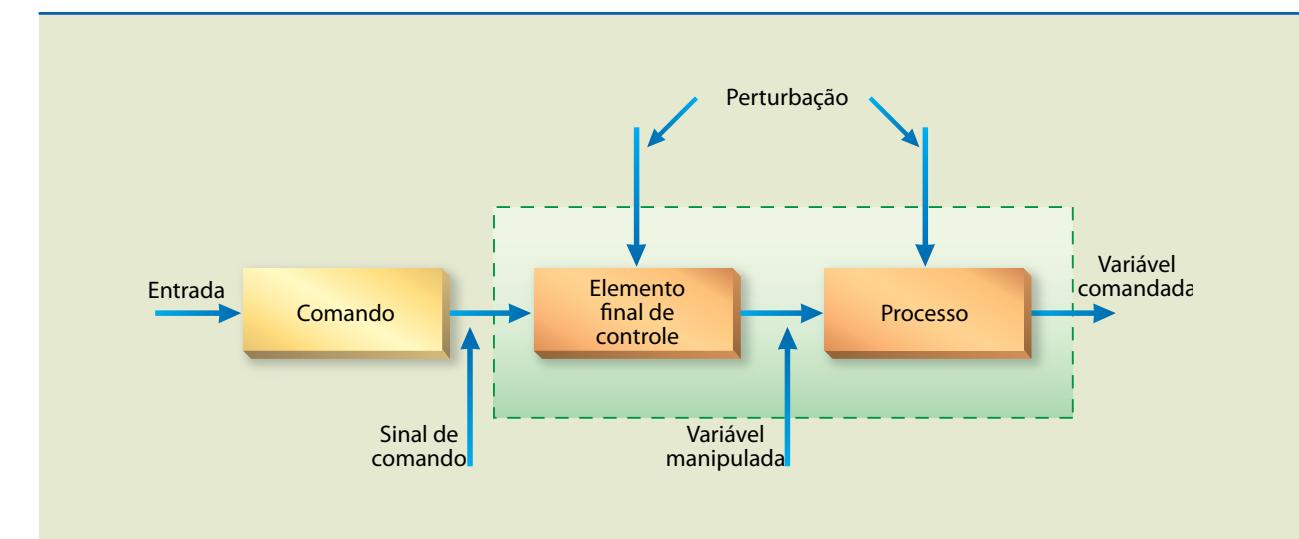
O mercado globalizado tem exigido das empresas melhores produtos com custos reduzidos. Para conseguirem esses objetivos, as indústrias têm procurado substituir a manufatura tradicional por sistemas altamente automatizados.

Nos processos industriais, a automação faz uso de dois tipos de sistemas: o sistema de comando e o sistema de controle.

#### 11.5.1 Sistema de comando

Nesse tipo de sistema, temos uma sequência de componentes interligados, processando as informações da entrada para a saída, sem retorno de como o processo está se comportando; temos então a definição de malha aberta (figura 11.25).

**Figura 11.25**  
Estrutura de um sistema de comando em malha aberta.



A seguir, definimos algumas das informações mostradas na figura 11.25.

**Comando** – Dispositivo ou sistema que dirige o posicionamento do elemento final de controle para que atue sobre a variável manipulada, que pode ser, por exemplo, a pressão de ar (o objetivo é que a variável comandada fique dentro do valor desejado).

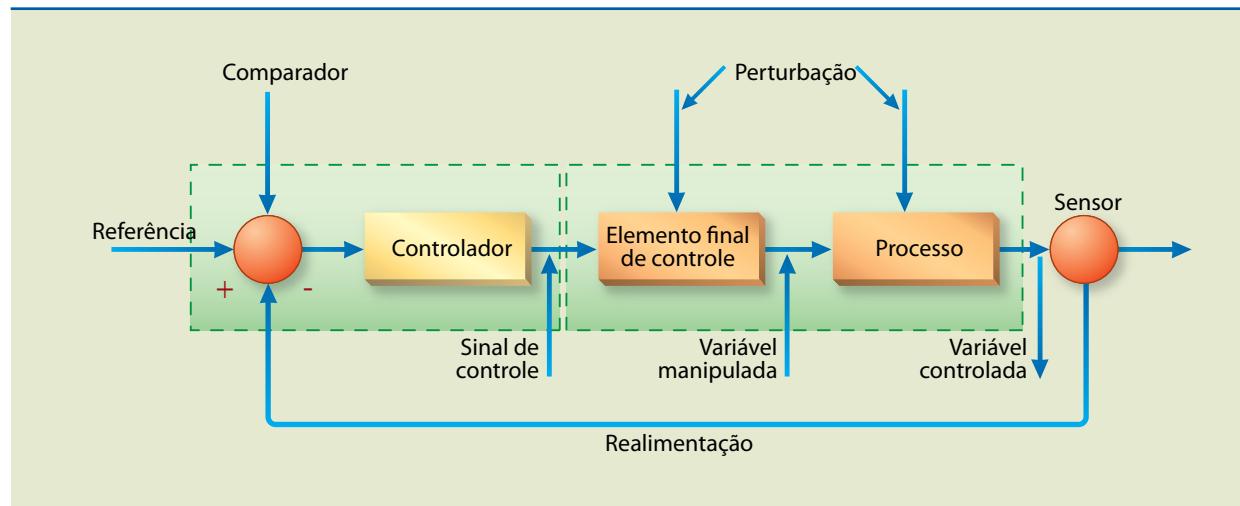
**Elemento final de controle** – Elemento que atua na variável manipulada, com base no sinal de comando recebido.

**Processo** – Processo industrial ou equipamento de comportamento dinâmico, sobre o qual se atua para obtenção do controle de determinado produto ou uma variável do processo.

**Perturbação** – É um sinal anormal, que tende a alterar o processo e, consequentemente, a variável manipulada.

#### 11.5.2 Sistema de controle

Nesse tipo de sistema (figura 11.26), temos uma sequência de componentes interligados em malha fechada, com um fluxo de informações no sentido da entrada para a saída, e outro fluxo no sentido inverso, da saída para a entrada; esse último fluxo é denominado realimentação (*feedback*, em inglês).

**Figura 11.26**

Estrutura de um sistema de controle em malha fechada.

A seguir, definimos algumas das informações mostradas na figura 11.26.

**Controlador** – Sua função é introduzir um sinal de controle que vai posicionar o elemento final de controle (por exemplo, uma válvula pneumática). A variação desse sinal é proporcional ao sinal de erro enviado pelo elemento comparador.

**Comparador** – Elemento que gera um sinal de erro proporcional à diferença que existe entre o sinal de realimentação e o sinal de referência.

**Sensor** – Elemento que sente as alterações da variável controlada e envia um sinal equivalente ao comparador.

**Elemento final de controle** – Possui a mesma função que a exercida no sistema de comando.

**Processo** – Possui a mesma função que a exercida no sistema de comando.

**Perturbação** – Possui a mesma função que a exercida no sistema de comando.

### 11.5.3 Sistemas de controle automáticos contínuos

Os sistemas de controle automáticos em malha fechada utilizam um controlador. Eles possuem uma saída que varia de modo contínuo e podem assumir qualquer valor compreendido entre os limites alto e baixo.

A classificação desse tipo de controle varia dependendo de como a informação de erro é processada e do tipo de sistema de controle, que pode ser estático, dinâmico ou combinado.

Na forma estática, o controle é executado de forma proporcional e, por causa disso, costuma-se trabalhar com a indicação de controle tipo P. Na forma dinâmica, o controle pode ser dito integral, recebendo o nome de controle I ou, ainda, pode ser executado de forma derivativa, recebendo o nome de D.

O controle combinado trabalha de forma estática e dinâmica e pode ser executado de forma P + I ou P + D ou ainda P + I + D, conhecido como PID. A técnica de controle PID se resume em calcular um valor sobre o processo comparando-se o valor desejado com o valor atual da variável.

O valor de atuação sobre o processo é transformado em sinal apropriado ao tipo de atuador utilizado (que pode ser uma válvula, um motor ou um relé) e deve garantir um controle estável e de precisão.

O PID pode ser entendido como a composição de três ações básicas. Para o P, a correção é proporcional ao erro, isto é, a correção a ser aplicada ao processo deve crescer na proporção que cresce o erro entre o valor real e o desejado.

A segunda ação, I, possui a correção proporcional ao produto erro *versus* tempo, em que pequenos erros que persistem há algum tempo requerem correção mais intensa. A terceira ação, D, tem a correção proporcional à taxa de variação do erro, isto é, se o erro está variando muito rápido, essa taxa de variação tem de ser reduzida, para evitar oscilações.

Para poder trabalhar com os diferentes tipos de controle, temos de definir alguns termos utilizados nas operações envolvendo PID:

**SV ou SP** – Valor desejado para a variável de processo, conhecido como *setpoint*, em inglês.

**PV** – Variável de processo ou *process variable*, em inglês. É a variável controlada no processo, como pressão, temperatura, vazão, umidade etc.

**MV** – Variável manipulada. É a variável sobre a qual o controlador atua a fim de controlar o processo. Ela pode ser a tensão aplicada a uma resistência de aquecimento, a posição de comutação de uma válvula etc.

**Desvio ou erro** – Diferença entre SV e PV, PV-SV para ação direta e SV-PV para ação reversa.

**Ação de controle** – A ação de controle pode ser direta ou reversa e define a atuação aplicada à MV na ocorrência de variações da PV.

**Ação reversa** – Se PV aumenta, MV diminui. Esse tipo de controle é muito utilizado em relação ao aquecimento.

**Ação direta** – Se PV aumenta, MV aumenta. Tipo de controle bastante utilizado em controle de refrigeração.

#### Controle proporcional

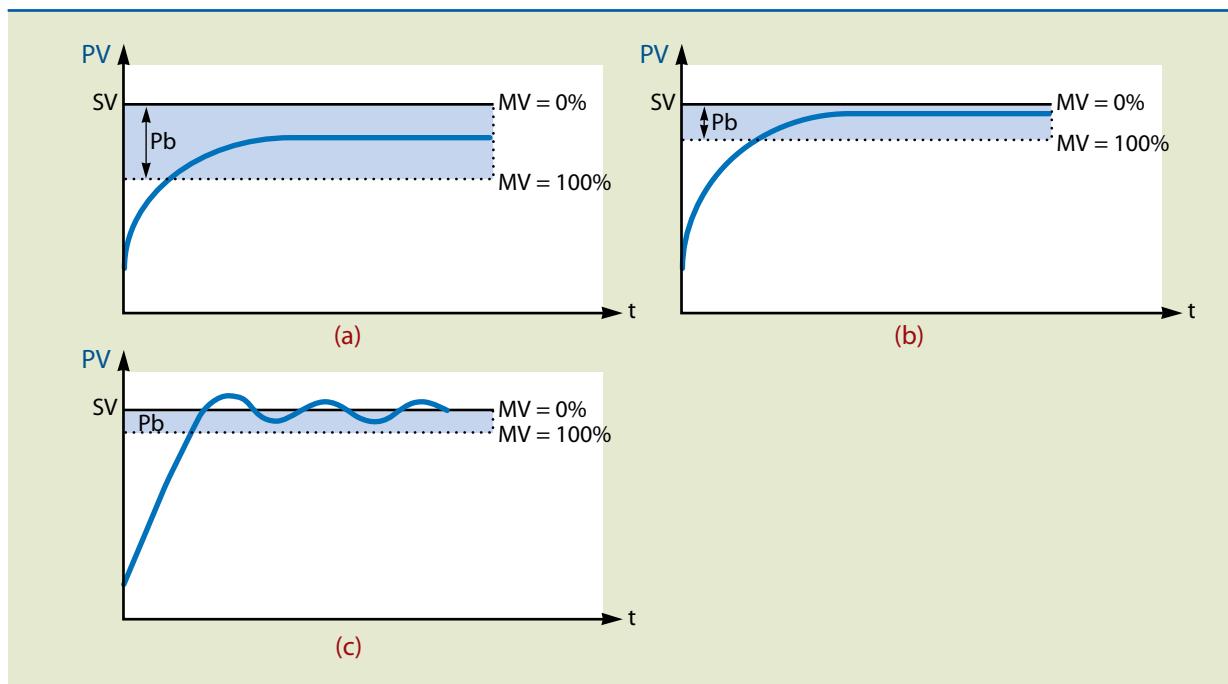
O controle proporcional apresenta uma relação matemática proporcional entre o sinal de saída do controlador e o erro. Para cada valor de erro, existe um único valor de saída correspondente, desde que o erro esteja dentro de uma

faixa determinada, conhecida como banda proporcional (*proportional band*, em inglês).

No controle tipo proporcional, MV é proporcional ao valor de desvio (SV-PV, para ação reserva de controle). Para desvio zero (SV = PV), MV = 0; à medida que o desvio cresce, MV aumenta até o máximo de 100%. A banda proporcional (Pb) é definida quando o valor de desvio provoca MV = 100%. Com PB alta, a saída MV só irá alta se o desvio for alto. Com PB baixa, a saída MV assume valores altos de correção mesmo para pequenos desvios. Portanto, quanto menor o valor de PB, maior é a ação proporcional de controle. A figura 11.27 indica o efeito da variação da banda proporcional no controle de um processo.

**Figura 11.27**

Efeito da variação da banda proporcional no controle de um processo.



Podemos observar que, quando a banda proporcional é grande, ocorre a estabilidade do processo, porém essa estabilidade será em um ponto distante do *setpoint* (desejado), o que mostra a figura 11.27a. Quando essa banda proporcional é reduzida para valores pequenos próximos ao *setpoint*, teremos uma instabilidade também próxima ao *setpoint*, conforme figura 11.27b. Sempre devemos tomar o cuidado de não reduzir demais a banda proporcional, pois isso gera instabilidade e provoca uma oscilação que pode ou não divergir, se afastando do *setpoint*.

O ajuste da banda proporcional é uma etapa importante do processo de controle, sendo conhecido como sintonia do controle.

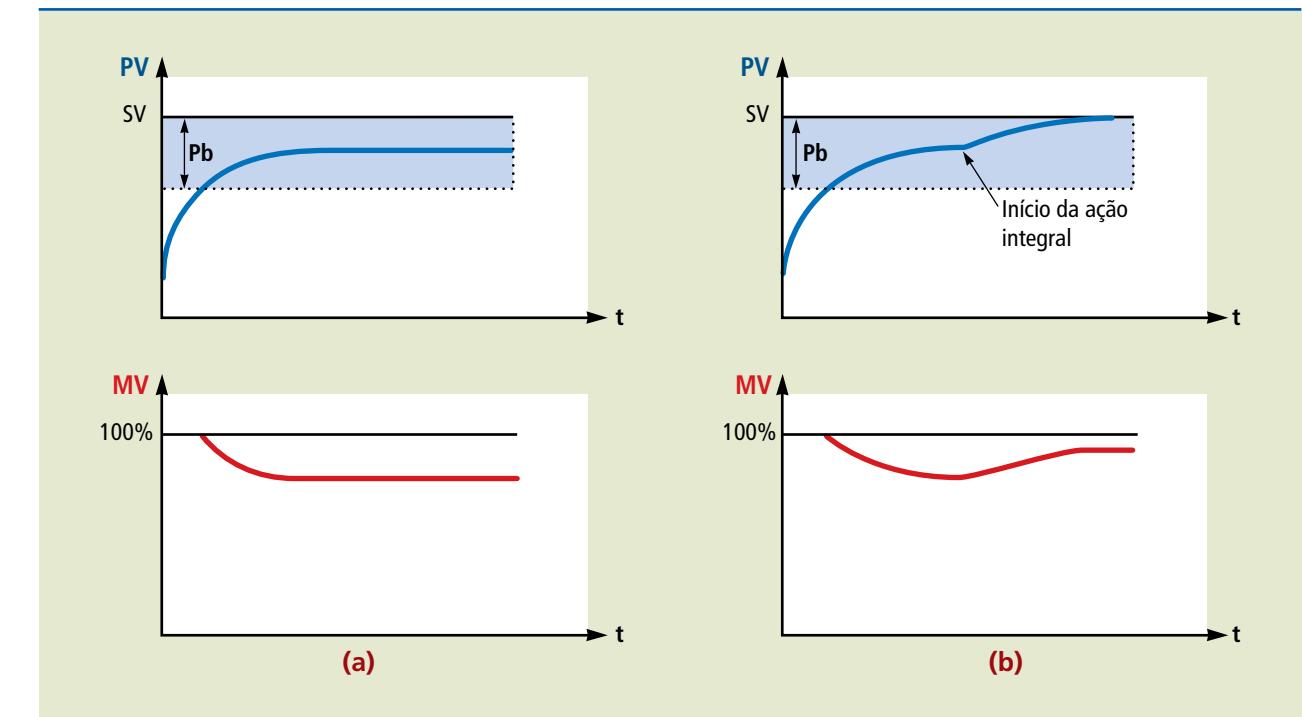
Quando a condição de controle desejada é atingida, PV = SV, o termo proporcional resulta em MV = 0, ou seja, nenhum ajuste será necessário ao processo, o que faz com que volte a surgir desvio em função da dinâmica do processo. Por essa razão, um controle proporcional puro não consegue estabilizar com PV = SV.

### Controle integral

O controle integral isoladamente não é uma técnica de controle. Ele deve ser empregado juntamente com uma ação proporcional. A ação integral é uma resposta na saída do controlador (MV) proporcional à amplitude e duração do desvio. A ação integral elimina o desvio característico de um controle puramente proporcional; para melhor entendimento, vamos supor um processo estabilizado com controle P, conforme apresentado na figura 11.28.

**Figura 11.28**

Exemplo de aplicação de controle integral.



Na figura 11.28a, PV e MV estão em condição de equilíbrio, em que a quantidade de controle entregue ao sistema (MV) é a necessária para manter estável o valor de PV, porém, abaixo do *setpoint*. Nesse caso, está ocorrendo o denominado erro em regime permanente.

Na figura 11.28b, no instante assinalado, foi iniciada a ação integral. Ocorre uma constante elevação do valor de MV e a subsequente eliminação do erro em regime permanente. Incluindo-se a ação integral, MV tem seu valor alterado sequencialmente com a intenção de eliminar o erro de PV, e o processo continua até que PV e MV alcancem um novo equilíbrio, mas com PV = SV.

O processo de controle integral baseia-se na correção do valor de MV adicionando o valor do desvio SV-PV em intervalos regulares de tempo. Esses intervalos de tempo de atuação do processo são denominados tempo integral, que tem associado o seu inverso, denominado taxa integral (Ir). Uma variação positiva no valor da Ir implica um aumento na atuação do controle integral no processo, e uma diminuição na Ir indica que está diminuindo a atuação do controle.

A ação integral tem como objetivo eliminar o erro em regime permanente. Ao adotar um termo integral excessivamente atuante, o processo pode ser levado à instabilidade. E, nesse caso, a adoção de um integral de pouca atuação atrasa a estabilização  $PV = SV$ .

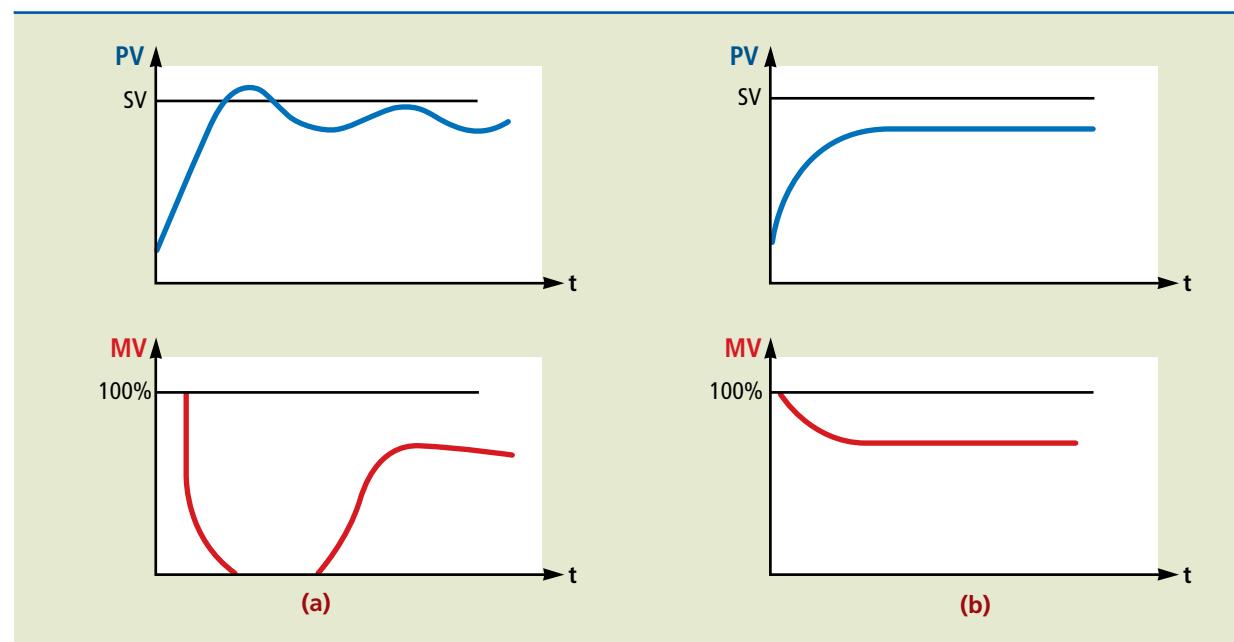
### Controle derivativo

Assim como o controle integral, o controle derivativo necessita de uma ação proporcional para que seja considerado técnica de controle. As ações derivativa e proporcional são combinadas de forma que a atuação do controle tenha um desempenho desejado. Dessa forma, a ação derivativa é uma resposta na saída do controlador (MV) que deve ser um valor em função da velocidade de variação do desvio. A atuação derivativa diminui a velocidade das variações de PV, repercutindo em subidas e descidas suaves e evitando as oscilações de controle.

O derivativo só trabalha quando há variação no erro; se o processo está estabilizado, sua atuação é nula. Durante perturbações (variações bruscas) ou na partida do processo, o erro tem valor significativo; consequentemente, o controle derivativo sempre tem atuação forte para minimizar as variações. Sua principal indicação é para melhorar o desempenho do processo durante essas transições.

**Figura 11.29**

Comparação de um controle proporcional com um derivativo.



No controle P indicado na figura 11.29a, se a banda proporcional é pequena, é bem provável que ocorra a ultrapassagem do alvo, conhecida como *overshoot* (em inglês), na qual PV ultrapassa SV antes de estabilizar. Esse fato acontece pelo motivo de MV ter permanecido no seu máximo valor por longo tempo e por ter sua redução iniciada quando já estava muito próxima de SV, ou seja, quando é tarde para impedir o *overshoot*. Uma proposta seria aumentar a banda proporcional; entretanto, seria ampliado o erro em regime permanente. Outra solução

seria a inclusão de controle derivativo indicado na figura 11.29b, o que reduziria o valor de MV se PV estivesse crescendo muito rápido. Quando se antecipa a variação de PV, a ação derivativa diminui ou elimina o *overshoot* e diminui também as oscilações no período de transição do processo.

O controle derivativo é calculado matematicamente, ou seja, em intervalos regulares, o controlador calcula quanto o processo desviou e soma à MV o valor desta variação. Se PV aumenta, o desvio reduz, gerando uma variação negativa que diminui o valor de MV e, portanto, atrasa a elevação de PV. A amplitude da ação derivativa é regulada pela variação do intervalo de cálculo da diferença, e esse parâmetro é conhecido como tempo derivativo (Dt). Com o aumento de Dt, aumenta-se a ação derivativa e diminui-se a velocidade de variação de PV.

### Controle proporcional + integral + derivativo

O controle PID consiste na combinação das características das três ações de controles: proporcional, integral e derivativa. Ao unirmos as três técnicas, conseguimos associar o controle básico do proporcional (P) à eliminação do erro do integral (I) e à redução de oscilações do derivativo (D) e enfrentamos a dificuldade de ajustar a amplitude de cada um dos tipos de controle. A esse processo chamamos de sintonia do PID.

A sintonia do PID possui diversas técnicas de controle, para operações do processo em malha aberta, caso do controle manual, e para operações em malha fechada, no controle automático. A maior parte dos controladores PID industriais possui recursos capazes de aplicar um ensaio ao processo e obtém o conjunto de parâmetros do PID (PB, Ir e Dt) de retorno.

Para a maioria dos processos, esse cálculo satisfaz, mas, em muitos casos, se faz necessária a correção manual para alcançar um desempenho de controle mais eficaz (estabilização mais rápida e menos *overshoot*).

O ajuste manual é feito por tentativa e erro, até que se acertem os parâmetros em relação aos do PID, verificando o desempenho do processo até que se atinja a performance desejada.

Para isso, é preciso conhecer o efeito de cada parâmetro do PID sobre a *performance* do controle, além de experiência em diferentes processos.

Na avaliação do desempenho do controlador, é necessário analisar o comportamento da PV e MV e observar se o controlador está atuando adequadamente sobre MV. À medida que o operador adquire experiência, esse tipo de observação passa a ser eficiente.

Podemos resumir o efeito da atuação manual sobre cada um dos seguintes parâmetros:

**Banda proporcional (Pb)** – Quando a banda proporcional é aumentada, o processo torna-se mais lento, mais estável, com menores oscilações; e o *overshoot*

diminui. Quando se diminui a banda proporcional, o processo fica mais rápido, mais instável, com maiores oscilações; e o *overshoot* aumenta.

**Taxa integral (Ir)** – Quando a taxa integral é aumentada, o processo torna-se mais rápido e o *setpoint* é alcançado mais rapidamente. Há mais instabilidade no processo e aparecem mais *overshoots*. Quando se diminui a taxa integral, o processo torna-se mais lento, demorando para atingir o *setpoint*, que fica mais estável, com menores oscilações, e diminui o *overshoot*.

**Tempo derivativo (Dt)** – Quando o tempo derivativo é aumentado, o processo torna-se mais lento, com menores *overshoots*; quando o tempo derivativo é diminuído, aparecem maiores *overshoots*.

#### Exemplos práticos de aplicações para o controle manual

- O que podemos alterar para a melhoria do sistema, se a *performance* do processo está quase boa, mas não se tem *overshoot* e há demora para atingir o *setpoint*?

*Solução:*

As opções possíveis de alteração poderiam ser a diminuição da Pb em 20% ou o aumento da Ir em 20% ou, ainda, a redução de Dt em 50%.

- O que podemos fazer de alteração para a melhoria do sistema, se a *performance* do processo está quase boa, mas o *overshoot* está um pouco alto?

*Solução:*

As opções possíveis de alteração poderiam ser o aumento da Pb em 20%, a redução da Ir em 20%, ou o aumento do Dt em 50%.

- O que podemos alterar para a melhoria do sistema, se a *performance* do processo está boa, mas MV está sempre variando entre 0% e 100% ou está variando demais?

*Solução:*

As opções possíveis de alteração poderiam ser a redução de Dt em 50% ou o aumento de Pb em 20%.

- O que podemos alterar para a melhoria do sistema, se a *performance* do processo está ruim? Após a partida, avança lentamente em direção ao *setpoint*, sem *overshoot*; e apesar de ainda estar longe do *setpoint*, MV já é menor que 100%.

*Solução:*

As opções possíveis de alteração poderiam ser a redução da Pb em 50%, o aumento da Ir em 50% ou, ainda, a redução da Dt em 70%.

# Capítulo 12

## Introdução à robótica

**A** robótica tem por objetivo liberar o ser humano de tarefas difíceis e repetitivas. Inúmeros recursos destinados ao desenvolvimento e pesquisa em robótica começaram a obter bons resultados.

Essa ciência surgiu como resultado de intensa pesquisa na área de computadores, ainda está em desenvolvimento e abrange as áreas de controle e inteligência artificial. Para a inteligência artificial, o robô deverá, por si, só tomar decisões e identificar os objetos a seu redor. Ela depende de computadores que possam funcionar como cérebros: pequenos, sofisticados, rápidos, com grande espaço de memória, com baixo consumo de energia e capacidade de analisar situações complicadas.

O avanço da robótica pode levar a situações em que as indústrias poderão trabalhar continuamente, sem que pessoas participem de sua linha de produção, que será controlada por computadores, robôs e sensores. Assim, o planejamento de processos poderá ser feito por um computador central, identificando e corrigindo falhas, como sempre vemos em filmes de ficção científica. As poucas pessoas presentes serão incumbidas do gerenciamento do processo produtivo. A verificação desse cenário depende de outras questões que vão além da capacidade tecnológica para sua instalação e dependem também de questões sociais e econômicas. Evidentemente, essas implicações fogem ao escopo deste livro, que pretende apresentar conceitos básicos sobre a robótica e as vantagens de sua aplicação nos processos produtivos.

A maioria dos robôs é feita para uma função específica, mas existe uma minoria composta por um cérebro positrônico, podendo desenvolver várias atividades com criatividade.

O termo *robot* nasceu da palavra tcheca *robotnik*, que significa trabalho forçado, e apareceu pela primeira vez na peça de teatro *RUR – Robôs universais de Rossum*, do escritor e teatrólogo tcheco Karel Capek, por volta de 1921.

Décadas atrás, os robôs faziam parte apenas da ficção científica e eram fruto da imaginação do homem.

Existem registros de várias animações mecânicas, como o leão animado de Leonardo da Vinci e suas máquinas que tentavam reproduzir o voo das aves.

Mas foi George Devol, pai da robótica industrial, que, com a construção de robôs no século XX, aumentou a produtividade e melhorou a qualidade dos produtos.

Os robôs dos anos 1960 eram destinados a executar tarefas que o ser humano não podia realizar, pois envolviam ambientes de trabalho com altos níveis de calor, ruído, gases tóxicos, esforço físico extremo, trabalhos monótonos.

## 12.1 Robôs e medicina

Paraplégicos voltam a andar com exoesqueleto. A frase, que poderia ser retirada de um título de artigo na imprensa, diz respeito a uma pesquisa que está em desenvolvimento. A pesquisa de exoesqueleto computadorizado ajuda paraplégicos nas atividades diárias, até então impossíveis de serem realizadas. O exoesqueleto é composto de apoios motorizados para pernas, sensores corporais e mochila com uma caixa de controle computadorizada, baterias recarregáveis e controle remoto preso no pulso. No dispositivo experimental, é por esse controle que a pessoa escolhe ficar de pé, sentar, caminhar, descer ou subir escadas. O movimento do corpo para a frente ativa os sensores corporais e coloca as pernas robóticas em movimento (figura 12.1).



**Figura 12.1**  
Exoesqueleto robótico experimental.

No nível de desenvolvimento atual, o sistema ainda precisa de muletas para ajudar com o equilíbrio, mas já é uma grande conquista.

Amit Goffer, fundador da Argo Medical Technologies, empresa de alta tecnologia em Israel, é o engenheiro criador.

## 12.2 Robôs pessoais

Os robôs pessoais são máquinas cuja ocupação está voltada para serviços domésticos e em ambientes comerciais, como restaurantes, escritórios, lojas.

Embora o mercado para esses robôs seja amplo, atualmente, fatores como alto custo, segurança (pela proximidade com pessoa), e precisão (pela necessidade de mobilidade) não permitem maiores investimentos nessa área.

Nessas aplicações, a exigência de processamento e emprego de sensores sofisticados para realização adequada das tarefas têm limitado, por questões econômicas, ao menos temporariamente, o uso de robôs pessoais em larga escala.

## 12.3 Robôs inteligentes

Os robôs inteligentes são controlados por computador e capazes de tomar decisões em tempo real. Avanços significativos têm surpreendido até os mais céticos. (Ver figura 12.2).

**Figura 12.2**

Robô Da Vinci.



No Hospital Sírio-Libanês, em São Paulo, no fim de março de 2008, foi realizada com sucesso a primeira cirurgia robótica no Brasil. O “robô-cirúrgico” se chama Da Vinci. É um dos primeiros e mais modernos sistemas robóticos para cirurgias do mundo. Possui tecnologia capaz de proporcionar imagens

tridimensionais do paciente durante a operação. Combina computador e tecnologia robótica, criando uma nova categoria de tratamento cirúrgico, que imita os movimentos humanos. Infelizmente, o robô Da Vinci não é capaz de operar nenhum paciente sozinho. Ele depende das mãos de um cirurgião habilidoso para controlá-lo durante o procedimento cirúrgico.

Apesar do extraordinário avanço tecnológico da robótica, ainda são muito limitadas as aplicações com inteligência artificial. Não há nenhum dispositivo inventado pelo ser humano que seja capaz de tomar decisões por conta própria. Diversos algoritmos matemáticos e dispositivos têm sido desenvolvidos em busca desse ideal, ainda distante.

## 12.4 Robôs precursores de um futuro próximo

Alguns robôs, como o Hero 1 (figura 12.3) e o Androbot (figura 12.4) já foram oferecidos ao mercado e são os precursores de modelos mais sofisticados.

Hero 1, fabricado pela Heatch Company, pode movimentar-se por uma sala por meio de comando computadorizado.

**Figura 12.3**

Robô Hero 1.



Possui um único braço articulado, que pode pegar objetos pequenos, sensor ultrassônico para detectar obstáculos e sons e sintetizador de voz.

O Androbot, chamado BOB (*brain on board*, cérebro sobre placa), foi projetado pela Nolan Bushell. É dotado de controle computadorizado, sintetizador de voz e três microprocessadores. Sua locomoção é possível porque é montado sobre um sistema de rodas.

**Figura 12.4**

Robô Androbot I.



A figura 12.5 retrata um androide feminino (robô experimental) com 1,58 m de altura e 43 quilos. Comparado a um ser humano normal, o androide anda com alguma dificuldade. Também é capaz de reproduzir algumas expressões faciais.

O robô humanoide foi feito pelo National Institute of Advanced Industrial Science and Technology. Sua saudação é:

“Olá a todos, sou humana cibernetica HRP-4C”.

**Figura 12.5**

Robô humanoide do National Institute of Advanced Industrial Science and Technology.



A robótica entrelaça tecnologias como a mecânica, eletrônica, computação, microeletrônica e inteligência artificial.

Existem pesquisas para desenvolvimento de robôs que atuem nas mais diversas áreas, como combate a incêndios, exploração submarina, mineração e até fabricação de outros robôs.

As máquinas robóticas podem ser classificadas segundo a aplicação, de acordo com a cadeia cinemática, quanto ao tipo de atuadores, quanto à anatomia etc.

O termo robô possui significado amplo que pode representar um veículo autônomo, um humanoide ou um simples braço com movimentos.

Em relação ao grau de interatividade com agentes externos, os robôs podem ser classificados em totalmente autônomos, programáveis, sequenciais ou inteligentes.

## 12.5 Gerações de robôs

Os robôs também podem ter uma classificação cronológica. Com o avanço da tecnologia permitindo o desenvolvimento de várias estruturas, apareceu a necessidade de classificar os robôs de acordo com a época de sua criação, situando-os no tempo.

**Primeira geração** – Os robôs são dotados apenas de sensores, operam em um ambiente estruturado e possuem sequência de operação fixa, o que permite que executem sempre a mesma tarefa. Exemplo: “braços” para coleta de amostras submarinas.

As figuras 12.6 e 12.7 são exemplos de robôs com aplicação submarina atual.

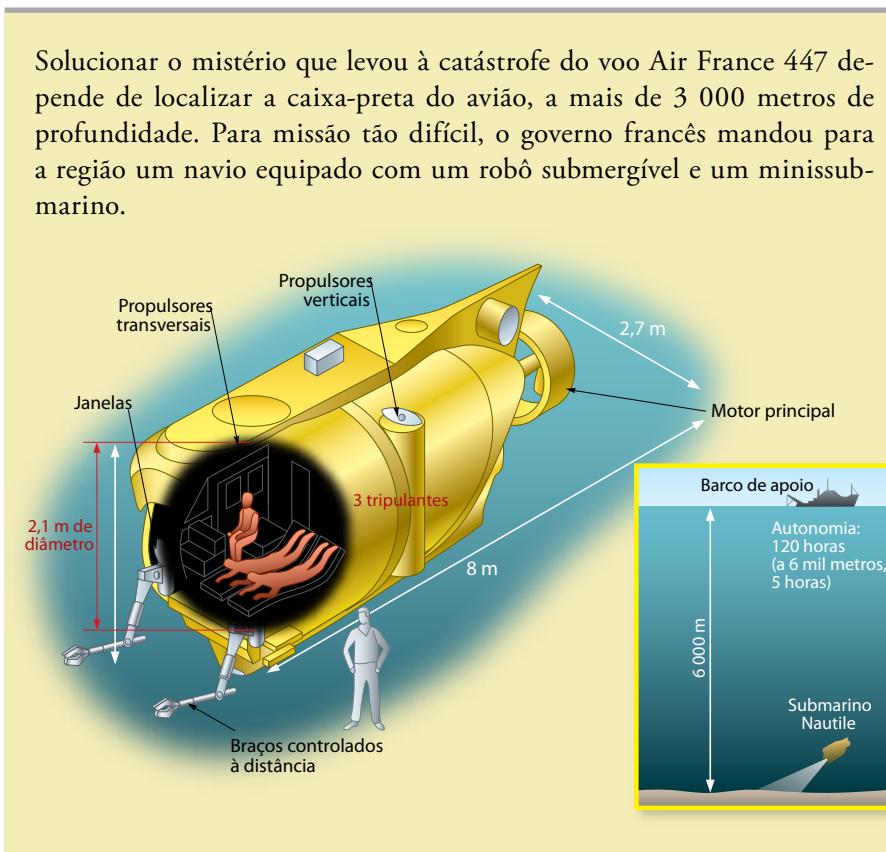
**Figura 12.6**

O robô submarino Victor 6000.



**Figura 12.7**

Com capacidade para três pessoas, o submarino Nautile já explorou o Titanic.



**Segunda geração** – São robôs dotados com sensores internos e externos para que percebam o ambiente; possuem atuadores pneumáticos, hidráulicos ou elétricos. Exemplo: manipuladores (ver figura 12.8).

**Figura 12.8**

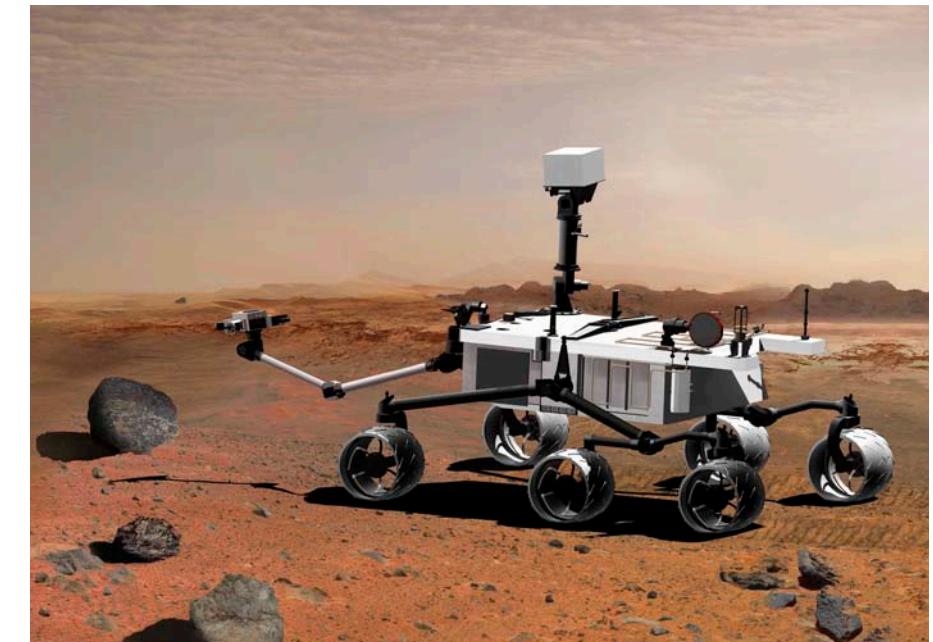
Robô manipulador de objetos.



**Terceira geração** – Os robôs fazem uso intensivo de sensores, de algoritmos de percepção e de controle inteligente. O robô de terceira geração comunica-se com outras máquinas, toma decisões autônomas diante de situações não previstas e atua em ambiente não completamente estruturado. Exemplo: robôs utilizados em missões espaciais, ou exploradores (ver exemplo na figura 12.9).

**Figura 12.9**

Robô utilizado em missão espacial.



Um helicóptero dotado de controle totalmente autônomo, capaz de voar de forma inteligente, desviando de obstáculos e calculando em tempo real a rota, em função de um destino previamente programado que será seguido até chegar a seu destino. Esse projeto foi apresentado pelo MIT (Massachusetts Institute of Technology) no concurso de robótica aérea (AUVSI).

O pequeno helicóptero tem um sistema de câmeras e scanner a laser responsáveis pela análise do ambiente, determinando o melhor lugar para se movimentar, sem bater em objetos. Ele é capaz de entrar em uma janela para chegar até seu destino e desviar de obstáculos.

## 12.6 Robôs na agricultura

Futuramente, robôs agrícolas deverão fazer colheita de frutas de forma autônoma.

Um grupo de agricultores dos Estados Unidos enxergou a robótica como alternativa em suas plantações durante a colheita. A empresa Vision Robotics foi

encarregada de desenvolver robôs para a colheita de frutas e desenvolveu o robô-aspirador Roomba.

Os engenheiros dividiram a tarefa da colheita de frutas para dois robôs. O primeiro localiza, por meio de um sistema de visão artificial, as frutas e transmite ao segundo as coordenadas para a coleta de cada fruta de maneira precisa. Dotado de um sistema de visão artificial que rastreia a plantação, o robô constrói um mapa tridimensional com a localização e o tamanho de cada fruta, calculando a melhor sequência para a colheita. A informação é transmitida para o segundo robô, dotado de oito braços, como um polvo, que tem a função de colher os frutos.

## 12.7 Robôs nas minas e na construção civil

**Figura 12.10**

Exemplos de elementos robotizados em maquinário pesado para demolição.



A figura 12.10 apresenta duas máquinas pesadas para demolição, utilizadas na construção civil da fabricante Brokk.

Como exemplo adicional de aplicação, é possível citar os robôs Brokk para mineração, concebidos para realizar tarefas sob as condições adversas e para facilitar os trabalhos em minas, onde é necessário movimentar-se com precisão em espaços relativamente reduzidos com o máximo de cuidado e com segurança.

Nesse tipo de robôs, os braços articulados chegam a qualquer canto, reduzindo o deslocamento necessário e aumentando o rendimento de cada parada. A precisão dos movimentos permite que se alcance a mesma sensibilidade das ferramentas manuais.

## 12.8 Micromanipulador

O micromanipulador, por suas características construtivas, auxiliará a construir micromáquinas e microfábricas.

Manipular coisas sempre foi uma necessidade da humanidade, desde o uso de pequenas ferramentas como as pinças até os grandes braços robóticos. No microcosmo que começa a ser explorado pela ciência, por meio da nanotecnologia, as necessidades de manipulação se repetem.

Futuras máquinas microscópicas, por suas estruturas, necessitarão de microferramentas como micropinças, microalicates e micromanipuladores robóticos para serem montadas com precisão e destreza.

Então, há necessidade dos micromanipuladores. Pesquisadores da Universidade de Illinois, Estados Unidos, desenvolveram uma estação de micromanipulação, medindo um centímetro quadrado. Em seu interior, estão minúsculos “dedos mecânicos”. No interior da minúscula estação de manipulação (parecida com um *chip* de computador e construída com a mesma técnica), os quatro “dedos mecânicos” capturam e movem partículas com precisão. São capazes de agarrar, segurar e mover peças microscópicas, conforme os comandos enviados pelo computador.

Os pesquisadores querem ampliar a quantidade de “dedos”, aprimorar seu desenho e aumentar a área na qual a manipulação ocorre e adicionar mais flexibilidade. Para melhorar sua precisão, algoritmos foram desenvolvidos a fim de que os “dedos flexíveis” pudessem ser coordenados de forma cooperativa, como os dedos da mão humana.

Eles planejam utilizar atuadores piezoelétricos para refinar o movimento dos dedos. Não se sabe quantas versões deverão ser construídas para que o micromanipulador possa chegar ao mercado. O equipamento até agora é o que mais se aproxima do conceito de microfábrica.

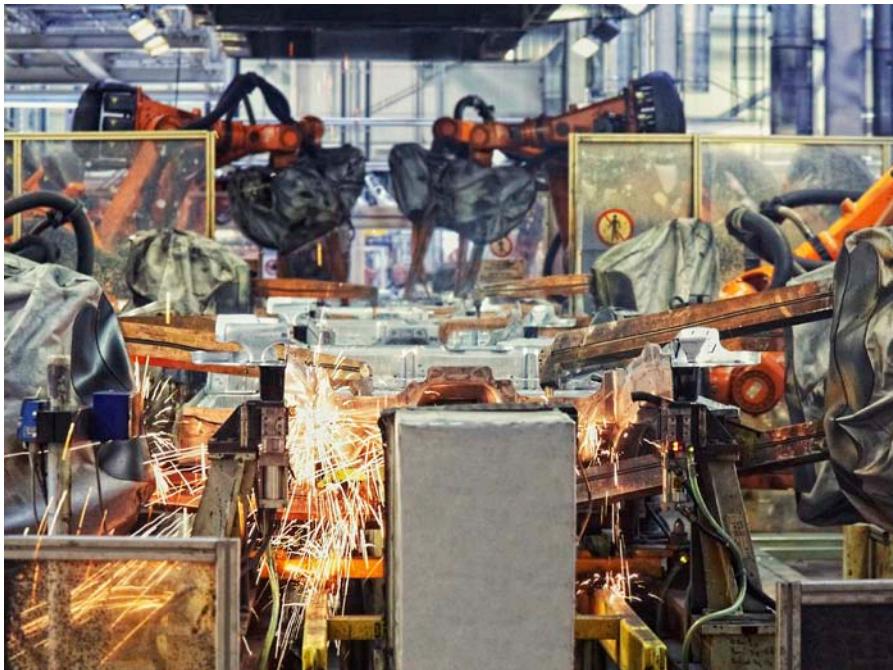
## 12.9 Robôs industriais

Os robôs industriais executam tarefas como empilhamento e empacotamento, montagem e desmontagem de materiais, medição e inspeção de peças, soldagem, aplicação de fluidos e pinturas.

É comum ver cenas como a da fotografia da figura 12.11.

**Figura 12.11**

Robôs para solda.



NATALYA HORA/SHUTTERSTOCK

A dimensão e a natureza da peça a ser manipulada influenciam na estrutura do robô. Peças pesadas exigem atuadores hidráulicos; peças delicadas necessitam de atuadores pneumáticos ou até ventosas (ver figura 12.12).

**Figura 12.12**

Robô de acionamento pneumático com ventosas.



MAXIMIAN STOCK LTD/SCIENCE PHOTO LIBRARY/BPL/CLLATIN/STOCK

## 12.10 Robô manipulador

Os manipuladores são robôs responsáveis por deslocar diversas peças, ferramentas, por sistemas de monitoramento de determinado processo, entre outras atividades.

O manipulador é composto de um circuito eletrônico computadorizado de controle e de um mecanismo articulado.

As características como anatomia, volume de trabalho, sistemas de acionamentos, sistema de controle, desempenho e precisão, programação, órgãos terminais e sensores são determinantes na escolha de um robô.

O braço robótico é composto basicamente de braço e pulso.

O braço consiste em elos unidos por juntas de movimento relativo, nos quais são acoplados os acionadores responsáveis pelos movimentos individuais. São dotados de capacidade sensorial instruídos por um sistema de controle. O braço é fixado à base, e o punho fixado ao braço. Na extremidade do punho, existe um órgão terminal, mão ou ferramenta, destinado a realizar o trabalho exigido pela aplicação.

O braço mecânico é um manipulador projetado para executar diferentes tarefas e ser capaz de repeti-las. Para realizar determinadas tarefas, o robô move partes, objetos, ferramentas e dispositivos especiais, segundo movimentos e pontos pré-programados.

O computador possui um programa armazenado em sua memória com dados sobre a trajetória que o braço robótico seguirá. A execução do programa permite ao computador enviar sinais, ativando e desativando motores que movem o braço robótico e a carga.

Os aspectos mais importantes do funcionamento de um braço mecânico são o sensoreamento do ambiente e a programação do robô.

Outros fatores, como o *layout* da linha de produção e a geometria da máquina, também devem ser considerados na escolha do robô.

O tipo mais conhecido de robô manipulador é o braço mecânico. Constituído de corpos rígidos interligados por juntas que permitem um movimento relativo entre eles, assemelha-se à forma de um braço humano e, às vezes, quase com as mesmas possibilidades de movimento.

Alguns manipuladores são controlados pelo operador. O movimento do operador é transmitido diretamente de forma mecânica, elétrica ou hidráulica.

A função de um robô manipulador é diminuir os custos da produção, oferecendo melhor acessibilidade à peça em um tempo de manobra menor.

O investimento é relativamente alto, mas, em termos econômicos, torna-se viável na maioria dos casos.

## 12.11 Como os robôs se movimentam

Circuitos de potência comandados pelo controlador são responsáveis pelo acionamento dos atuadores que realizam os movimentos. Esses atuadores estão listados a seguir.

Os atuadores são elementos responsáveis pela ação, isto é, pela conversão da energia disponível nos processos pneumáticos, hidráulicos e elétricos em energia mecânica para movimentar o robô. Podem ser pneumáticos, hidráulicos ou elétricos.

**Pneumáticos** – São baratos, leves, produzem movimentos rápidos; entretanto, têm baixa precisão.

**Hidráulicos** – Utilizam um fluido à pressão para realizar os movimentos programados. São mais fortes, mas mais caros. Não são precisos quando o fluido muda de temperatura, porém, têm grande potência.

**Elétricos** – Transformam a energia elétrica em movimentos para executar suas tarefas. São rápidos e precisos.

Os acionadores elétricos mais utilizados na robótica são: motor de corrente contínua ou DC, servomotor e motor de passo. Não propiciam muita velocidade ou potência, quando comparados aos hidráulicos, porém, são mais precisos.

Dotados de redutores, são capazes de reduzir a velocidade e aumentar o torque.

Esses acionadores podem ser utilizados em juntas prismáticas, transformando o movimento rotativo do motor em movimento linear por meio de um fuso.

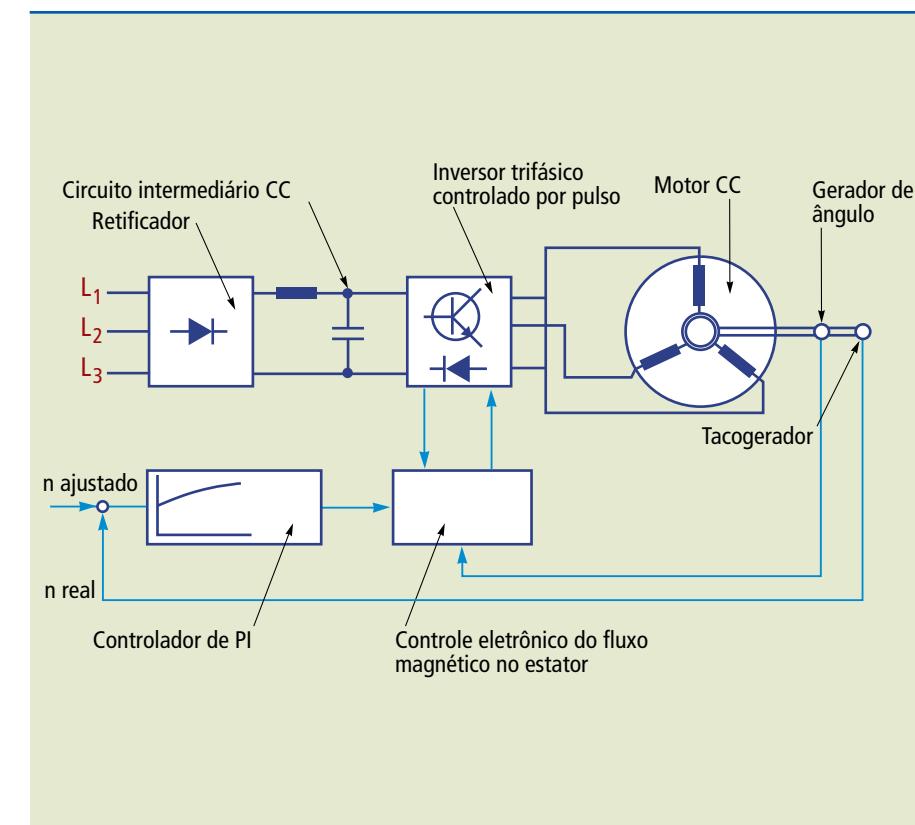
O custo cresce quando o torque necessário para acionar o braço mecânico aumenta, e o tamanho do motor é praticamente proporcional ao binário produzido.

Segundo estudos, o acionamento elétrico é economicamente mais vantajoso quando se trata de braços robóticos de médio e pequeno porte. Para braços de grande porte, o custo se eleva rapidamente em função da potência do motor; o acionamento hidráulico é indicado quando se trata de gerar elevadas potências para o movimento de cargas.

**Servomotores** – São compostos pela associação de um motor DC, um redutor de velocidades, um sensor de posição e um sistema de controle realimentado (ver figura 12.13).

Esses motores apresentam como característica o posicionamento angular. Por essa razão, são considerados motores comandados em posição angular ou linear. Possuem dimensões pequenas e têm ampla variação de torques.

O mecanismo de posicionamento ajusta as posições angulares por meio de um sinal codificado que lhe é enviado. Enquanto esse código estiver ativado, o servo vai manter sua posição angular. Esse sinal é, em geral, do tipo PWM (*pulse width modulation*).



**Figura 12.13**  
Ajuste de velocidade de um servomotor CC através de campo giratório dependente do ângulo.

**Motores de passo** – Por suas características de posicionamento angular são usados em serviços leves. Em geral, possuem precisão da ordem de grau e têm condição de giro horário ou anti-horário com torque relativamente baixo.

Os movimentos são variações incrementais de precisão angular, possibilitando a repetição de movimentos com grande precisão.

Esse tipo de motor requer um circuito de controle digital para a geração da sequência de operação. Esses motores podem ser bipolares ou unipolares. As fontes de tensão para a alimentação são contínuas com o fornecimento de uma corrente contínua para um sistema *drive* de potência, que recebe o sinal de um circuito de controle e produz a sequência necessária para executar o movimento na direção desejada.

Existem aplicações em que o torque é mais importante; em outras, a precisão ou a velocidade são mais relevantes. Algumas características de funcionamento, como a tensão de alimentação, a máxima corrente elétrica suportada nas bobinas, o grau e o torque são decisivos na escolha dos motores de passo. Ver a estrutura de um robô industrial típico na figura 12.14.

**Figura 12.14**

Robô industrial.



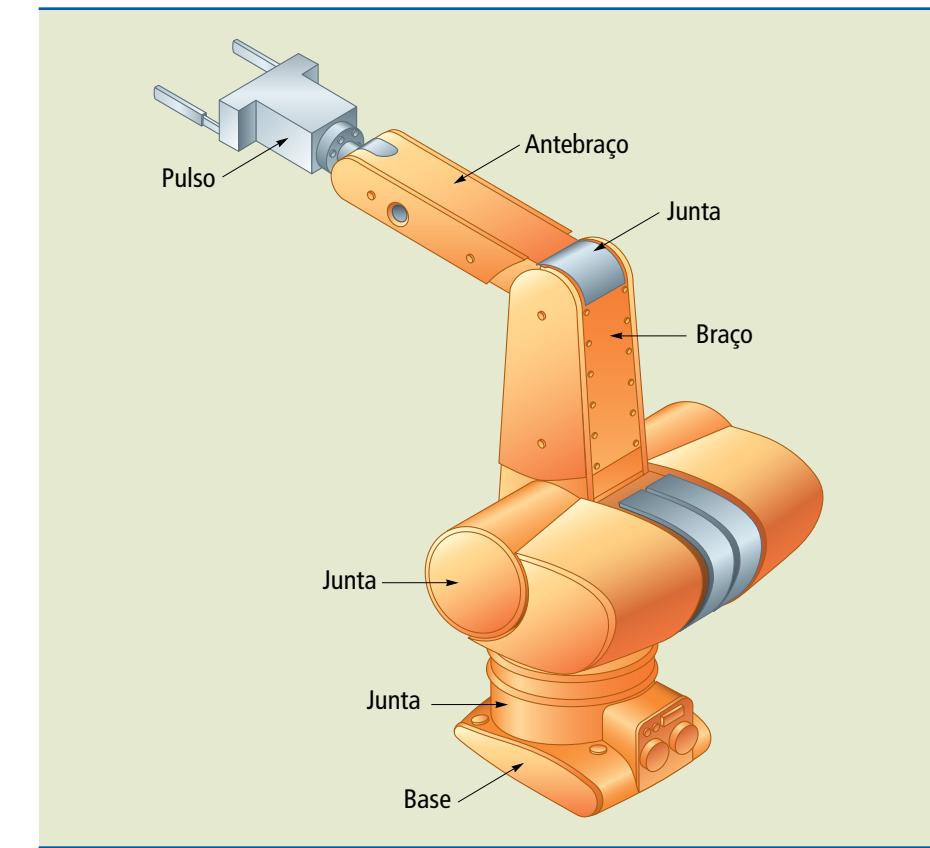
## 12.12 Estrutura do robô

Como explicado anteriormente, os robôs industriais são projetados para realizar trabalho produtivo deslocando o objeto a ser manipulado.

O robô manipulador tem estrutura que consiste em uma série de corpos rígidos, em geral de um material resistente como aço, que são os elos ou *links*. Esses elos são unidos por juntas (articulações) que permitem o movimento relativo entre eles.

Os manipuladores normalmente estão montados sobre uma base fixa. Essa base robótica pode estar montada sobre uma superfície também fixa, ou em um veículo que pode ser automatizado ou não, o que permite deslocamento pelo local de trabalho.

O ponto extremo do braço robótico é conhecido com o nome de pulso e é o local de fixação do atuador. Nos braços mecânicos, ele se assemelha à mão no extremo do antebraço. Ver as partes principais de um braço robótico no esquema apresentado na figura 12.15.



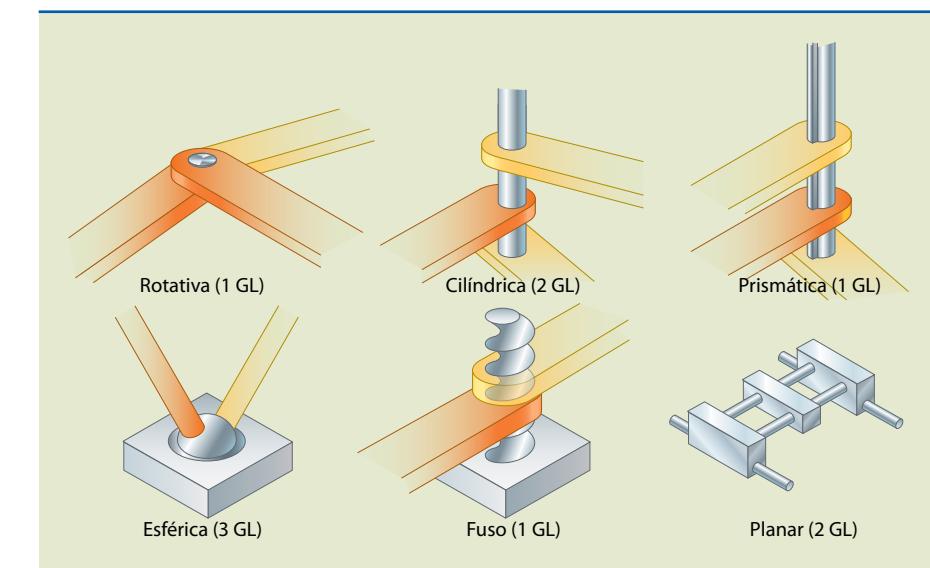
### Tipos de juntas

Juntas são as articulações entre as diferentes partes motrizes.

O movimento pode ser de giro ou linear. Quando é de giro, a junta chama-se rotacional, rotativa ou de revolução. Quando é linear, a junta é chamada prismática ou linear. Ver figura 12.16 com os tipos mais comuns de juntas.

**Figura 12.15**

Braço robótico.

**Figura 12.16**

Tipos de juntas.

## 12.13 Sensoreamento

Para que os robôs tenham bom desempenho, suas habilidades sensoriais devem ser parecidas com as dos seres humanos e aproximadas a elas.

O sensor é o elemento básico e comum em qualquer processo de automação, principalmente industrial. Ele possibilita, ao sistema, a coleta de informações do ambiente ou de um processo, necessárias para a execução de determinada tarefa.

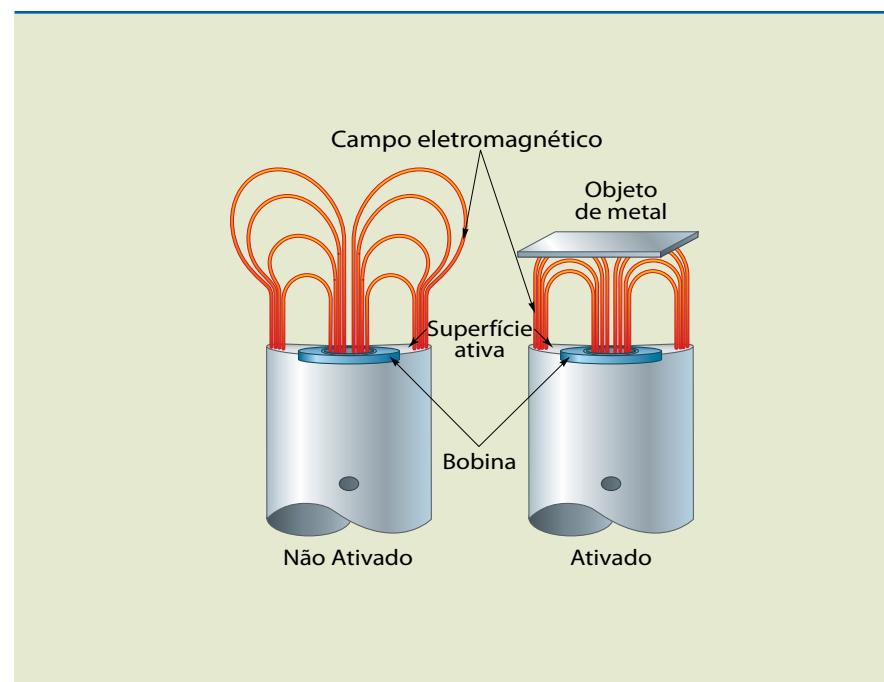
É um dispositivo capaz de detectar eventos, fazer leituras, determinar posicionamentos etc.; para isso, utiliza variados métodos e técnicas.

### Tipos de sensores utilizados na automação industrial

#### Sensor indutivo

**Figura 12.17**

Sensor indutivo



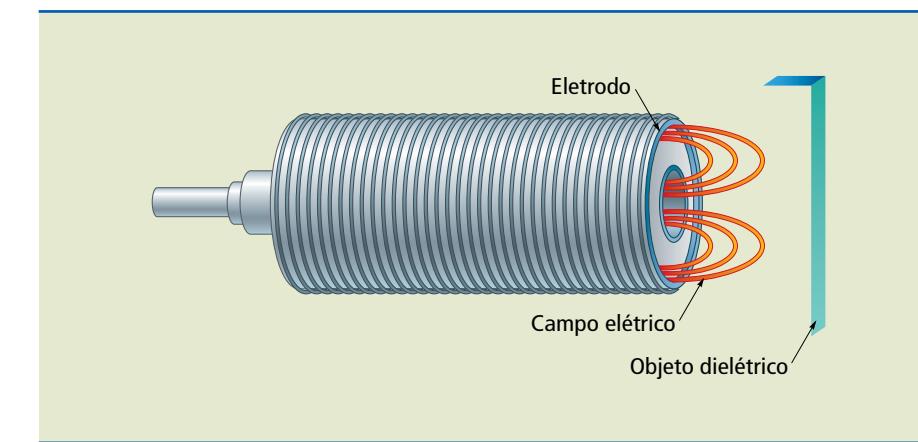
O sensor indutivo (figura 12.17) é elemento capaz de detectar a presença, ou não, de um objeto metálico ou condutor pelo campo magnético que produz. Essa detecção acontece quando o objeto estiver a determinada distância de sua face, por seu princípio de funcionamento.

O sensor indutivo gera um campo eletromagnético de alta frequência, por causa de uma bobina ressonante instalada na face sensora. Essa bobina faz parte de um circuito oscilador que produz um sinal senoidal. Quando um metal é introduzido no campo magnético da bobina, as linhas magnéticas sobre a superfície do metal têm velocidades diferentes das linhas no ar, o que provoca um efeito que reduz a amplitude do sinal gerado no oscilador. Esse sinal, então, é comparado com um nível e dispara um alarme quando essa variação acontece.

A parte metálica não precisa estar em contato com a bobina para ser detectada, basta se aproximar dela. Portanto, o sensor é chamado sensor de proximidade e, por não ter contato mecânico, o sistema tem baixa manutenção e alta vida útil. A velocidade de detecção é bastante alta, pois a inércia do sistema é praticamente desprezível.

#### Sensor capacitivo

O sensor capacitivo (figura 12.18), ao contrário do indutivo, funciona segundo um campo elétrico e é ideal para detectar materiais não condutores (líquidos, plásticos, vidros, entre outros).



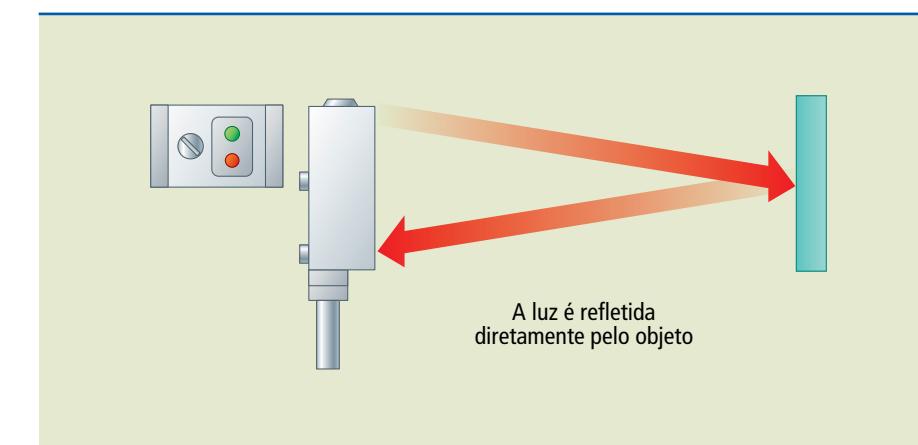
A detecção do objeto não condutor ocorre segundo uma variação da capacitação do sensor.

Como sabemos, o ar e os dielétricos possuem permeabilidade elétricas diferentes. Quando o dielétrico (não condutor) se aproxima do sensor, interrompe o campo elétrico, aumentando a capacitação. Um circuito oscilador que detecta essa variação aciona um comando informando que houve uma detecção.

#### Sensor óptico difuso

**Figura 12.18**

Sensor capacitivo.



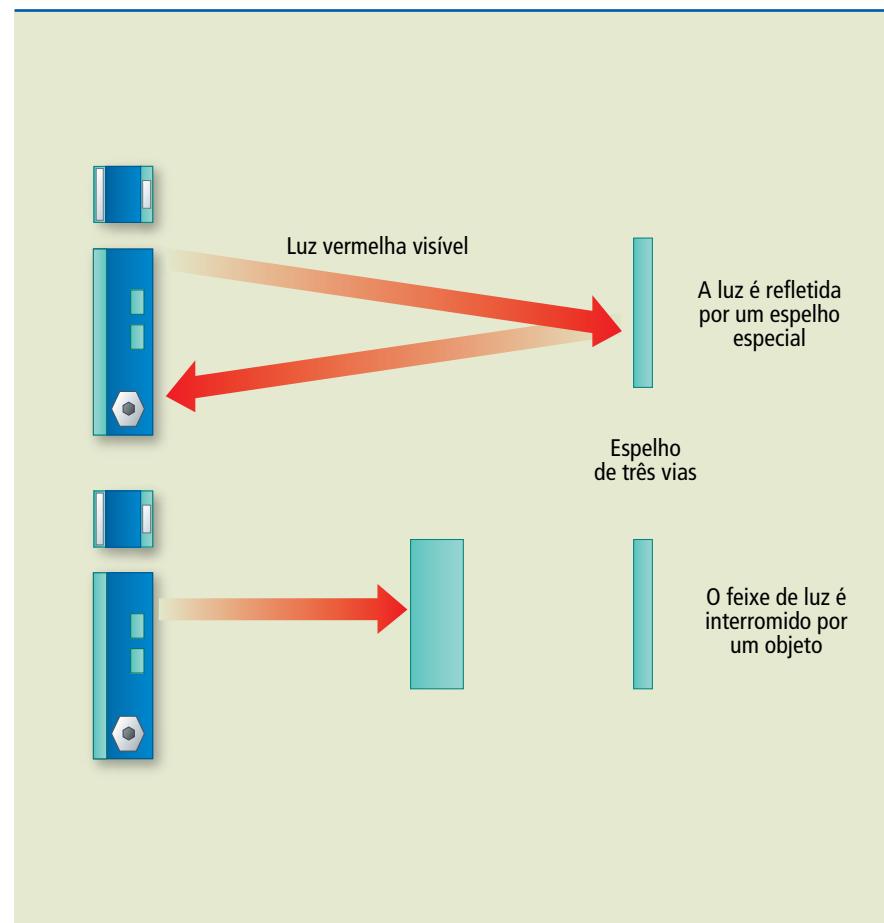
**Figura 12.19**

Sensor óptico difuso.

Nesse sensor (figura 12.20), o transmissor e o receptor são montados em uma mesma unidade. Ele inicia seu funcionamento quando o objeto a ser detectado entra na região de sensibilidade e reflete para o receptor o feixe de luz emitido pelo transmissor.

#### Sensor óptico reflexivo

**Figura 12.20**  
Sensor óptico reflexivo.



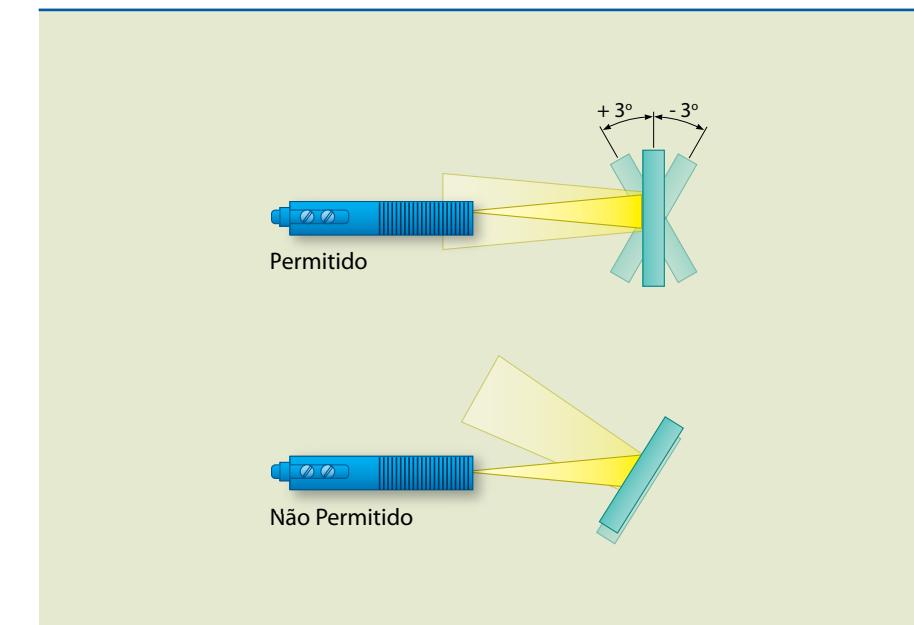
O sensor óptico reflexivo (figura 12.20), assim como o difuso, também tem o transmissor e o receptor montados em uma única unidade. O feixe de luz chega ao receptor após a incidência em um espelho. Quando esse feixe é interrompido por um objeto, o acionamento ocorre.

#### Barreira de luz

Esse sensor é montado em duas unidades distintas: uma transmissora e outra receptora. Cada unidade fica de um lado da trajetória do objeto-alvo, uma vez que o objeto interrompe o feixe, e o sensor é ativado.

Nas máquinas industriais de corte, prensas etc., em que os operadores manipulam objetos com a mão, as barreiras de luz têm muita utilização na promoção da segurança do operador.

#### Sensor ultrassônico



**Figura 12.21**  
Sensor ultrassônico.

O sensor ultrassônico (figura 12.11) é composto de um emissor e um receptor. O emissor emite pulsos cíclicos ultrassônicos que, quando incidem sobre uma superfície, refletem retornando ao receptor. A recepção do sinal implica a existência do objeto.

Os sensores ultrassônicos podem ser montados na mesma unidade. O emissor emite o sinal, e será necessário que haja uma reflexão (eco) do ultrassom de modo a ativar o receptor.

Em geral, esse tipo de sensor permite uma inclinação de mais ou menos 3º em relação ao eixo do perpendicular da emissão.

## 12.14 Dispositivos de entrada para manipuladores

Para programar um robô, podem ser usados vários tipos de dispositivos de entrada, como *joystick*, *mouse*, teclado, luvas especiais e outros. Esses dispositivos são meios de interação homem-máquina. Os sinais de entrada são enviados ao sistema de controle, e este transmite os sinais para os acionadores, que, por sua vez, realizam os movimentos dos manipuladores.

## 12.15 Sistema de controle

Qualquer robô tem seu sistema de controle realizado por um sistema de *software* e *hardware* que processa os sinais de entrada e os converte em ação conforme a programação.

Um computador pessoal ou um microcontrolador pode ser usado para armazenar o *software*.

Quando se escolhe usar um microcontrolador, deve-se ter em mente que ele reduz o custo do projeto, é rápido, dedica-se apenas ao controle do robô, mas que é limitado em relação ao tamanho do *software*.

O computador pessoal possui alta taxa de processamento e mais memória para a alocação do *software*.

Temos também como alternativa a solução mista. Nesta, a parte mais leve do *software* será executada no microcontrolador e a que exige maior esforço computacional será processada no computador.

O sistema de *hardware* pode ser constituído de motores de passo, atuadores, cabos, dispositivo de entrada e de saída, sensores e amplificadores de potência. Os sensores podem ser usados como dispositivos em um sistema de malha fechada, que consiste em verificar o estado momentâneo do dispositivo a ser controlado, comparar e corrigir a medida até se chegar a um valor pré-definido. Essa comparação resultará em um erro, que é ajustado pelo sistema de controle até ser reduzido a zero.

O quadro 12.1 representa um resumo de controladores de um robô.

**Quadro 12.1**

Subsistema e subfunções do controlador de um robô

Subsistema	Subfunção
Computador	Interpreta o programa de controle.
	Coordena todos os movimentos do eixo do robô.
Painel de controle	Facilita o estabelecimento de todos os modos de operação.
	Ativa e desativa o robô.
	Apresenta as condições operacionais.
Controlador de posição	Mantém os eixos individuais do robô em uma posição específica.
Amplificador de acionamento	Fornece alimentação aos motores acionadores.
	Monitora a velocidade dos eixos do robô.
Unidade de entrada e de saída	Comuta as saídas.
	Recebe mensagens na forma de sinal.
Dispositivo de controle manual	Permite ao usuário a movimentação manual do robô.

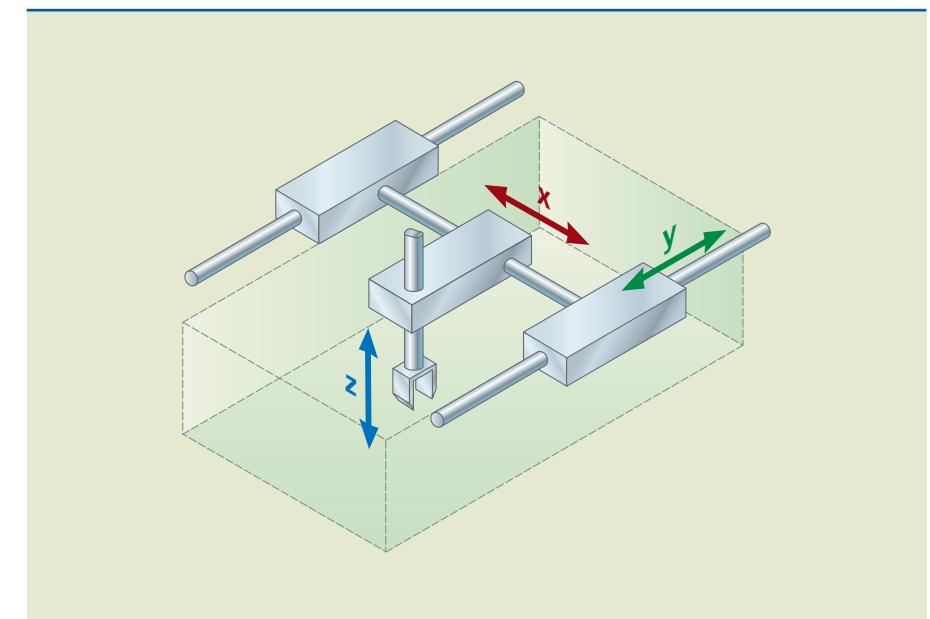
(Apostila Festo Didatic.)

## 12.16 Robô cartesiano



**Figura 12.22**  
Robô cartesiano.

**Figura 12.23**  
Esquema de robô cartesiano.



Nas figuras 12.22 e 12.23 podem ser vistos robôs cartesianos. Nestes, a combinação de três eixos é responsável para fazer manipulação de peças de um lado para outro. Uma garra é necessária para que a peça possa ser transportada; entretanto, nessas condições, a peça não pode ser rotacionada.

Nos casos em que a garra do robô é substituída por uma ferramenta, a área de atuação dessa ferramenta é chamada espaço secundário.

Robôs cartesianos são adequados para carga e descarga de peças de uma estação de trabalho e para encaminhá-las a outra. Normalmente, são encontrados executando trabalho de paletização e comissionamento de produtos.

## 12.17 Robô SCARA

Tem como característica o tamanho compacto, grande precisão e repetibilidade. Tais características fazem desses robôs exímios montadores, e os tornam próprios para montagem mecânica ou eletrônica que exigem alta precisão.

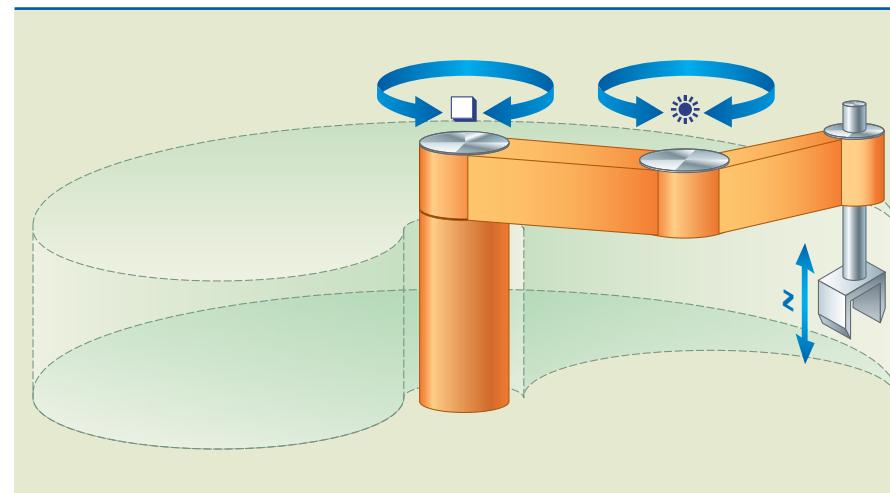
A estrutura de movimento está baseada em duas juntas rotativas e uma junta linear, e o braço que atua sempre na vertical, descrevendo um volume de trabalho cilíndrico.

Como o braço utiliza juntas rotativas, é considerado articulado. O nome SCARA é proveniente do inglês *selective compliance assembly robot arm*, em português, braço robótico de montagem com complacência seletiva (ver figuras 12.24 e 12.25).

**Figura 12.24**

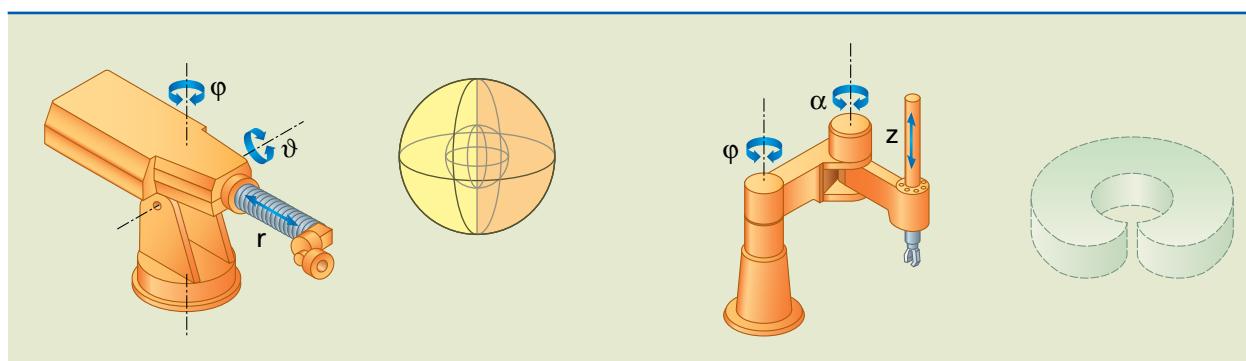
Robô SCARA com duas articulações rotacionais e uma prismática (RRP).

Destinado a trabalhos de simples manipulação sobre uma superfície plana (montagem de peças, inserção de componentes, empacotamento).



**Figura 12.25**

Diagrama de robô SCARA.



## 12.17.1 Robô com braço articulado

São formados por vários eixos giratórios, fato que produz um espaço operacional mais amplo denominado espaço operacional esférico (ver figura 12.26).



**Figura 12.26**

Exemplo de robô com braço articulado.

Os robôs com braço articulado possuem elevado grau de mobilidade e são adequados para tarefas que exigem movimentos mais complexos. São encontrados frequentemente em indústrias automobilísticas executando operações de solda, montagem e medições.

Em aplicações mais complexas, que exijam espaço operacional ampliado, é comum a utilização de um eixo linear auxiliar no qual o robô possa se movimentar na frente de várias estações de trabalho.

## 12.18 Graus de liberdade

A posição e a orientação de uma peça em uma unidade de processamento pode ser alternada por seis movimentos básicos, a saber: três movimentos de rotação e três movimentos lineares. A cada uma dessas possibilidades chamamos grau de liberdade (GL).

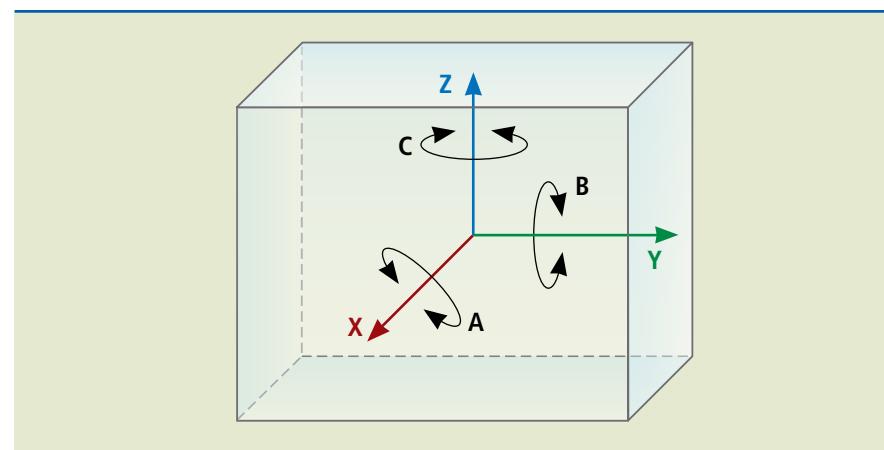
Em outras palavras, os GL determinam os movimentos do braço robótico no espaço 2D ou 3D.

Para calcularmos o grau de liberdade do robô, somamos os graus de liberdade de suas juntas. O número de graus de liberdade de uma junta é dado pelo número

de eixos que permitem os movimentos. Por exemplo, quando o movimento relativo ocorre em um único eixo, temos grau de liberdade igual a 1; caso o movimento seja possível em mais de um eixo, a junta tem 2 graus de liberdade. Assim podemos concluir que quanto maior o GL, mais complicada será a cinemática, a dinâmica e o controle do manipulador. Ver, na figura 12.27, os seis graus de liberdade possíveis.

**Figura 12.27**

Três graus de liberdade para posicionamento das peças, em que A, B e C são graus de liberdade para a rotação da peça, e X, Y e Z, para a translação.

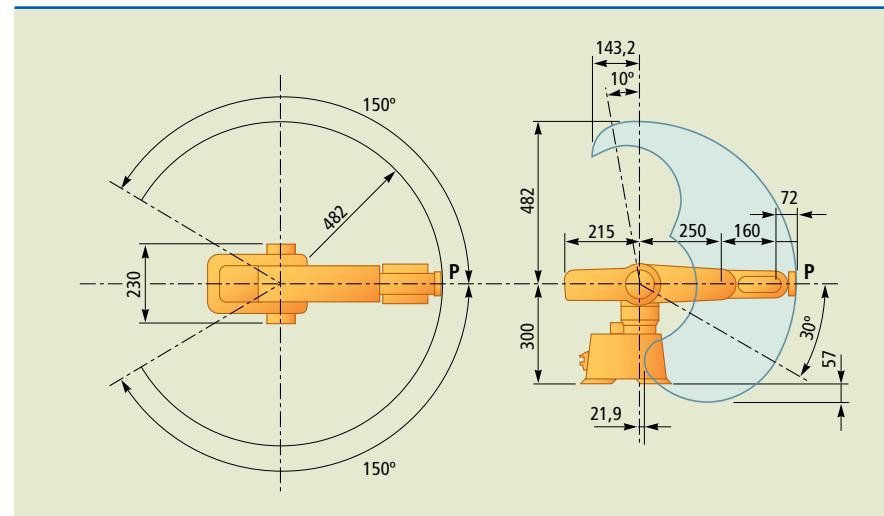


### 12.18.1 Espaço operacional

O espaço operacional é o lugar geométrico delimitado por todas as posições possíveis para um robô. Para um robô como o indicado na figura 12.28, o espaço operacional é indicado por linhas que o delimitam. O estudo do espaço operacional deve ser executado com cuidado para se evitar choques com máquinas e/ou operadores.

**Figura 12.28**

Espaço operacional do robô RV-M1 Mitsubishi com cinco graus de liberdade rotacionais.



### 12.19 Programação de robôs

Braços mecânicos podem ser programados de diversas formas, cada uma específica para um tipo de braço robótico.

O manipulador manual, como o nome sugere, requer a intervenção do homem para sua operação, guiando manualmente a máquina que multiplica a força.

Já nos robôs sequenciais, a sequência é fixa, definida pelo fabricante e inacessível para o usuário, mas pode ser também variável, conforme as necessidades dos usuários.

Nos robôs de aprendizagem, o trajeto ou sequência é programado guiando-o manualmente pelo caminho que deverá seguir, como se estivesse ensinando o caminho.

E, finalmente, o robô inteligente é capaz de mudar as condições de trabalho e posicionamento, conforme os estímulos provenientes de sensores.

O desempenho dinâmico do braço robótico está associado à velocidade de resposta, à estabilidade e à precisão. Ou seja, é a capacidade de mover-se de um lugar para outro em um curto período de tempo com estabilidade. A estabilidade é o tempo necessário para amortecer as oscilações que ocorrem durante o movimento de uma posição para a outra.

Quando a estabilidade do robô for baixa, podemos aplicar elementos de amortecimento no braço, mas isso influencia na velocidade de resposta.

A precisão de movimento está relacionada com a resolução espacial, a precisão e a repetibilidade, sendo a primeira dependente diretamente do controle de sistema e das inexatidões mecânicas do braço robótico. O sistema de controle é responsável por controlar todos os incrementos das articulações. A qualidade dos componentes que formam as uniões entre as articulações, assim como as folgas nas engrenagens, tensões nas polias e histereses mecânicas e magnéticas são fatores que influenciam na precisão do robô.

A precisão de um braço robótico tem relação com a resolução espacial, pois, para atingir determinado ponto do espaço de atuação, depende dos incrementos que as juntas permitem realizar.

Já a repetibilidade está relacionada com a capacidade do robô de se posicionar sempre no mesmo ponto exato. Os movimentos sofrem influências de folgas mecânicas, das limitações do sistema de controle, entre outros, contribuindo para que a posição se altere a cada nova tentativa de alcançar a posição de parada ou operação.

Um grande problema dos braços robóticos é que as características de acionadores com as propriedades exatas de velocidade-torque ou de velocidade-força não estão disponíveis no mercado, na mesma proporção da necessidade dos braços robóticos.

Para a transmissão de potência, utilizamos as correias e polias, correntes e rodas dentadas, engrenagens e eixos de transmissão.

A resolução do controle em cada uma das juntas será somada, e seu resultado determina a precisão do braço para executar determinado trabalho.

# Glossário

---



**ADITIVO** – é um elemento químico que, adicionado ao óleo, melhora as características do mesmo. Os aditivos são inibidores de corrosão, antioxidantes, detergentes, aditivos EP (extrema pressão), antiespumantes, emulgentes, abaixadores do ponto de congelamento, etc.

**ALETAS** – são superfícies cuja função é aumentar a área de transferência de calor.

**ALTO-FORNO** – equipamento siderúrgico de tamanho variável, externamente revestido por metal e internamente com material refratário, onde é fundido o minério de ferro, que assim é transformado em ferro-gusa.

**ÁGUA DESMINERALIZADA** – água que tem todos os sais minerais removidos, sendo própria para ser utilizada em processos químicos ou para alimentar caldeiras.

**CALOR** – é a energia que se transfere; surge quando há diferença de temperatura.

**CALOR ESPECÍFICO** – calor específico é uma grandeza física que define a variação térmica de determinada substância ao receber determinada quantidade de calor; sua unidade no SI é J/kg.K.

**CALORIA** – unidade de medida de energia, especialmente de energia térmica; equivale a 4,18684 J.

**CAPACITÂNCIA** – é a grandeza elétrica de um capacitor, determinada pela quantidade de energia elétrica que pode ser armazenada nele por uma determinada tensão e pela quantidade de corrente alternada que o atravessa numa determinada frequência.

**CIRCUITO INTEGRADO** – os circuitos integrados são circuitos eletrônicos funcionais, constituídos por um conjunto de transistores, diodos, resistências e condensadores, fabricados num mesmo processo, sobre uma substância comum semicondutora de silício que se designa normalmente por chip.

**CIRCUITOS LÓGICOS** – os circuitos lógicos têm como base operações lógicas estudadas na Álgebra de George Boole (matemático inglês – 1815-1864). Todas as operações de um computador são operações aritméticas e lógicas básicas, como somar, completar, comparar e mover bits. Elas são usadas para controlar a maneira como o processador trata os dados, acessa a memória e gera resultados. Essas funções são realizadas por circuitos eletrônicos, ou seja, pelos circuitos lógicos. Um computador não é mais que um aglomerado de circuitos lógicos.

**COMBUSTÍVEL** – substância que queima na presença de um comburente; como exemplos de combustíveis, temos os combustíveis fósseis mais utilizados, como o carvão, o petróleo e o gás natural.

**DIELÉTRICO** – é uma substância que possui alta resistência ao fluxo da corrente elétrica.

**DIN** – significa Deutsches Institut für Normung; é a norma alemã na ISO desde 1951.

**ENERGIA INTERNA** – é a soma das energias cinéticas dos átomos e moléculas que se encontram no interior de um sistema e das energias potenciais moleculares associadas às suas mútuas interações, isto é, é a energia total contida num sistema fechado. Seu símbolo é U.

**FISSÃO** – é a quebra do núcleo de um átomo instável em dois menores e mais leves. Esse processo pode ser rotineiramente observado em usinas nucleares.

**FLUIDO TÉRMICO** – é um fluido utilizado para transferência de calor de um sistema para outro.

**FONTE CHAVEADA** – é uma unidade de fonte de alimentação eletrônica que incorpora um regulador chaveado, ou seja, um circuito controlador interno que chaveia a corrente, ligando e desligando rapidamente, de forma a manter uma tensão de saída estabilizada.

**HARDWARE** – é a parte física do computador, ou seja, o conjunto de componentes eletrônicos, circuitos integrados e placas que se comunicam através de barramentos.

**ISO** – é a sigla de Organização Internacional para Padronização (em inglês: International Organization for Standardization, em francês: L'Organisation internationale de normalisation). É uma entidade que representa os grêmios de padronização/normalização de 158 países. Fundada em 23 de fevereiro de 1947, em Genebra, Suíça, a ISO aprova normas internacionais em todos os campos técnicos, exceto na eletricidade e eletrônica, cuja responsabilidade é da International Electrotechnical Commission (IEC).

**JOULE** – unidade de energia no sistema internacional de unidades (SI); seu símbolo é J.

**LÍQUIDO VOLÁTIL** – líquido que apresenta pressão de vapor muito baixa.

**MÁQUINA TÉRMICA** – máquina que realiza trabalho e lida com a variação de temperatura; normalmente, a máquina térmica retira calor da fonte quente e transfere-o para a fonte fria, o que define sua eficiência.

**MASSA MOLAR** – quociente entre a massa de uma substância e a correspondente quantidade de matéria; sua unidade é kg/mol.

**MKS** – é um sistema de unidades de medidas físicas, ou sistema dimensional, de tipologia LMT (comprimento, massa, tempo), cujas unidades-base são o metro para o comprimento, o quilograma para a massa e o segundo para o tempo.

**MICROCONTROLADOR (*microcontroller*)** também conhecido como MCU – é um chip que em seu invólucro aloja um computador contendo processador,

memória e funções de entrada e saída. É um microprocessador que prioriza alta integração, em contraste com outros microprocessadores de propósito geral (como os utilizados nos PCs). Relacionando os elementos usuais de lógica e aritmética dos microprocessadores convencionais, o microcontrolador integra elementos adicionais em sua estrutura interna, como memória de leitura e escrita para armazenamento de dados, memória somente de leitura para armazenamento de programa, EEPROM para armazenamento permanente de dados, dispositivos periféricos como conversores analógico-digitais (ADC), conversores digitais-analógicos (DAC) em alguns casos, e interfaces de entrada e saída de dados. Com uma velocidade de clock em geral na casa de poucos MHz (Megahertz), os microcontroladores operam a uma frequência muito baixa se comparados com os microprocessadores atuais, no entanto, são adequados para a maioria das aplicações usuais como, por exemplo, controlar uma máquina de lavar roupas ou uma esteira de chão de fábrica. O desenvolvimento do programa geralmente é feito através de *cross compilers* em linguagem nativa de máquina (*assembly*) ou em linguagem de alto nível como C, Pascal, Basic.

**MOL** – quantidade de matéria de um sistema contendo tantas entidades elementares quantos os átomos que existem em 0,012 kg de carbono 12.

**NEMA** – National Electrical Manufacturers Association ou NEMA é uma associação baseada nos EUA, que foi criada em 1926, pela fusão da Associated Manufacturers of Electrical Supplies e do Electric Power Club. Tem a sua sede em Rosslyn, Virginia; esta associação define muitos padrões usados por seus associados em produtos elétricos.

**PASCAL** – unidade de medida de pressão no SI, seu símbolo é Pa; equivale a 1 N/m<sup>2</sup>.

**PROTOCOLO DE REDE** – é a linguagem usada para a comunicação entre um computador e outro.

**RELÉS** – os relés são componentes eletromecânicos capazes de controlar circuitos externos de grandes correntes a partir de pequenas correntes ou tensões.

**SETPOINT** – é o valor-alvo que um sistema de controle automático, por exemplo um controlador PID, tentará alcançar.

**SI - SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES** – é um conjunto de definições utilizado internacionalmente que visa uniformizar e facilitar as medições; sua abreviatura é SI.

**SOLENOIDE** – é um condutor enrolado em forma de espiras, ao redor de um centro.

**TRABALHO** – medida da energia transferida entre sistemas mecânicos.

TUBULÃO – é o reservatório existente em caldeiras aquatubulares, que tem a função de conter água e vapor para distribuí-los pelo feixe tubular que une esses reservatórios.

VISCOSIDADE – é a propriedade de um fluido correspondente ao transporte microscópico de quantidade de movimento por difusão molecular; ou seja, quanto maior a viscosidade, menor será a velocidade em que o fluido se move quando sob tensão de cisalhamento.

## Referências bibliográficas

*Livros*

AQUINO, P. L. S. *Material de aula da disciplina Instrumentação Eletrônica: Curso de Engenharia Industrial Elétrica.* Rio de Janeiro: CEFET.

BAZZO, E. *Geração de Vapor.* Florianópolis: Editora da UFSC, 1992.

BIZZO, W. A. *Geração, Distribuição e Utilização de Vapor – capítulo 4.* Disponível em: <<http://www.fem.unicamp.br/~em672/GERVAP4.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2009.

BONACORSO, N. G.; NOLL, V. *Automação Eletropneumática.* São Paulo: Editora Érica, 2004.

CAMPOS, M. C. M. M.; TEIXEIRA, H. C. G. *Controles Típicos de Equipamentos e Processos Industriais.* São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2006.

CASTRUCCI, P. de L; MORAES, C. C. de. *Engenharia de Automação Industrial.* São Paulo: Editora LTC, 2007.

FIALHO, A. B. *Instrumentação Industrial: Conceitos, Aplicações e Análises.* 4. ed. São Paulo: Editora Érica, 2002.

FILHO, G. F. *Motor de Indução.* São Paulo: Editora Érica, 2000.

GEORGINI, M. *Automação Aplicada: Descrição e Implementação de Sistemas Sequenciais com PLCs.* São Paulo: Editora Érica, 2000.

KILIAN, C. T. *Modern Control Technology: Components and Systems.* 2. ed. Albiny: Delmar Thomson Learning, 2000.

NATALE, F. *Automação Industrial: Série Brasileira de Tecnologia.* São Paulo: Editora Érica, 2000.

\_\_\_\_\_. *Automação Industrial.* São Paulo: Editora Érica, 2003.

O'DWYER, A. *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules.* 2. ed. London: Imperial College Press, 2006.

PERA, H. *Geradores de Vapor.* São Paulo: Editora Fama, 1990.

TELLES, P. C. da S. *Tubulações Industriais.* Rio de Janeiro: Editora LTC, 1982.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. *Sensores Industriais: Fundamentos e Aplicações.* 4. ed. São Paulo: Editora Érica, 2007.

VIANNA, M. L. R.; CENDRETTI, E. C. *Equipamentos Estáticos.* São Paulo: Fundação de Apoio à Tecnologia, 2009.

**Apostilas**

Apostila de análise e montagem de sistemas hidráulicos – Festo Didactic

Apostila de análise e montagem de sistemas pneumáticos – Festo Didactic

Apostilas CEFET/BA – Centro de Educação Tecnológica da Bahia

Apostila de eletropneumática – Festo Didactic

Apostila de eletro-hidráulica – Festo Didactic

Apostilas de eletropneumática Parker

Apostilas de electro-hidráulica Parker

Apostila de hidráulica industrial – Festo Didactic

Apostilas de hidráulica Parker

Apostila de introdução à robótica – Festo Didactic

Apostila de pneumática industrial – Festo Didactic

Apostilas de pneumática Parker

MAMEDE, W. F. *Apostila de pneumática e eletropneumática*. 3. ed. CEFET/SP  
UNED – Sertãozinho: São Paulo, 2008.

MARTINS, G. M. *Material de aula da disciplina Princípios de Automação Industrial*. Santa Maria, RS: UFSM – Curso de Engenharia Elétrica. Disponível em: <<http://www.ufsm.br/desp/geomar/automacao/index.htm>>. Acesso em: set. de 2009.

MUNARO, C. J. *Material de aula da disciplina Técnicas de Modelagem e Controle Aplicados a Sistemas Lineares*. Vitória: UFES – Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Disponível em: <[www2.ele.ufes.br/~munaro/tea06/aula6.ppt](http://www2.ele.ufes.br/~munaro/tea06/aula6.ppt)>. Acesso em: out. de 2009.

NABAIS, R. *Material de aula da disciplina Controle Automático de Processos*. Coimbra: Instituto Politécnico – Curso de Engenharia Alimentar. Coimbra/Portugal. Disponível em: <[www.esac.pt/rnabais/InstEquip/.../Sensores\\_nivel.pdf](http://www.esac.pt/rnabais/InstEquip/.../Sensores_nivel.pdf)>. Acesso em: out. de 2009.

NERIS, M. M. *Material de aula da disciplina Instalação de Sistemas Hidráulicos e Pneumático*. São Caetano, SP: ETEC Jorge Street – Curso Técnico em Mecatrônica.

SANTOS, J. E. S. *Material de aula da disciplina Modos de Controle*. Rio Grande do Sul: Colégio Técnico Industrial Mário Alquati – Curso de Projetos e Instalações Elétricas. Disponível em: <[http://www.cti.furg.br/~santos/apostilas/ModosdeControle\\_050905.pdf](http://www.cti.furg.br/~santos/apostilas/ModosdeControle_050905.pdf)>. Acesso em: out. de 2009.

Técnicas e aplicações de comandos eletro-hidráulicos – Festo Didactic

VIANNA, W. da S. *Material de aula da disciplina Controlador Lógico Programável*. Campos, RJ: Curso de Engenharia de Controle e Automação. Disponível em: <[http://www.professor.cefetcampos.br/professores/wvianna/clp/apostila-clp-uerj/clp\\_1.pdf](http://www.professor.cefetcampos.br/professores/wvianna/clp/apostila-clp-uerj/clp_1.pdf)>. Acesso em: set. de 2009.

**Sites**

E-FÍSICA: <<http://efisica.if.usp.br/mecanica/basico/pressao/unidades/>>.

FESTO: [www.festo.com.br](http://www.festo.com.br). Acesso em: out. de 2009.

MICRO: [www.micromecanica.com.br](http://www.micromecanica.com.br). Acesso em: out. de 2009.

MSCP: <[http://www.mspc.eng.br/termo/termod0110.shtml#calor\\_esp](http://www.mspc.eng.br/termo/termod0110.shtml#calor_esp)>. Acesso em: 15 ago. 2009.

NOVUS: <<http://www.novus.com.br>>. Acesso em: out. de 2009.

PARKER: [www.parker.com.br](http://www.parker.com.br). Acesso em: out. de 2009.



**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 concluir 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.