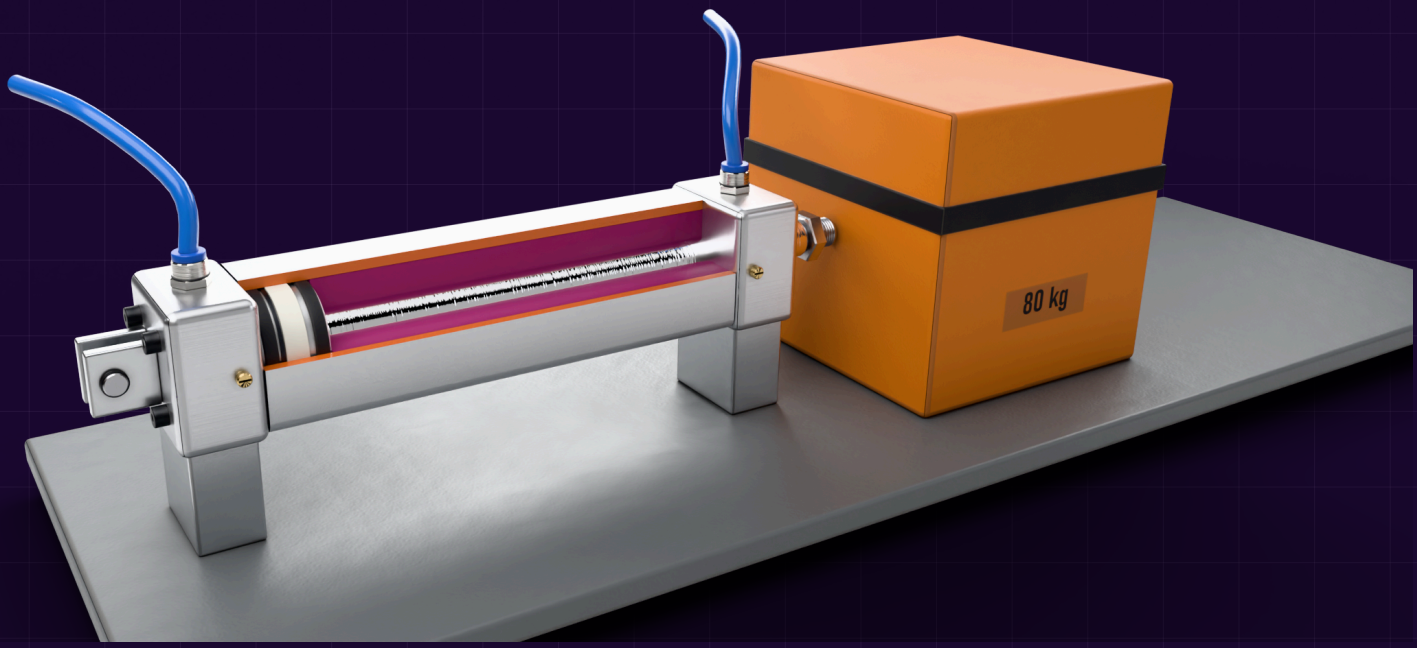
APOSTILA DA DISCIPLINA

MESQUITA DIGITAL

Pneumática

Do ar que o compressor aspira ao circuito que comanda a máquina: componentes, cálculos, diagramas e manutenção, com as peças reais abertas em 3D.

20 capítulos | 40 casos reais | 20 peças em 3D | Exercícios com gabarito



01-05 O ar comprimido

06-09 Preparação do ar e atuadores

10-12 Válvulas e simbologia

13-15 Circuitos e lógica pneumática

16-20 Métodos de comando, projeto e manutenção

ESCOLA TÉCNICA JOSÉ CÉSAR DE MESQUITA

Curso Técnico em Mecânica · Módulo 2 · Modalidade EAD

EDIÇÃO 2026/2

IDENTIFICAÇÃO

Pneumática

Apostila da disciplina, material de apoio às aulas do ambiente virtual

Instituição	Escola Técnica José César de Mesquita
Curso	Curso Técnico em Mecânica (EAD)
Módulo	2
Disciplina	Pneumática, 30 horas (26 h a distância e 4 h presenciais)
Organização	20 capítulos, um para cada aula on-line, em 5 unidades
Recursos	20 peças modeladas em 3D, 40 casos reais com fontes, tabelas técnicas, exemplos resolvidos e exercícios com gabarito comentado
Pré-requisitos	Matemática básica (frações, potências, regra de três) e noções de física (força, pressão)
Material complementar	20 web aulas interativas no ambiente virtual, com peças 3D, realidade aumentada, laboratórios e bancada de montagem

COMO ESTE MATERIAL CONVERSA COM AS AULAS ON-LINE

Cada capítulo corresponde a uma aula on-line, com o mesmo número. A aula traz o que o papel não faz: girar a peça em 3D, ver o ar entrar no cilindro, montar o circuito na bancada virtual e errar sem quebrar nada. A apostila traz o que a tela não faz bem: a leitura com calma, as tabelas para consulta, os exemplos para refazer à mão e o espaço para anotar. Um completa o outro; nenhum substitui o outro.

NORMAS CITADAS NESTE MATERIAL

ISO 1219-1 e **ISO 1219-2** (símbolos e diagramas de circuitos), **ISO 5599** (identificação das vias de válvulas), **ISO 8573-1** (classes de pureza do ar comprimido), **ISO 15552** e **ISO 6432** (cilindros), **ISO 4414** (segurança em sistemas pneumáticos), **ISO 13849-1** (segurança de comandos), **NR-12** (segurança em máquinas) e **NR-13** (vasos de pressão).

USO E REPRODUÇÃO

Material didático de uso interno, produzido para os estudantes do Curso Técnico em Mecânica da Escola Técnica José César de Mesquita. A reprodução para fins didáticos é livre, desde que citada a fonte. As fotografias históricas dos casos reais são de domínio público ou de licença livre, com o crédito ao lado de cada uma.

ANTES DE COMEÇAR

Uma conversa antes do primeiro bar

Quase toda fábrica que você vai conhecer tem uma tubulação azul, ou cinza, correndo pelo teto. Dentro dela está a energia mais usada da indústria depois da eletricidade: **ar comprimido**. Ele aperta, prende, empurra, gira, sopra, conta e separa. Faz isso em uma embaladora de biscoito e na linha de uma montadora, em uma prensa de 2 toneladas e em uma pinça que segura um chip.

E é também a energia mais **cara** da fábrica. Para cada 10 unidades de energia elétrica que entram no compressor, só uma chega como trabalho na ponta do cilindro. Por isso, o técnico que entende de pneumática faz duas coisas que valem dinheiro: põe a máquina para funcionar, e para de jogar ar fora.

Este material segue o caminho do ar. Começa no compressor, passa pelo tratamento e pela rede, chega aos cilindros e às válvulas, vira circuito, vira sequência, vira máquina e termina na manutenção. Em cada capítulo, você vai encontrar a **peça real aberta em 3D**, com cada parte numerada, as **contas** que o projeto pede, resolvidas passo a passo, e **casos reais**, com as fontes, de quando o ar comprimido mudou a história, ou quando um descuido custou caro.

Um pedido. Faça as contas à mão antes de olhar a resposta. Rabisque as figuras. Use os quadros de anotações. Uma apostila limpa no fim do semestre é uma apostila que não foi usada.

Bons estudos. Que o ar trabalhe a seu favor.

Coordenação pedagógica · Cursos técnicos · Escola Técnica José César de Mesquita

Como ler este material

PEÇA EM 3D
A peça da aula, cortada, com as partes numeradas e explicadas na legenda.

EXEMPLO RESOLVIDO
Uma conta de projeto, passo a passo, com a resposta em verde no fim.

CASE REAL
Um fato documentado, com a lição para o técnico e as fontes para conferir.

ERRO QUE CUSTA CARO
O engano mais comum do tema, e o que ele custa na fábrica.

NA PRÁTICA
Como o assunto aparece na bancada, na manutenção e no chão de fábrica.

O QUE A NORMA DIZ
O ponto da norma técnica que se aplica, citado pelo número.

Um roteiro para cada capítulo

1. **Antes da aula on-line**
Leia a abertura e a Figura 1 do capítulo: saiba o nome de cada parte antes de ver a peça girando.

2. **Durante a aula**
Aponte o celular para o QR da Figura 1: a peça gira com o dedo e aparece sobre a mesa. Os circuitos também têm QR, com o ar situação por situação.

3. **Depois da aula**
Refaça os exemplos resolvidos sem olhar a resposta e leia os dois casos reais.

4. **Para fechar**
Resolva os exercícios e confira no gabarito comentado, no fim da apostila.

NESTE MATERIAL

Sumário

UNIDADE 1 · O AR COMPRIMIDO

01 **O ar comprimido como energia: usos, vantagens e limites** 6
1.1 O que é pneumática e onde ela trabalha · 1.2 Pressão: unidades, absoluta e manométrica · 1.3 Do compressor ao atuador: o caminho do ar · 1.4 Vantagens, limites e o custo do ar

02 **Propriedades do ar: pressão, volume, temperatura e água** 11
2.1 Pressão e volume: a lei de Boyle · 2.2 Temperatura: o calor da compressão e o frio da expansão · 2.3 Autonomia do reservatório · 2.4 Vapor de água, ponto de orvalho e condensado

03 **Compressores: tipos, potência, regulação e a sala** 17
3.1 Os tipos de compressor · 3.2 Pistão e parafuso · 3.3 Como o compressor acompanha o consumo · 3.4 A sala de compressores e a vazão necessária

04 **Tratamento do ar: resfriamento, secagem e filtragem** 23
4.1 Contaminantes e classes de qualidade do ar · 4.2 Resfriador, separador, reservatório e purgadores · 4.3 Secadores: refrigeração, adsorção e membrana · 4.4 Filtragem, queda de pressão e destino do condensado

05 **Rede de ar comprimido: traçado, tubos, perda e vazamentos** 29
5.1 O traçado e as regras de montagem · 5.2 Materiais: o que pode e o que não pode · 5.3 O diâmetro pela queda de pressão · 5.4 Vazamentos: medir, localizar e controlar

UNIDADE 2 · PREPARAÇÃO DO AR E ATUADORES

06 **Unidade de conservação: filtro, regulador e lubrificador** 35
6.1 O conjunto e a ordem de montagem · 6.2 O filtro: rotação, elemento e dreno · 6.3 O regulador: mola contra diafragma · 6.4 Lubrificação, dimensionamento e partida

07 **Cilindros pneumáticos: construção, tipos e montagem** 40
7.1 A construção e as vedações · 7.2 Os tipos: quem faz a haste voltar · 7.3 Amortecimento: a energia do fim do curso · 7.4 Fixação, carga lateral, sensores e normas

08 **Dimensionamento de cilindros: força, flambagem e consumo** 45
8.1 Pressão vezes área, no avanço e no recuo · 8.2 A força útil: atrito e fator de carga · 8.3 Flambagem: quando o curso longo limita a força · 8.4 Quanto ar por ciclo, por minuto e no pico

09 **Atuadores especiais: giro, garras, vácuo e motores** 52
9.1 Giro limitado: torque e energia da parada · 9.2 Cilindros especiais: sem haste, guiados, tandem · 9.3 Garras e vácuo: pegar por atrito, segurar pela atmosfera · 9.4 Motores pneumáticos: torque, rotação e potência

UNIDADE 3 · VÁLVULAS E SIMBOLOGIA

10 **Válvulas direcionais: vias, posições e acionamentos** 58
10.1 Como se lê o símbolo de uma válvula · 10.2 Qual válvula para qual função · 10.3 Assento ou carretel, comando direto ou servopilotado · 10.4 Acionamento e tamanho: quanto ar a válvula passa

11 **Válvulas de fluxo, de bloqueio e de pressão** 65
11.1 Regular a velocidade: por que no escape · 11.2 Retenção, escape rápido e as funções OU e E · 11.3 Pressão que limita, regula e dá sinal · 11.4 Quanto ar passa por um estrangulamento

12 **Simbologia e diagramas pneumáticos** 72
12.1 O vocabulário: linhas, alimentação, atuadores e válvulas · 12.2 De baixo para cima: a estrutura do diagrama · 12.3 O código de cada componente · 12.4 A documentação e a máquina real

UNIDADE 4 · CIRCUITOS E LÓGICA PNEUMÁTICA

13 **Circuitos básicos: comando direto, indireto e ciclo automático** 80
13.1 Comando direto: o ar do botão é o ar do cilindro · 13.2 Comando indireto: o botão só envia um sinal · 13.3 Retorno automático e ciclo contínuo · 13.4 Velocidade no circuito e tempo de ciclo

14 **Lógica, memória e tempo: o circuito que decide e espera** 87
14.1 SIM, NÃO, E e OU com válvulas · 14.2 Memória: biestável e autorretenção · 14.3 O temporizador pneumático · 14.4 Sensores sem contato e contadores

15 **Sequências: notação, diagrama trajeto-passo e cadeia de sinais** 95
15.1 A notação abreviada · 15.2 O diagrama trajeto-passo · 15.3 A cadeia de sinais · 15.4 Trajeto-tempo e diagrama funcional

UNIDADE 5 · MÉTODOS DE COMANDO, PROJETO E MANUTENÇÃO

16 **Método intuitivo e sobreposição de sinais** 102
16.1 O método intuitivo · 16.2 Por que A+ B+ B− A− trava · 16.3 Encurtar o sinal: gatilho e formador de pulso · 16.4 Até onde vai o método intuitivo

17 **Método cascata: um grupo de movimentos de cada vez** 110
17.1 Dividir a sequência: nenhuma letra duas vezes no mesmo grupo · 17.2 De onde cada fim de curso recebe ar, e para onde manda o sinal · 17.3 Três e quatro grupos, limites e partida

18 **Método passo a passo: uma memória para cada passo** 118
18.1 O módulo: uma memória, uma condição para ligar e outra para desligar · 18.2 Do primeiro ao último passo, e de volta ao primeiro · 18.3 Movimentos repetidos, e o passo a passo mínimo · 18.4 Os quatro caminhos, e o passo a passo dentro de um controlador

19 **Projeto e segurança: sem ar, na emergência e com a mão dentro** 125
19.1 Oito etapas, da tarefa à entrega · 19.2 Sem ar, sem sinal, em emergência: o estado seguro de cada atuador · 19.3 Avaliar o risco e reduzi-lo na ordem certa · 19.4 Os riscos do próprio ar: energia, jato, mangueira e ruído

20 **Manutenção, diagnóstico e eficiência energética** 133
20.1 Rotinas de manutenção, por frequência · 20.2 Achar o defeito em ordem: ar, sinal, válvula, atuador · 20.3 Para onde vai a energia, e as medidas que mais devolvem · 20.4 Do compressor à ponta da haste: o fecho da disciplina

A **Gabarito comentado** 139

B **Formulário** 148

C **Glossário** 151

D **Referências** 153

E **Índice remissivo** 156

MAPA DA DISCIPLINA: O CAMINHO DO AR

01–05	06–09	10–12	13–15	16–20
O ar comprimido	**Preparação do ar e atuadores**	**Válvulas e simbologia**	**Circuitos e lógica pneumática**	**Métodos de comando, projeto e manutenção**
Da atmosfera ao ponto de uso: pressão, compressores, tratamento e rede.	A unidade de conservação e as peças que transformam ar em força e movimento.	As válvulas que comandam o ar e a linguagem ISO 1219 dos diagramas.	Comandos direto e indireto, lógica E e OU, memória, tempo e sequências.	Intuitivo, cascata e passo a passo; segurança, eficiência e manutenção.

30 horas: 26 h a distância, nas 20 aulas on-line, e 4 h presenciais, na bancada da escola.

CAPÍTULO 1 · O AR COMPRIMIDO

01 O ar comprimido como energia: usos, vantagens e limites

O ar comprimido move metade das máquinas de uma fábrica e é, ao mesmo tempo, a energia mais cara que ela usa: o ar entra de graça no compressor, mas só cerca de um décimo da eletricidade consumida chega ao atuador como trabalho útil. Este capítulo define a **pressão**, segue o caminho do ar até o cilindro e compara o ar com o óleo e o motor elétrico, inclusive no custo.

AO FIM DESTE CAPÍTULO, VOCÊ VAI

- Definir pneumática e reconhecer as suas aplicações na indústria.
- Utilizar as unidades de pressão, e distinguir pressão absoluta de pressão manométrica.
- Identificar as etapas de uma instalação de ar comprimido, da geração ao atuador.
- Comparar pneumática, hidráulica e acionamento elétrico, com vantagens e limites.
- Estimar o custo do ar comprimido.

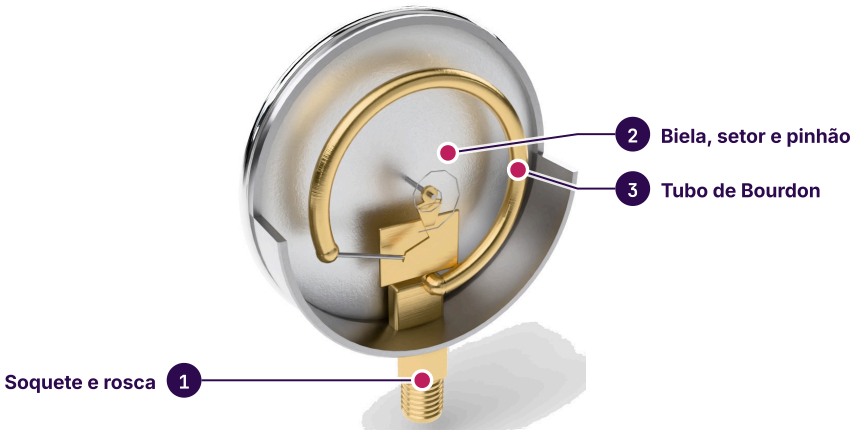


Figura 1.1 O manômetro por dentro. Modelo 3D da aula, em corte. No lado maior, a peça mede cerca de 131 mm.

1. **Soquete e rosca.** A pressão entra por baixo, pela rosca de latão, e enche o tubo.
2. **Biela, setor e pinhão.** A ponta do tubo puxa a biela, que gira o setor dentado, que gira o pinhão do ponteiro: o pequeno movimento vira uma volta de 270°.
3. **Tubo de Bourdon.** Tubo de seção achatada, curvado em arco. Com pressão dentro, ele tende a se **endireitar**, e a ponta se move.

em 3D e na sua mesa

1.1 O que é pneumática e onde ela trabalha

Pneumática é o uso do ar comprimido para transmitir energia e sinais: o ar serve para **mover** (atuadores) e para **comandar** (válvulas e sensores). Nas máquinas atuais domina a **eletropneumática**, com comando elétrico e válvulas acionadas por solenoides. O ar faz bem movimentos rápidos entre duas posições, repetidos milhões de vezes em ambientes sujos, úmidos ou com risco de explosão: fixação na linha automotiva, envase, embalagem, freios de caminhões e trens, ferramentas manuais.

1.2 Pressão: unidades, absoluta e manométrica

$$p = \frac{F}{A} \qquad F = p \cdot A$$

Pressão: força dividida pela área em que ela se distribui. E a forma que mais se usa: a força que uma pressão exerce sobre uma área. Com pressão em pascal e área em metro quadrado, a força sai em newton.

Tabela 1.1

Unidade	Em pascal	Em bar	Onde aparece
1 bar	100 000	1	A unidade prática da pneumática
1 megapascal, MPa	1 000 000	10	Catálogos de origem asiática e normas
1 psi	6 895	0,069	Equipamentos americanos: 14,5 psi fazem 1 bar
1 atm padrão	101 325	1,013	Pressão atmosférica média ao nível do mar

Fonte: unidades de pressão. Para contas rápidas, 1 bar, 1 atm e 1 kgf/cm² (manômetros antigos) são praticamente iguais.

A atmosfera age por dentro e por fora de tudo. Daí as duas formas de medir:

- **Pressão manométrica**: acima da atmosférica, a que o manômetro mostra (Figura 1.1). Usa-se para calcular **força**, porque a atmosfera também empurra o êmbolo pelo outro lado.
- **Pressão absoluta**: medida a partir do vácuo. Entra nas leis dos gases (capítulo 2) e nas contas de **consumo**. Absoluta = manométrica + 1 bar: 6 bar no manômetro são 7 bar absolutos.

O compressor entrega de 6 a 8 bar à rede, e os equipamentos são projetados para **6 bar**. Atalho de bancada: como 1 bar = 10 N/cm², bar × cm² × 10 dá a força em newtons. Um êmbolo de 50 mm (19,6 cm²) a 6 bar faz cerca de 1 178 N (120 kgf).

1.3 Do compressor ao atuador: o caminho do ar

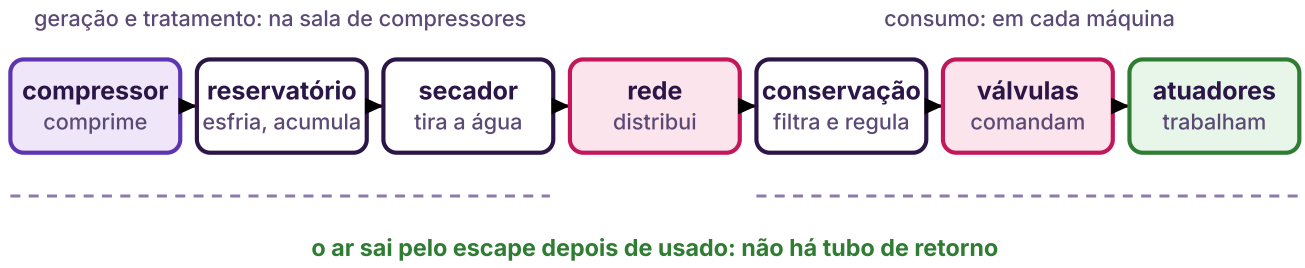


Figura 1.2 As etapas de uma instalação pneumática. As três primeiras ficam, em geral, em uma sala própria. A rede leva o ar a toda a fábrica. As três últimas ficam em cada máquina.

Cada etapa da Figura 1.2 tem o seu capítulo (3 a 18). O circuito é **aberto**: o ar sai pelo escape, sem tubo de retorno, levando consigo a energia gasta para comprimi-lo.

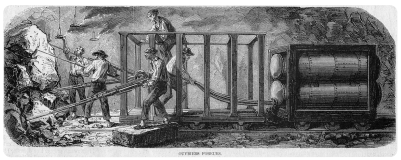
ERRO QUE CUSTA CARO

Máquina desligada não é máquina sem energia

Reservatório e rede guardam ar depois que o compressor desliga. Antes de intervir: fechar o ar, despressurizar e travar as cargas suspensas.

CASE REAL · ALPES, DE 1857 A 1871

O túnel que o ar abriu em catorze anos, e não em quarenta



Jules Gaildrau, L'Illustration (1862), via Wikimedia Commons · Domínio público

O túnel ferroviário do Fréjus, ou Mont Cenis, ligaria a Sabóia ao Piemonte sob os Alpes. A obra começou em 1857 com marreta, ponteiro e pólvora, avançando 20 a 25 centímetros por dia em cada frente: perto de quarenta anos de obra. A frente de trabalho, cheia de fumaça, não tinha ventilação possível, e uma caldeira lá dentro consumiria o oxigênio.

O engenheiro Germain Sommeiller, com dois colegas, propôs o ar comprimido. Lá fora, as torrentes acionavam compressores; o ar, a cerca de 6 atmosferas, seguia por tubos de ferro até perfuratrizes de percussão. Com as primeiras máquinas, em 1861, o avanço diário triplicou e depois quadruplicou, e o ar de escape ventilava a frente. As frentes se encontraram no Natal de 1870, com desvio de centímetros, e o túnel foi aberto em 1871, catorze anos depois do início: a primeira transmissão de potência à distância, por um tubo, em grande escala.

A lição: o ar podia ser usado onde o fogo era proibido, viajava quilômetros sem perder a utilidade e ventilava em vez de contaminar. São as razões de hoje na cabine de pintura, na mina e na fábrica de alimentos.

Fontes: Britannica, Mount Cenis Tunnel (perfuratriz de ar comprimido de Sommeiller); Wikipedia (inglês), Fréjus Rail Tunnel: obras de agosto de 1857, abertura em 17/09/1871; Grace's Guide to British Industrial History, G. Sommeillier

1.4 Vantagens, limites e o custo do ar

EXEMPLO RESOLVIDO

Quanto custa o ar de uma máquina

Custo = vazão × tempo × energia específica do compressor (0,10 a 0,13 kWh/m³ a 7 bar) × tarifa. Uma máquina consome 1,2 m³/min, 16 h por dia, 250 dias por ano; o compressor gasta 0,11 kWh/m³ e a energia custa R$ 0,80/kWh. Qual é o custo anual?

01 1,2 m³/min × 240 000 min (16 × 60 × 250) = 288 000 m³; × 0,11 = 31 680 kWh; × 0,80 = R$ 25 344.

Resposta: Mais de R$ 25 mil por ano, só de energia: cerca de 9 centavos por metro cúbico.

Tabela 1.2 Três formas de acionar uma máquina

	Pneumática	Hidráulica	Elétrica
Força	Até cerca de 30 a 50 kN	Centenas a milhares de kN	Baixa a alta
Posições intermediárias	Difícil: o ar age como mola	Bom	Excelente
Ambiente explosivo	Excelente: sem faísca	Risco de incêndio	Equipamento especial
Custo da energia	Alto: rendimento de 10 a 15 %	Médio	Baixo

Fonte: pneumática, hidráulica e acionamento elétrico (resumo).

NA PRÁTICA

O furo do tamanho de uma cabeça de fósforo

Um furo de **3 mm** a 6 bar perde cerca de **600 L/min** (3,5 kW de compressor). Para achá-lo: produção parada, rede pressurizada, e ouvir.

CASE REAL · PARIS, DE 1880 A 1994

A cidade que tinha ar comprimido encanado

Em 1880, o engenheiro austríaco Victor Popp obteve da prefeitura de Paris a autorização para um serviço de relógios pneumáticos: uma central enviava por tubos um pulso de ar a cada minuto. Se os tubos levavam pulsos, podiam levar força a milhares de oficinas onde uma máquina a vapor era impossível.

Na década de 1880, uma central comprimia o ar a cerca de 6 bar, e tubos de ferro, nas galerias dos esgotos, o levavam aos assinantes. O ar movia motores de oficina, elevadores, bombas e prensas; o escape, frio pela expansão, refrigerava cervejarias e açougues. No início do século XX, a rede tinha várias centenas de quilômetros e milhares de assinantes.

A eletricidade venceu pelo rendimento: do carvão ao eixo do motor, entregava várias vezes mais. Mas a rede não fechou: adaptou-se a clientes para os quais o ar era a ferramenta, como dentistas e oficinas, e só foi desativada na década de 1990.

A lição: diante de cada aplicação, pergunte: o ar faz algo que só ele faz bem, ou substitui um motor elétrico gastando dez vezes mais energia?

Fontes: Wikipedia (inglês), Paris compressed air network: Popp, 5 a 6 bar, mais de 900 km de rede, fim em 1994; SUDAC, Histoire de la Sudac (1877–1996)

PARA LEVAR DESTE CAPÍTULO

1. **Pneumática** é o uso do ar comprimido para mover atuadores e comandar válvulas e sensores; nas máquinas atuais domina a eletropneumática, com comando elétrico e válvulas acionadas por solenoides.
2. A unidade prática é o **bar**: 1 bar vale 100 000 Pa, 14,5 psi fazem 1 bar, e 1 bar, 1 atm e 1 kgf/cm² são praticamente iguais nas contas rápidas.
3. A **pressão manométrica** é a que o manômetro mostra e serve para calcular força; a absoluta soma 1 bar e entra nas leis dos gases e nas contas de consumo.
4. Como 1 bar vale 10 N/cm², a força teórica sai de bar × cm² × 10: um êmbolo de 50 mm a 6 bar faz cerca de 1 178 N.
5. O compressor entrega de 6 a 8 bar à rede, os equipamentos são projetados para **6 bar**, e o circuito é aberto: o ar sai pelo escape levando a energia da compressão.
6. Só 10 a 15 % da eletricidade do compressor vira trabalho no atuador, por isso o ar comprimido é a **energia mais cara** da fábrica, perto de 9 centavos por metro cúbico.
7. Reservatório e rede guardam ar depois que o compressor desliga: antes de intervir, fechar o ar, **despressurizar** e travar as cargas suspensas.

PARA NÃO ESQUECER $F = p \times A$ (bar × cm² × 10 = N)

1.5 Exercícios

Nível: ★ conceito · ★★ aplicação · ★★★ desafio

1 ★ O manômetro de uma máquina importada marca 100 psi. Em bar, isso é cerca de:

a) 10 bar
b) 1 450 bar
c) 6,9 bar

2 ★ Uma prensa de embutimento precisa de 400 kN de força e de posição firme sob carga. Qual tecnologia se usa?

a) Pneumática, por ser mais barata e rápida
b) Hidráulica, pela força alta e rigidez
c) Eletromecânica com fuso, em qualquer caso

3 ★ Um vazamento consome 0,5 m³/min de ar livre, 8 000 h por ano. O compressor gasta 0,11 kWh por m³, e a energia custa R$ 0,80 por kWh. Quanto o vazamento custa por ano?

a) Cerca de R$ 350
b) Cerca de R$ 26 mil
c) Cerca de R$ 21 mil

4 ★★ Um manômetro importado marca 87 psi, e o cilindro tem êmbolo de 63 mm. Qual é a força teórica no avanço, em newtons? (1 psi = 0,0689 bar)

5 ★★ **Diagnóstico.** Um dispositivo de fixação usa um cilindro com êmbolo de 50 mm e foi projetado para apertar a peça com cerca de 1 180 N, a 6 bar. Na usinagem, a peça começa a escorregar. Com uma célula de carga, o técnico mede no cilindro apenas cerca de 790 N. O manômetro da sala de compressores marca 7 bar. Qual é a pressão que realmente chega ao cilindro, qual é a causa provável e como confirmar?

6 ★★★ **Projeto.** Uma prensa de cravação precisa de 2 500 N de força útil no avanço. No ponto da máquina, a rede garante apenas 5 bar nos horários de pico. Considere que o atrito das vedações consome 10 % da força teórica. Os cilindros disponíveis no almoxarifado têm êmbolo de 63, 80 e 100 mm. Qual cilindro escolher? Subir a pressão para 6 bar e usar o de 80 mm seria uma boa solução?

ANOTAÇÕES

CAPÍTULO 2 · O AR COMPRIMIDO

02 Propriedades do ar: pressão, volume, temperatura e água

O ar muda de volume com a pressão, esquenta quando é comprimido, esfria quando se expande e traz água junto. Essas propriedades explicam por que um reservatório de 500 litros guarda 4 000 litros de ar, por que o compressor precisa de resfriador e por que uma fábrica drena centenas de litros de água por dia de uma rede que deveria conter só ar. Nas contas deste capítulo valem sempre duas regras: **pressão absoluta** e **temperatura em kelvin**.

AO FIM DESTE CAPÍTULO, VOCÊ VAI

- Aplicar a lei de Boyle e a lei geral dos gases a problemas de ar comprimido.
- Explicar o aquecimento do ar na compressão e o resfriamento na expansão.
- Converter volumes e vazões entre a condição comprimida e a de ar livre.
- Calcular a quantidade de ar contida em um reservatório e o tempo de autonomia.
- Estimar a quantidade de condensado produzida em uma instalação.

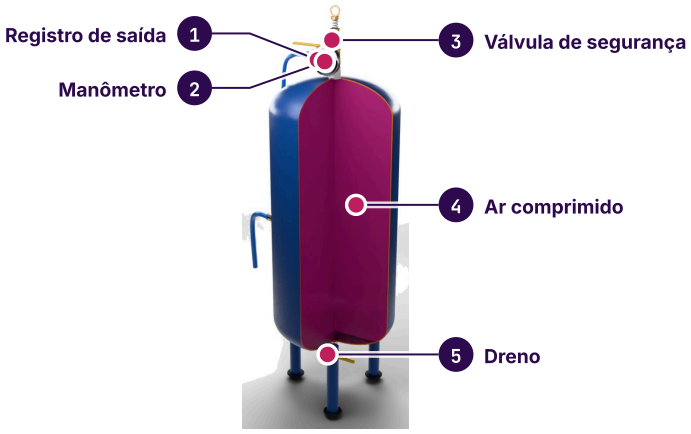


Figura 2.1 O reservatório de 50 litros, em corte. Modelo 3D da aula, em corte. No lado maior, o conjunto mede cerca de 96 cm.

1. **Registro de saída para a rede.** Com a alavanca alinhada ao tubo, o registro está aberto: o ar segue para a rede e as máquinas.
2. **Manômetro: pressão manométrica.** Marca a pressão **acima da atmosférica**: 7 bar no mostrador são 8 bar absolutos. Aberto ao ar, marcaria zero.
3. **Válvula de segurança.** Abre sozinha se a pressão passar do limite gravado no corpo (11 bar) e alivia o tanque. A argola serve para testá-la.
4. **Ar comprimido guardado.** Cinquenta litros a 7 bar guardam quase 400 litros de ar livre. Essa energia continua aí depois que o compressor desliga.
5. **Dreno no ponto mais baixo.** A água do ar condensa e junta no fundo. O dreno é aberto todo dia, ou é automático.

em 3D e na sua mesa

2.1 Pressão e volume: a lei de Boyle

O ar (78 % de nitrogênio, 21 % de oxigênio e vapor de água) tem moléculas muito afastadas. Por isso pode ser comprimido: é o que permite armazená-lo e o que dificulta posicionar um cilindro. A 1 bar e 20 °C, sua densidade é 1,2 kg/m³.

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$$

Lei de Boyle: para uma quantidade fixa de gás, em temperatura constante, o produto da pressão absoluta pelo volume não muda. Se o volume cai à metade, a pressão dobra.

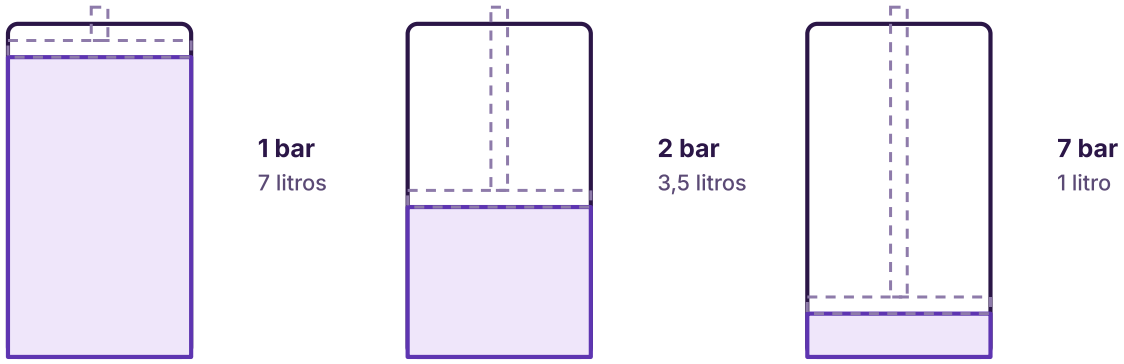


Figura 2.2 A mesma massa de ar em três estados, à mesma temperatura. A coluna escura é o ar. A 1 bar absoluto, ocupa 7 litros. A 2 bar, 3,5 litros. A 7 bar, 1 litro.

A lei vale com a pressão **absoluta**: um reservatório com o manômetro em 6 bar está a 7 bar absolutos, e o ar ali dentro ocupava, antes de ser comprimido, sete vezes aquele volume, e não seis. É o **ar livre**: o volume que o ar ocupa na condição de aspiração, à pressão atmosférica. Vazões de compressores, cilindros e ferramentas são sempre dadas em ar livre (L/min ou m³/min), e um volume V a uma pressão absoluta p corresponde a V × p ÷ 1 bar de ar livre.

CASE REAL · CHALONNES, FRANÇA, DE 1839 A 1841

O poço sob o rio e a doença que se paga na saída

Em 1839, o engenheiro de minas Jacques Triger foi encarregado de alcançar uma camada de carvão em Chalonnes, às margens do Loire, sob uma espessura grande de areia saturada de água. Um poço comum ali era impossível.

Triger cravou um tubo de ferro de pouco mais de um metro de diâmetro, fechado no topo, com o ar interno mantido sob pressão por uma bomba a vapor. A pressão do ar equilibrava a da água e da areia, e os operários escavavam a seco. Para entrar e sair, criou a eclusa de ar, uma câmara com duas portas que nunca se abriam juntas. O poço chegou a cerca de 3 atmosferas absolutas e atingiu o carvão: foi o primeiro caixão pneumático.

Triger anotou o que viu: as velas queimavam muito mais depressa, porque havia mais oxigênio em cada litro; ao pressurizar a eclusa o ar esquentava, e ao despressurizar formava-se uma névoa densa. Alguns operários, pouco depois de sair, sentiam dores fortes nos braços e joelhos. A explicação veio em 1878: sob pressão, o nitrogênio se dissolve no sangue e, na descompressão rápida, forma bolhas.

A lição: o tubo de Triger mostra as leis deste capítulo: o ar comprimido aquece, esfria ao se expandir, condensa a umidade e concentra oxigênio. É esse oxigênio que faz óleo e ar quente explodirem dentro de um compressor, e esse frio que congela escapes e bicos de sopro.

Fontes: Grace's Guide to British Industrial History, Jacques Triger e Triger Process (data de 1839 a 1841); Wikipedia (inglês), Jacques Triger

2.2 Temperatura: o calor da compressão e o frio da expansão

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2}$$

Lei geral dos gases, para uma quantidade fixa: pressão absoluta vezes volume, dividido pela temperatura absoluta, não muda. A temperatura absoluta, em kelvin, é a temperatura em Celsius mais 273.

Com volume constante, a pressão acompanha a temperatura absoluta. Num reservatório enchido a 8 bar absolutos com ar a 60 °C (333 K) e fechado, a pressão cai, ao esfriar até 25 °C (298 K), para 8 × 298 ÷ 333 = 7,16 bar absolutos: o manômetro passa de 7,0 para 6,2 bar sem vazamento nenhum. Por isso não se testa estanqueidade logo depois de pressurizar a rede com ar quente.

O trabalho de compressão vira calor no próprio ar. Numa compressão rápida, sem troca de calor, de ar a 20 °C com taxa 8 (de 1 para 8 bar absolutos), o ar passaria de 250 °C, e acima de 180 a 200 °C o óleo lubrificante se degrada e pode inflamar. Daí os compressores de **dois estágios** com resfriamento intermediário. O inverso também vale: o ar que se expande de 7 bar para a atmosfera esfria dezenas de graus, e em escapes, motores pneumáticos e bicos de sopro a umidade congela e entope a passagem.

2.3 Autonomia do reservatório

Entre a pressão em que o compressor desliga e a mínima que as máquinas aceitam, o reservatório fornece ar sozinho:

$$V_{útil} = V_{res} \cdot \frac{p_{máx} - p_{mín}}{p_{atm}} \qquad t = \frac{V_{útil}}{Q}$$

Ar livre que um reservatório fornece entre a pressão máxima e a mínima. E o tempo de autonomia: esse volume dividido pelo consumo. A diferença entre duas pressões é a mesma em absoluta ou em manométrica.

EXEMPLO RESOLVIDO

A autonomia de um reservatório

Uma máquina consome 600 L/min de ar livre. O reservatório tem 1 000 litros, o compressor desliga a 8 bar e a máquina precisa de pelo menos 6 bar. Por quanto tempo o reservatório a sustenta sozinho?

01 Ar livre útil: 1 000 × (8 − 6) ÷ 1 = 2 000 litros. Tempo: 2 000 ÷ 600 = 3,3 minutos.

Resposta: 3,3 minutos. O reservatório é um amortecedor de picos, não uma reserva para horas: cada bar de queda libera só um volume de tanque em ar livre.

2.4 Vapor de água, ponto de orvalho e condensado

O ar contém vapor de água até um máximo, a **saturação**, que depende só da temperatura e vale por metro

cúbico de **espaço**, em qualquer pressão. Ar quente comporta muito mais: a 40 °C, três vezes o que comporta a 20 °C (Tabela 2.1). A **umidade relativa** é a fração desse máximo presente no ar. O **ponto de orvalho** é a temperatura em que o ar, resfriado, satura e começa a condensar; no ar comprimido, mede-se na pressão da rede (**ponto de orvalho sob pressão**).

Tabela 2.1

Temperatura	3 °C	20 °C	30 °C	35 °C	40 °C
Vapor no ar saturado (g/m³)	6	17	30,4	39,6	51

Fonte: vapor de água máximo por metro cúbico de ar, em função da temperatura.

Ao comprimir sete metros cúbicos de ar em um, todo o vapor fica concentrado nesse único metro cúbico. Na saída do compressor, quente, ele ainda cabe; quando o ar esfria, no resfriador, no reservatório e na rede, o excesso condensa.

EXEMPLO RESOLVIDO

A água de um dia de trabalho

Um compressor fornece 10 m³/min de ar livre, aspirado a 30 °C com 70 % de umidade relativa, comprimido a 8 bar absolutos e resfriado a 35 °C. Quanta água condensa por hora?

01 Vapor aspirado: 10 × 30,4 × 0,70 = 213 g/min.

02 Vapor que ainda cabe a 35 °C, em 10 ÷ 8 m³ de espaço: 10 × 39,6 ÷ 8 = 49,5 g/min.

03 Condensado: 213 − 49,5 = 163 g/min, ou 9,8 L/h.

Resposta: Quase 10 litros por hora, 235 litros em 24 horas. E o ar que segue ainda está saturado a 35 °C: um trecho de rede a 25 °C condensa mais cerca de 21 g/min. Por isso existe o secador (capítulo 4).

CASE REAL · TIROL E MISSOURI, DE 1779 A 1806

O fuzil que disparava vinte balas sem pólvora

Por volta de 1779, o armeiro tirolês Bartolomeo Girandoni apresentou ao exército austríaco um fuzil de repetição movido a ar comprimido. A coronha era um reservatório destacável de chapa de ferro, de meio litro, carregado com cerca de 1 500 bombadas de uma bomba manual até uma pressão estimada em 50 a 55 bar. Um tubo ao lado do cano levava vinte balas.



Army Heritage Museum, U.S. Army, via Wikimedia Commons · Domínio público

Um reservatório cheio dava cerca de trinta tiros úteis: os primeiros fortes, e cada um seguinte um pouco mais fraco, porque a pressão caía a cada disparo. O exército equipou algumas unidades a partir de 1780, mas os problemas eram de pneumática: reservatórios feitos à mão vazavam e às vezes estouravam, as vedações de couro precisavam ficar úmidas, e encher o tanque era penoso. Em algumas décadas, a arma foi retirada. Um exemplar acompanhou a expedição de Lewis e Clark (1804 a 1806).

A lição: a pressão do tanque cai com o uso e o desempenho cai junto: é por isso que o circuito tem regulador. E todo recipiente com ar comprimido é um vaso de pressão. Meio litro a 55 bar guarda cerca de 5 kJ; um reservatório de mil litros a 8 bar guarda cerca de duzentas vezes isso.

Fontes: Lewis and Clark Trust, Girandoni Air Rifle (pesquisa sobre a arma da expedição, 1803 a 1806); NRA Family, Throwback Thursday: Lewis and Clark's Air Rifle

ERRO QUE CUSTA CARO

Manométrica e Celsius estragam a conta

De 20 para 60 °C, a pressão pareceria triplicar; com 293 e 333 K, sobe 14 %. E 6 bar no lugar de 7 na lei de Boyle tiram um sétimo do ar livre.

NA PRÁTICA

Onde a água aparece

A maior parte condensa no resfriador posterior; o resto, no reservatório, nos trechos frios e pontos baixos da rede e nos filtros das máquinas. Cada um desses pontos precisa de dreno (capítulo 4).

PARA LEVAR DESTE CAPÍTULO

1. Nas contas com gases valem sempre duas regras: **pressão absoluta**, que é a manométrica mais 1 bar, e temperatura em kelvin, que é a temperatura em Celsius mais 273.
2. Pela **lei de Boyle**, com temperatura constante, pressão absoluta vezes volume não muda: um reservatório a 6 bar no manômetro guarda sete vezes o seu volume em ar livre.
3. Vazões de compressores, cilindros e ferramentas são dadas em **ar livre**, e um volume V a uma pressão absoluta p corresponde a V × p ÷ 1 bar de ar livre.
4. A compressão aquece o ar: de 1 para 8 bar absolutos, sem troca de calor, passaria de 250 °C, por isso existem os compressores de **dois estágios** com resfriamento intermediário.
5. O reservatório fornece sozinho, entre a pressão máxima e a mínima, um volume de tanque em ar livre por bar de queda: é um **amortecedor de picos**, não uma reserva.
6. O vapor de água máximo depende só da temperatura e vale por metro cúbico de espaço; a 40 °C o ar comporta três vezes o vapor que comporta a 20 °C.
7. Comprimido e depois resfriado, o ar condensa o excesso de vapor: um compressor de 10 m³/min pode gerar perto de **10 litros de condensado** por hora.

PARA NÃO ESQUECER $p1 \cdot V1 \div T1 = p2 \cdot V2 \div T2$ (pressão absoluta, temperatura em kelvin)

2.5 Exercícios

Nível: ★ conceito · ★★ aplicação · ★★★ desafio

1 ★ Um reservatório de 200 litros está com o manômetro em 8 bar. Quantos litros de ar livre ele guarda?

a) 1 600 litros
b) 1 800 litros
c) 25 litros

2 ★ Um tanque fechado tem ar a 6 bar absolutos e 27 °C. Ao sol, o ar chega a 57 °C. Qual é a nova pressão absoluta?

a) 12,7 bar
b) 6,0 bar
c) 6,6 bar

3 ★ O ar sai do resfriador a 35 °C e o tubo passa por um corredor a 18 °C, antes da cabine. O que acontece?

a) Nada, a água ficou no resfriador
b) A pressão da rede sobe no trecho frio
c) Condensa água dentro do tubo

4 ★★ Um metro cúbico de ar, aspirado a 1 bar absoluto, 30 °C e 70 % de umidade relativa, é comprimido até 7 bar absolutos e volta a 30 °C. Qual é o volume final? Quantos gramas de água condensam?

5 ★★ **Complete a tabela.** O almoxarifado de manutenção tem quatro reservatórios e quer saber quanto ar livre cada um guarda quando cheio. Complete a tabela, lembrando que a lei de Boyle usa a pressão absoluta e que a atmosfera vale 1 bar.

Reservatório	Volume	Manômetro	Absoluta	Ar livre
A	500 L	7 bar		
B	300 L		11 bar	
C	1 000 L	6 bar		
D		9 bar		2 000 L

6 ★★★ **Diagnóstico.** Às 18 h, no fim do turno, o reservatório de 500 litros está com 8,0 bar no manômetro e o ar dentro dele a 45 °C, recém-saído do compressor. O compressor é desligado e a válvula de saída para a rede é fechada. Às 6 h do dia seguinte, com o tanque a 20 °C, o manômetro marca 7,0 bar. O encarregado conclui que o dreno ou a retenção vazam 1 bar por noite. Ele está certo? Quanto da queda é vazamento, e como confirmar?

ANOTAÇÕES

CAPÍTULO 3 · O AR COMPRIMIDO

03 Compressores: tipos, potência, regulação e a sala

O compressor consome quase toda a energia de uma instalação pneumática e, em poucos anos, gasta em eletricidade mais do que custou. Por isso ele se escolhe pela **vazão de ar livre** que a fábrica realmente consome, na **pressão mínima** que a atende: sobra de pressão e de vazão é energia comprada à toa. Este capítulo apresenta os tipos de compressor, detalha o de pistão e o de parafuso, mostra como cada um acompanha o consumo e termina na sala de compressores e na conta da vazão necessária.

AO FIM DESTE CAPÍTULO, VOCÊ VAI

- Classificar os compressores, e reconhecer a faixa de aplicação de cada tipo.
- Explicar o funcionamento dos compressores de pistão e de parafuso.
- Estimar a potência e o custo de energia de um compressor.
- Comparar os métodos de regulação de capacidade.
- Dimensionar a vazão necessária, e descrever os requisitos da sala de compressores.

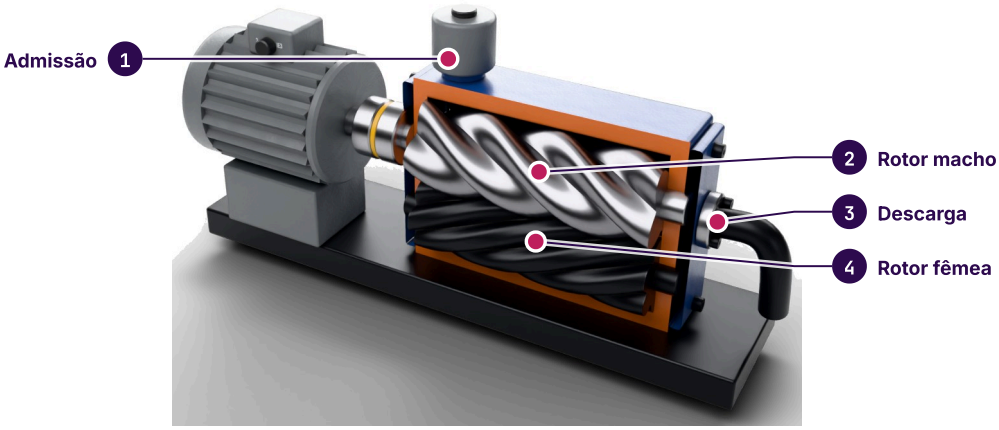


Figura 3.1 O compressor de parafuso, por dentro. Modelo 3D da aula, em corte. No lado maior, o conjunto mede cerca de 41 cm.

1. **Admissão com filtro.** O ar entra por cima, pelo filtro, do lado do motor.
2. **Rotor macho (4 lóbulos).** Acionado pelo motor pelo acoplamento elástico, gira e engrena no rotor fêmea.
3. **Descarga.** O ar sai comprimido do outro lado, quente, rumo ao resfriador.
4. **Rotor fêmea (6 lóbulos).** Entre os lóbulos, o ar fica preso e o volume vai diminuindo ao longo do comprimento: é a compressão.

em 3D e na sua mesa

3.1 Os tipos de compressor

Nos compressores de **deslocamento positivo**, uma porção de ar é presa em uma câmara que diminui de volume, e a pressão sobe; a vazão quase não muda com a pressão de descarga. Nos **dinâmicos** (centrífugos), um rotor de alta rotação acelera o ar, que é freado em um difusor: entregam ar sem óleo, mas só são eficientes em grandes vazões. Sopradores elevam a pressão em menos de 1 bar.

Tabela 3.1

Tipo	Vazão típica	Pressão típica	Onde se usa
Pistão	0,05 a 20 m³/min	8 a 15 bar; até 400 bar em vários estágios	Oficinas, uso intermitente, alta pressão
Parafuso com injeção de óleo	0,3 a 80 m³/min	5 a 13 bar	O padrão da indústria, serviço contínuo
Parafuso isento de óleo	2 a 150 m³/min	5 a 10 bar	Alimentos, fármacos, eletrônica, pintura
Palhetas	0,1 a 30 m³/min	5 a 10 bar	Serviço contínuo, baixo ruído
Espiral	0,05 a 1,5 m³/min	8 a 10 bar	Ar sem óleo e silencioso: odontologia
Lóbulos	1 a 1 000 m³/min	Até 1 bar	Sopradores: transporte pneumático, efluentes
Centrífugo	40 a mais de 1 000 m³/min	3 a 10 bar	Grandes indústrias, carga constante

Fonte: tipos de compressor (resumo).

CASE REAL · CONNERSVILLE, INDIANA, DE 1854 A 1860

A roda d'água que virou soprador

Os irmãos Philander e Francis Roots tinham uma tecelagem de lã em Connersville, movida pela água de um canal. Na década de 1850, tentaram substituir a roda d'água por um motor hidráulico próprio: dois rotores de madeira em forma de oito, girando em sentidos opostos dentro de uma carcaça justa. A madeira inchou, e os rotores travaram.

Segundo a história contada pela empresa, num ensaio com a máquina seca, acionada por correia, o jato de ar arrancou o chapéu de um visitante, superintendente de uma fundição, que comentou que aquilo sopraria o seu forno melhor que qualquer fole. Os irmãos refizeram os rotores em ferro fundido e patentearam o soprador rotativo em 1860.

Os rotores giram sem se tocar, sem válvulas nem lubrificação na câmara, e cada lóbulo carrega uma porção de ar da entrada para a saída. Mas não há compressão interna: o ar da saída reflui a cada lóbulo que se abre, e acima de cerca de 1 bar de diferença o rendimento cai muito.

A lição: cada tipo de compressor tem uma faixa em que nada o supera. Aerar um tanque com ar de rede a 7 bar, reduzido por válvula, gasta quatro a cinco vezes mais energia do que com um soprador de 0,5 bar. Baixa pressão se gera em baixa pressão.

Fontes: Roots, Roots celebrates 170 years of blower and compressor innovation (rootsblower.com); Historical Marker Database, marcador de Connersville sobre o soprador Roots (1854); Google Patents, US 23267 (roda d'água, 15/03/1859, reemitida em 28/02/1860)

3.2 Pistão e parafuso

No **compressor de pistão**, o êmbolo desce e a válvula de aspiração, uma lâmina de aço, abre sozinha; ele sobe com as válvulas fechadas até a pressão abrir a de descarga. No topo sobra o **espaço morto**, cujo ar precisa se reexpandir antes de o cilindro aspirar de novo: por isso o pistão entrega só 70 a 90 % do volume que desloca. Em dois estágios, o ar vai a cerca de 3 bar no cilindro maior, passa por um resfriador intermediário e chega à pressão final no menor. É barato e atinge qualquer pressão, mas vibra, faz 80 a 95 dB e, na maioria, trabalha só 50 a 70 % do tempo.

O **compressor de parafuso** (Figura 3.1) comprime entre dois rotores helicoidais: sem válvulas, com fluxo

contínuo, 62 a 75 dB e serviço 100 % do tempo. O óleo injetado veda as folgas e retira o calor (o ar sai a 70 a 90 °C, e não a 250 °C); um separador o devolve ao circuito, e o ar segue com 2 a 5 mg/m³ de óleo. É a escolha natural acima de 7 a 10 kW.

$$P \approx e \cdot Q$$

Potência elétrica de um compressor: potência específica multiplicada pela vazão de ar livre. Para 7 bar de pressão de descarga, a potência específica de máquinas atuais fica entre 5,5 e 7,5 kW por m³/min. Cada bar a mais acrescenta cerca de 6 a 7 %.

EXEMPLO RESOLVIDO

A potência e a conta de um compressor

Uma fábrica precisa de 5 m³/min a 7 bar. O compressor tem potência específica de 6,5 kW por m³/min. Quanto ele gasta em 4 000 h por ano, em plena carga, a R$ 0,80 por kWh?

01 Potência: 6,5 × 5 = 32,5 kW. Energia: 32,5 × 4 000 = 130 000 kWh. Custo: 130 000 × 0,80 = R$ 104 000.

Resposta: R$ 104 mil por ano, mais que o preço da máquina. Um modelo de 6,0 kW por m³/min economizaria R$ 8 mil por ano: é isso, e não o preço, que decide a compra.

3.3 Como o compressor acompanha o consumo

Compressores pequenos de pistão trabalham em **liga e desliga**: um pressostato para o motor na pressão máxima e o religa na mínima, limitado pelo número de partidas por hora. Os parafusos de velocidade fixa usam **carga e alívio**: na pressão máxima a admissão fecha, mas o motor continua girando e consome **20 a 35 %** da potência sem entregar um litro de ar. A **modulação** estrangula a admissão e gasta ainda mais. Com **velocidade variável**, um inversor ajusta a rotação à demanda (Figura 3.2).

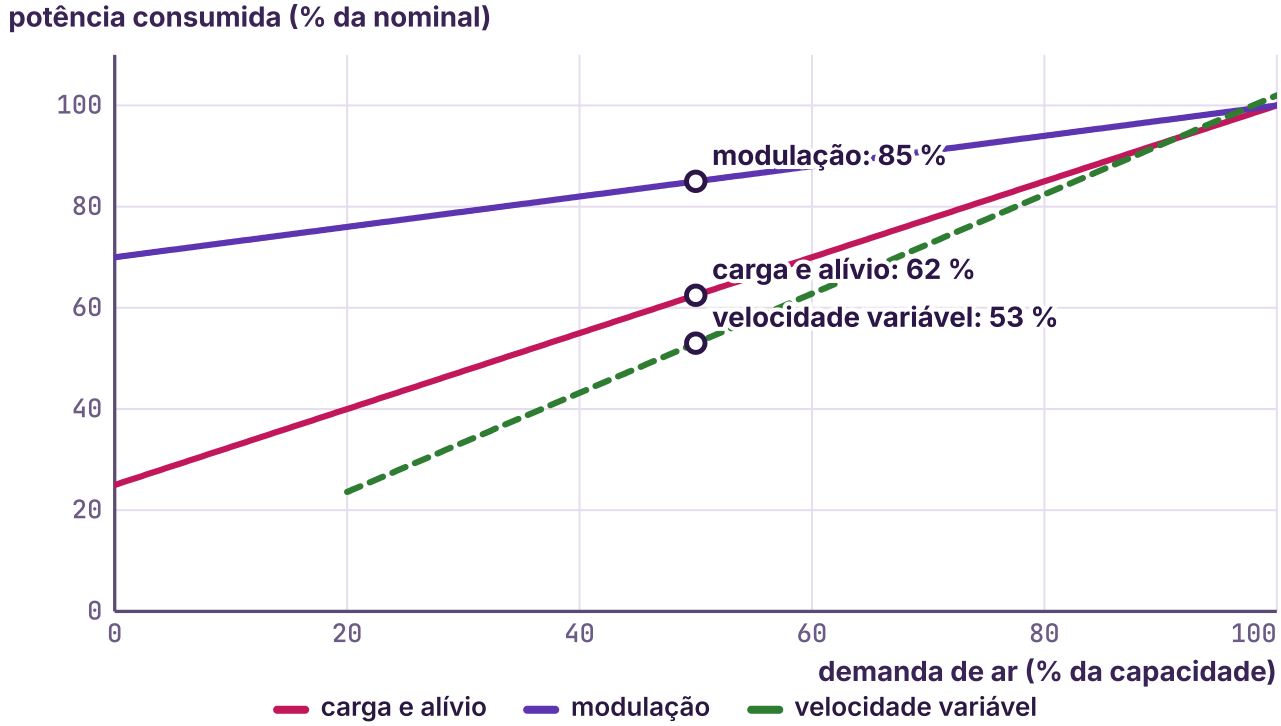


Figura 3.2 Potência consumida em função da demanda, para três métodos. Em carga e alívio, com reservatório adequado, o compressor gasta 25 % mesmo sem fornecer ar. Em modulação, 70 %. Com velocidade variável, a potência acompanha a demanda quase na proporção, dentro da faixa de 20 a 100 %.

O compressor trabalha entre duas pressões, a **banda**, de 0,5 a 1 bar. A mínima da banda deve ser a pressão de que a fábrica precisa; o de velocidade variável mantém a pressão a 0,1 bar do ajuste. Mas o inversor perde 2 a 4 %, e em plena carga constante a máquina de velocidade fixa gasta um pouco menos. Em salas com várias máquinas, o melhor arranjo costuma ser compressores fixos na base, em plena carga, e um de velocidade variável cobrindo a variação.

ERRO QUE CUSTA CARO

Subir a pressão para resolver falta de ar

Quando uma máquina no fim da rede reclama, a tentação é subir o ajuste do compressor. Cada bar a mais custa energia e aumenta os vazamentos, e a causa continua lá: vazamento, tubo fino ou filtro entupido.

3.4 A sala de compressores e a vazão necessária

O ar de aspiração deve ser frio, limpo e seco: vapores de solvente se concentram sete vezes na compressão, e cada 3 °C a menos na aspiração dão cerca de 1 % a mais de ar. Quase toda a energia elétrica sai como calor, e a sala precisa de entrada de ar fresco embaixo e saída em cima, para não passar de 40 °C. Sala quente reduz a vazão e degrada o óleo; o calor retirado pode aquecer um ambiente ou a água de um processo.

CASE REAL · MONTANHAS DE HOOSAC, MASSACHUSETTS, DE 1851 A 1875

O túnel que dependia de um galpão de madeira

O túnel de Hoosac deveria abrir uma rota ferroviária entre Boston e o interior. Começado em 1851 e perfurado à mão, avançava tão devagar que os jornais o chamavam de o grande furo. Em 1866 chegaram a nitroglicerina e as perfuratrizes de ar comprimido de Charles Burleigh, as primeiras a funcionar com sucesso nos Estados Unidos, alimentadas por compressores movidos pela água de uma barragem. O avanço mensal mais que dobrou.



Hurd & Smith, coleção Robert N. Dennis, New York Public Library, via Wikimedia Commons · Domínio público

No topo de um poço central de mais de 300 metros, um galpão de madeira abrigava o guincho, as bombas de drenagem e os equipamentos que mandavam ar para o fundo. Em 19 de outubro de 1867, a iluminação a gás de nafta provocou um incêndio. Guincho, bombas e ar pararam. Treze trabalhadores estavam no fundo, a mais de 160 metros, sem outra saída, e ninguém foi encontrado vivo. O túnel foi concluído em 1875.

A lição: o ar comprimido é utilidade crítica, e o galpão reunia geração, drenagem e acesso sem redundância. Na fábrica: mais de um compressor, reservatório que complete os movimentos de segurança, máquinas que fiquem seguras na falta de ar e sala protegida de fogo e de improviso.

Fontes: ASCE, Hoosac Tunnel (marco histórico: perfuratriz Burleigh a ar comprimido e nitroglicerina); Structurae, Hoosac Tunnel

Para saber quanto ar a fábrica precisa, lista-se cada consumidor e aplica-se o **fator de uso** (a fração do tempo em que consome: 20 a 40 % para uma parafusadeira, 10 % para um bico de sopro), a **simultaneidade** (0,6 a 0,9) e somam-se vazamentos (5 a 10 % em instalação nova) e reserva (10 a 30 %). A capacidade se divide em duas ou mais máquinas, para que a falha de uma não pare a fábrica.

EXEMPLO RESOLVIDO

A vazão de uma pequena fábrica

Consumidores: 8 parafusadeiras de 400 L/min com fator de uso 0,3; uma máquina de 350 L/min contínuos; seis bicos de 250 L/min com fator 0,1. Simultaneidade 0,8, vazamentos de 10 % e reserva de 20 %. Que vazão o compressor deve fornecer?

01 Soma: 8 × 400 × 0,3 + 350 + 6 × 250 × 0,1 = 960 + 350 + 150 = 1 460 L/min.

02 Com fatores: 1 460 × 0,8 × 1,10 × 1,20 = 1 542 L/min.

Resposta: Cerca de 1,55 m³/min, um compressor de uns 11 kW. A soma dos consumos de placa daria 5,05 m³/min e um compressor de 30 kW, em alívio a maior parte da vida.

O QUE A NORMA DIZ

O reservatório é vaso de pressão

Ordem de grandeza do volume, em litros: cerca de 30 % da vazão por minuto para parafuso em carga e alívio, 100 % ou mais para pistão em liga e desliga, 10 a 20 % para velocidade variável. Como vaso de pressão, exige válvula de segurança, manômetro, dreno, placa de identificação e as inspeções periódicas da NR-13.

PARA LEVAR DESTE CAPÍTULO

1 O compressor se escolhe pela **vazão de ar livre** que a fábrica realmente consome, na pressão mínima que a atende: sobra de pressão e de vazão é energia comprada à toa.

2 O **compressor de pistão** é barato e atinge qualquer pressão, mas entrega só 70 a 90 % do volume deslocado por causa do espaço morto e trabalha 50 a 70 % do tempo.

3 O **compressor de parafuso** com injeção de óleo é o padrão da indústria: fluxo contínuo, serviço 100 % do tempo, ar a 70 a 90 °C e 2 a 5 mg/m³ de óleo.

4 A potência elétrica é a potência específica vezes a vazão, de 5,5 a 7,5 kW por m³/min a 7 bar, e cada bar a mais acrescenta cerca de 6 a 7 %.

5 Em **carga e alívio**, o compressor em alívio continua girando e consome 20 a 35 % da potência sem entregar ar; com demanda variável, a velocidade variável gasta menos.

6 A vazão necessária soma os consumidores com **fator de uso** e simultaneidade, mais vazamentos e reserva, e se divide em duas ou mais máquinas para que a falha de uma não pare a fábrica.

7 A sala precisa de ar de aspiração frio, limpo e seco e de ventilação para não passar de 40 °C; o reservatório é vaso de pressão e segue a **NR-13**.

PARA NÃO ESQUECER P ≈ e × Q (potência específica × vazão de ar livre)

3.5 Exercícios

Nível: ★ conceito · ★★ aplicação · ★★★ desafio

1 ★ Uma fábrica precisa de 8 m³/min de ar, a 7 bar, em serviço contínuo. Qual compressor é o usual?

a) Pistão de um estágio, de oficina
b) Parafuso com injeção de óleo
c) Centrífugo de grande porte

2 ★ Para "garantir" uma máquina no fim da rede, alguém sobe a pressão da sala de 7 para 8 bar. A energia do compressor aumenta cerca de:

a) 6 a 7 %
b) 14 %, um sétimo a mais
c) Nada, o motor é o mesmo

3 ★ Um compressor de 55 kW, regulado por carga e alívio, passa metade do tempo em alívio. Em alívio, ele consome:

a) Nada, porque não comprime
b) Cerca de 20 a 35 % da potência
c) A potência total, como em carga

4 ★★ O compressor C-01 entrega 6 m³/min, com potência específica de 6,8 kW por m³/min, e trabalha 4 000 horas por ano em plena carga. A energia custa R$ 0,75 por kWh. Qual é o custo anual de energia? Quanto se economizaria baixando a pressão da rede em 1 bar?

5 ★★ **Leitura.** O compressor de parafuso C-02, de 37 kW e 6 m³/min, regulado por carga e alívio, tem dois horímetros. No último ano eles registraram 6 000 horas de funcionamento, das quais 3 600 em carga e 2 400 em alívio. Em alívio, a máquina consome 30 % da potência. A energia custa R$ 0,80 por kWh. Leia os horímetros: qual é o consumo médio de ar da fábrica, quanto custa por ano o tempo em alívio e o que os números indicam?

6 ★★★ **Projeto.** O consumo de uma fábrica varia entre 5 e 9 m³/min, com média de 7 m³/min, 6 000 horas por ano. Opção A: um compressor de velocidade fixa de 10 m³/min, em carga e alívio, com 6,5 kW por m³/min em carga e 30 % da potência em alívio. Opção B: um compressor fixo de 5 m³/min sempre em plena carga, a 6,5 kW por m³/min, mais um de velocidade variável que cobre o restante a 6,7 kW por m³/min. Compare a potência média e o custo anual, a R$ 0,80 por kWh.

ANOTAÇÕES

CAPÍTULO 4 · O AR COMPRIMIDO

04 Tratamento do ar: resfriamento, secagem e filtragem

O ar sai do compressor quente, saturado de água, com névoa de óleo e com a poeira que aspirou. Se nada for feito, tudo isso chega às válvulas, aos cilindros e à pistola de pintura. Mas tratar o ar também custa: cada grau de ponto de orvalho e cada micrômetro de filtragem são pagos em energia. A regra deste capítulo é tratar o ar até a qualidade que a aplicação exige, e nem um degrau além, lembrando que secador e filtros só funcionam com o dreno funcionando.

AO FIM DESTE CAPÍTULO, VOCÊ VAI

- Identificar os contaminantes do ar comprimido e os danos que causam.
- Interpretar as classes de qualidade do ar e relacioná-las com as aplicações.
- Explicar o funcionamento do resfriador posterior, dos purgadores e dos secadores.
- Selecionar filtros, e avaliar o custo da queda de pressão.
- Definir a sequência de tratamento para uma aplicação, e o destino do condensado.

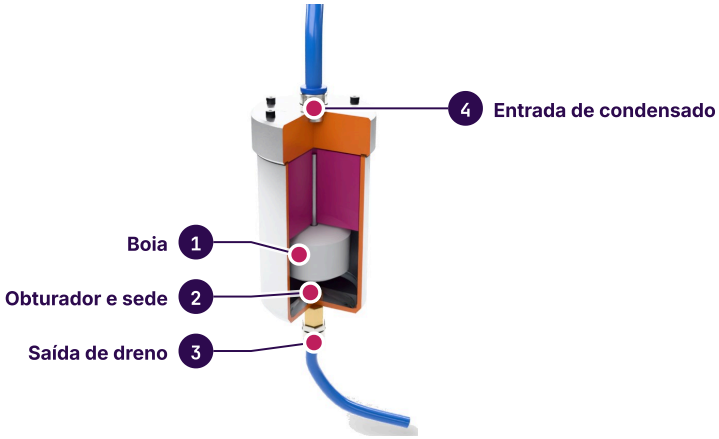


Figura 4.1 O purgador automático de boia, em corte. Modelo 3D da aula, em corte. No lado maior, o conjunto mede cerca de 33 cm.

1. **Boia.** Quando a água sobe, a boia sobe junto e levanta o obturador. Sem água, ela fica embaixo e o dreno, fechado.
2. **Obturador e sede do dreno.** Abre só enquanto há água: o purgador de boia não joga fora ar comprimido, como faz o temporizado mal ajustado.
3. **Saída de dreno.** A água sai por baixo, empurrada pela própria pressão do ar, para um coletor que separa o óleo antes do esgoto.
4. **Entrada de condensado.** Ligado ao ponto baixo do filtro, do reservatório ou da rede: a água desce por gravidade.

em 3D e na sua mesa

4.1 Contaminantes e classes de qualidade do ar

A **água** vem da umidade aspirada e condensa depois da compressão: corrói a rede, lava a lubrificação, trava válvulas e congela escapes. O **óleo**, do compressor, chega em líquido, aerossol e vapor: incha vedações, cola válvulas e estraga pinturas. As **partículas** (poeira, ferrugem, carepa) desgastam vedações e entopem

bicos. A norma internacional de pureza do ar comprimido (ISO 8573-1) dá uma classe a cada um, sempre na ordem **partículas, água, óleo**: um ar 1.4.1 tem classe 1 em partículas, 4 em água e 1 em óleo.

Tabela 4.1

Classe	Partículas, entre 1 e 5 micrômetros, por m³	Água: ponto de orvalho sob pressão	Óleo total, em mg/m³
1	Até 10	−70 °C ou menos	Até 0,01
2	Até 100	−40 °C	Até 0,1
3	Até 1 000	−20 °C	Até 1
4	Até 10 000	+3 °C	Até 5
5	Até 100 000	+7 °C	Acima de 5
6	Não especificado nessa faixa	+10 °C	Não se aplica

Fonte: classes de pureza do ar comprimido, em forma resumida. A norma define também limites para outras faixas de tamanho de partícula e para água líquida.

Tabela 4.2

Aplicação	Classe típica	Tratamento
Automação comum: cilindros e válvulas	4.4.4 ou melhor	Secador por refrigeração e filtro na máquina
Pintura de qualidade	1.4.1 ou 2.4.1	Refrigeração, coalescentes e carvão ativado junto à cabine
Instrumentação	2.3.2 ou 2.2.2	Secador por adsorção e coalescentes
Alimentos, em contato com o produto	1.2.1	Isento de óleo ou filtragem total, adsorção, filtro estéril

Fonte: classes usuais por aplicação. Trata-se a rede até uma classe básica, e o tratamento fino fica só no ramal que precisa dele.

4.2 Resfriador, separador, reservatório e purgadores



Figura 4.2 A linha de tratamento. As setas para baixo são os pontos de drenagem de condensado: cada um precisa de um purgador em funcionamento.

O **resfriador posterior** baixa o ar de 80 a 150 °C para cerca de 10 °C acima da temperatura do meio de resfriamento, e 60 a 75 % da água condensa ali, de graça. O **separador ciclônico** lança as gotas contra a parede e retira 90 % ou mais da água líquida, mas nada do vapor. No **reservatório** o ar esfria mais e decanta água, óleo e partículas. Em cada ponto, o condensado precisa sair sem que o ar saia junto: é o trabalho do **purgador** (Figura 4.1).

ERRO QUE CUSTA CARO

O purgador é o ponto fraco

Travado fechado, o purgador devolve a água à rede; travado aberto, é um vazamento permanente. Teste-o toda semana: acionar o teste, ver se sai condensado, limpar o filtro de entrada.

CASE REAL · NANTES, FRANÇA, DE 1879 A 1917

O bonde que andava a ar e não podia congelar

Mover veículos com ar comprimido era uma ideia antiga: limpo e silencioso, não assustava cavalos nem enchia as ruas de fumaça. As tentativas esbarravam sempre no mesmo ponto. Ao se expandir no motor, de 30 atmosferas para uma, o ar esfriava dezenas de graus abaixo de zero; a umidade virava gelo nas válvulas e nos escapes, e o motor travava em poucos minutos.



A. Thuret, Nantes (1904), via Wikimedia Commons · Domínio público

O engenheiro Louis Mékarski, de origem polonesa, radicado na França, patenteou a solução na década de 1870: entre os reservatórios e o motor, um recipiente com cerca de cem litros de água a perto de 150 °C, sob pressão. O ar borbulhava através dela, aquecia-se e saía pelo escape acima de zero. A autonomia quase dobrava, e o gelo desaparecia. Nantes inaugurou a rede em 1879, e ela chegou a dezenas de quilômetros e perto de uma centena de carros, até ser eletrificada na década de 1910.

A lição: o problema de Mékarski é o deste capítulo: água no ar que se expande. Num veículo, a solução foi aquecer; numa fábrica, é retirar a água antes. Quando um componente congela ou cospe água, a causa está no secador que falta, que está sobrecarregado ou cujo dreno entupiu.

Fontes: Wikipedia (inglês), Mekarski system e Nantes tramway: bondes a ar comprimido em Nantes de 1879 a 1917; Grace's Guide to British Industrial History, L. Mekarski

Tabela 4.3

Purgador	Como funciona	Problema
Manual	Uma válvula que alguém abre	Depende de alguém lembrar; costuma ficar entreaberto, vazando ar
De boia	Mecânico, abre só com água (Figura 4.1)	Trava com sujeira e óleo emulsionado, sem aviso
Temporizado	Solenoide abre alguns segundos a cada tantos minutos	Abre sem água e perde ar, ou abre pouco e não drena
Eletrônico de nível	Sensor abre só o necessário	Custo maior; o indicado para pontos críticos

Fonte: tipos de purgador de condensado.

4.3 Secadores: refrigeração, adsorção e membrana

Tabela 4.4

Tipo	Ponto de orvalho sob pressão	Custo de operação	Onde se usa
Refrigeração	+3 a +10 °C	Baixo: 1 a 3 % da energia do compressor	A grande maioria das redes internas
Adsorção, regeneração a frio	−20 a −70 °C	Alto: 15 a 20 % do ar vai para a purga	Instrumentação, linhas externas no frio

Tabela 4.4 (continuação)

Tipo	Ponto de orvalho sob pressão	Custo de operação	Onde se usa
Adsorção, regeneração a quente	−20 a −70 °C	Médio: 2 a 8 % de purga mais aquecimento	Grandes vazões com orvalho baixo
Membrana	+3 a −40 °C	Médio a alto: 10 a 25 % de purga	Pontos de uso, locais sem eletricidade

Fonte: tipos de secador de ar comprimido.

O **secador por adsorção** tem duas colunas de alumina ativada, sílica gel ou peneira molecular, que retêm a água na superfície dos grânulos e se revezam: uma seca o ar enquanto a outra se regenera com uma fração do ar seco, a **purga**. Em um compressor de 75 kW, são 11 a 15 kW gastos em secar. O adsorvente não tolera óleo: antes dele vai sempre um filtro coalescente, e depois, um filtro de partículas.

CASE REAL · LINDEN, NOVA JERSEY, 1958

O secador que não precisava de calor

Nos anos 1950, secar ar a pontos de orvalho muito baixos exigia leitos adsorventes regenerados por aquecimento a mais de 150 °C, em ciclos de horas. Charles Skarstrom, engenheiro de um centro de pesquisa de uma companhia de petróleo em Nova Jersey, precisava de ar seco para os seus experimentos e montou um secador próprio, que depositou como patente em 1958: regenerar sem calor.

O adsorvente retém muito mais água em alta pressão; e o ar seco, expandido à pressão atmosférica, ocupa várias vezes mais volume com a mesma pouca água, ficando ávido por umidade. Uma coluna secava o ar sob pressão; uma pequena fração desse ar, expandida por um orifício, atravessava a outra no sentido contrário e arrastava a água retida. A cada poucos minutos, válvulas invertiam os papéis. A patente foi concedida em 1960, e a mesma ideia hoje separa gases em concentradores de oxigênio e geradores de nitrogênio.

A lição: a purga é o preço, e existe mesmo com a fábrica consumindo pouco, a menos que o controle a ajuste. Quando o ponto de orvalho sobe, as causas prováveis são, nesta ordem: pressão baixa, válvula de comutação que não veda, silenciador de purga entupido e adsorvente contaminado por óleo.

Fontes: Chemistry World, Skarstrom's separator (laboratório da Esso junto à refinaria de Bayway, em Linden); Compressed Air Best Practices, Heatless compressed air desiccant dryer calculation principles (origem do secador sem calor); Patente US 2 944 627, C. W. Skarstrom, concedida em 1960

O **secador por refrigeração** é uma geladeira para ar: esfria o ar a cerca de 3 °C, drena a água condensada e reaquece a saída, para o tubo não suar. Enquanto nenhum trecho da rede ficar abaixo de 3 °C, não há condensação; mais frio que isso ele não trabalha, porque a água congelaria no trocador. Cada 5 °C acima dos 35 °C nominais na entrada tiram 15 a 20 % da sua capacidade, por isso ele se escolhe com os fatores de correção do fabricante:

$$Q_{nominal} = \frac{Q_{real}}{f_{pressão} \cdot f_{entrada} \cdot f_{ambiente}}$$

Seleção de um secador por refrigeração: a vazão de catálogo, válida para a condição de referência, precisa ser igual ou maior que a vazão real dividida pelos fatores de correção de pressão, de temperatura de entrada e de temperatura ambiente, fornecidos pelo fabricante.

EXEMPLO RESOLVIDO

O secador que ficou pequeno

Um compressor fornece 10 m³/min. O secador ficará em ambiente de 35 °C, recebendo ar a 45 °C e 7 bar. Fatores do fabricante: 1,00 para 7 bar, 0,69 para entrada a 45 °C, 0,89 para ambiente de 35 °C. Que secador escolher?

01 Produto dos fatores: 1,00 × 0,69 × 0,89 = 0,614. Vazão nominal: 10 ÷ 0,614 = 16,3 m³/min.

Resposta: Um secador de catálogo de 16 a 17 m³/min, e não de 10. Escolhido pela vazão do compressor, renderia 60 % do necessário nos dias quentes, e o ponto de orvalho subiria para 15 ou 20 °C.

4.4 Filtragem, queda de pressão e destino do condensado

O óleo sai do compressor como névoa de gotículas de 0,01 a 1 µm, que atravessa um filtro de malha. O **pré-filtro** (5 a 40 µm) retém partículas e líquidos; o **coalescente**, uma manta de microfibras de vidro, junta as gotículas em gotas que escorrem para o dreno e deixa passar só 0,01 mg/m³ de óleo; o **carvão ativado** retém vapores e odores. Filtra-se do mais grosso para o mais fino: um coalescente sem pré-filtro satura em semanas, e um carvão ativado que recebe óleo líquido se esgota em horas.

Um elemento novo perde 0,05 a 0,15 bar; troca-se quando o indicador diferencial mostra 0,35 a 0,6 bar, ou uma vez por ano. Essa pressão foi produzida pelo compressor, e cada bar de perda custa cerca de 6,5 % da energia dele. Num compressor de 55 kW, 5 000 h por ano a R$ 0,80 por kWh, um filtro saturado com 0,5 bar a mais de perda custa 55 × 5 000 × 0,065 × 0,5 × 0,80 ≈ R$ 7 150 por ano, para adiar a troca de um elemento de R$ 1 200.

O QUE A NORMA DIZ

O condensado é resíduo perigoso

A água dos purgadores contém óleo, de dezenas a milhares de miligramas por litro. Não pode ir para a rede de esgoto, a pluvial ou o solo: os drenos vão a um separador de água e óleo, que libera água dentro dos limites legais de lançamento, e o óleo recolhido e os elementos usados têm destinação licenciada.

PARA LEVAR DESTE CAPÍTULO

1. Trata-se o ar até a qualidade que a aplicação exige, e nem um degrau além: a classe da **ISO 8573-1** se escreve na ordem partículas, água e óleo.
2. O **resfriador posterior** condensa de 60 a 75 % da água de graça, e o separador ciclônico retira 90 % ou mais da água líquida, mas nada do vapor.
3. Cada ponto de condensado precisa de um **purgador** testado toda semana: travado fechado devolve a água à rede, travado aberto é um vazamento permanente.
4. O **secador por refrigeração** dá ponto de orvalho sob pressão de +3 a +10 °C e gasta 1 a 3 % da energia do compressor; atende a grande maioria das redes internas.
5. O secador por adsorção chega a −20 a −70 °C, mas a purga consome de 15 a 20 % do ar na regeneração a frio, e o adsorvente exige coalescente antes.
6. O secador por refrigeração se escolhe pela vazão real dividida pelos fatores de pressão, temperatura de entrada e ambiente; cada 5 °C acima de 35 °C tiram 15 a 20 % da capacidade.
7. Filtra-se do mais grosso para o mais fino, e o elemento se troca entre 0,35 e 0,6 bar de perda, porque cada bar perdido custa cerca de **6,5 %** da energia do compressor.

PARA NÃO ESQUECER Q nominal = Q real ÷ (f pressão × f entrada × f ambiente)

4.5 Exercícios

Nível: ★ conceito · ★★ aplicação · ★★★ desafio

1 ★ A classe de qualidade do ar comprimido (ISO 8573-1) é escrita com três números. Eles se referem a:

a) Pressão, vazão e temperatura
b) Partículas, água e óleo
c) Nitrogênio, oxigênio e gás carbônico

2 ★ Uma câmara fria a −20 °C recebe ar comprimido para os atuadores das portas. Qual secador?

a) Adsorção, com orvalho de −40 °C
b) Refrigeração, com orvalho de 3 °C
c) Nenhum, basta o resfriador

3 ★ Um secador de adsorção de 10 m³/min, com purga fixa de 15 %, trabalha com 50 % de carga. Quanto ar vai para a purga?

a) 0,75 m³/min
b) 1,5 m³/min
c) 0,15 m³/min

4 ★★ Um secador por adsorção com regeneração a frio trata 10 m³/min de ar e gasta 15 % dessa vazão na purga. Quanto ar vai para a purga? Com potência específica de 6,5 kW por m³/min, 6 000 horas por ano e R$ 0,80 por kWh, quanto custa secar esse ar?

5 ★★ **Diagnóstico.** Numa rede com secador por refrigeração, os filtros das máquinas começam a encher de água líquida em poucas horas, todos os dias. O indicador do secador mostra ponto de orvalho de 3 °C, a temperatura normal. O tubo de saída do dreno do secador está seco, e o reservatório tem purgador eletrônico de nível, que drena normalmente. Qual é a causa provável e como confirmar?

6 ★★★ **Projeto.** A rede de uma fábrica tem ar classe 4.4.4, com secador por refrigeração, e um compressor de 65 kW que produz 10 m³/min, 5 000 h por ano, a R$ 0,80 por kWh. Uma nova cabine de pintura consumirá 1,2 m³/min e exige ar 1.4.1. O projetista propõe instalar três filtros (pré-filtro, coalescente e carvão ativado) na saída da sala, para tratar a fábrica inteira. Cada elemento novo perde 0,1 bar. Avalie a proposta e indique a solução, com a ordem dos filtros.

ANOTAÇÕES

CAPÍTULO 5 · O AR COMPRIMIDO

05 Rede de ar comprimido: traçado, tubos, perda e vazamentos

Entre o compressor e a máquina há dezenas, às vezes centenas, de metros de tubo. É nesse caminho que se perde boa parte do ar que custou caro para produzir: em um tubo fino demais, que obriga o compressor a trabalhar meio bar acima do necessário, em uma descida malfeita, que leva água para a máquina, e em vazamentos que ninguém mede. Este capítulo trata das quatro decisões da rede: o traçado, o material, o diâmetro e o controle dos vazamentos.

AO FIM DESTE CAPÍTULO, VOCÊ VAI

- Comparar os traçados de rede: linha aberta, anel fechado e malha.
- Aplicar as regras de montagem: inclinação, drenos, tomadas e válvulas de setor.
- Selecionar o material da tubulação, e reconhecer os que são proibidos.
- Dimensionar um tubo pela queda de pressão admissível e pela velocidade.
- Medir a taxa de vazamentos de uma instalação, e estimar o seu custo.

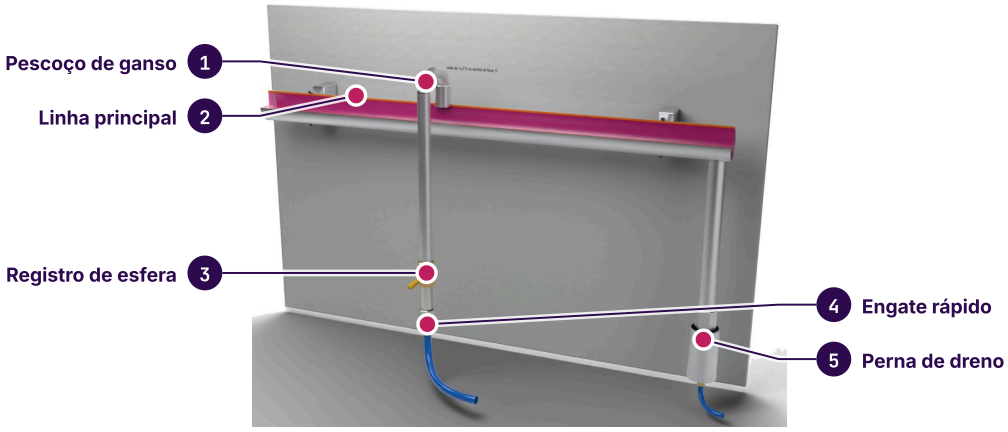


Figura 5.1 A tomada de ar em pescoço de ganso. Modelo 3D da aula, em corte. No lado maior, o conjunto mede cerca de 84 cm.

1. **Tomada por cima: pescoço de ganso.** O ar é tirado **por cima** da linha e desce em curva: a água que corre no fundo não entra na tomada.
2. **Linha principal com caída.** A linha desce de 1 a 2 % no sentido do fluxo: a água que condensa escorre pelo fundo até o ponto de dreno.
3. **Registro de esfera.** Fecha a tomada sem parar a rede, para trocar a mangueira ou mexer na máquina.
4. **Engate rápido.** Engate rápido com obturador: soltando a mangueira, ele fecha sozinho. Engates gastos são campeões de vazamento.
5. **Perna de dreno no ponto baixo.** No fim da descida, a água cai por um tê para baixo, num tubo de coleta com dreno. O ar continua pela linha.

em 3D e na sua mesa

5.1 O traçado e as regras de montagem

A **linha principal** sai da sala de compressores; a **linha de distribuição** percorre a produção; as **descidas**

levam o ar a cada máquina. O desenho da distribuição decide se a pressão será igual em todos os pontos, e para onde a água vai.

Tabela 5.1

Traçado	Como é	Vantagens	Limites
Linha aberta, ou ramificada	Um tubo principal, que termina em um ponto, com derivações ao longo dele	Simples, barato, usa menos tubo. Permite inclinação contínua para um dreno no fim	A pressão cai ao longo da linha: o último consumidor recebe menos. Manutenção em um trecho para tudo o que vem depois
Anel fechado	O tubo principal forma um circuito, e cada ponto é alimentado pelos dois lados	Pressão mais uniforme: a vazão se divide, e a perda cai a cerca de um quarto. Com válvulas de setor, isola-se um trecho sem parar o resto	Mais tubo. A água não tem um sentido único: exige drenos em vários pontos baixos
Malha	Um anel com ligações transversais	A melhor distribuição de pressão, para grandes áreas e consumos altos	Custo. Difícil de drenar: exige ar bem seco

Fonte: os três traçados de rede.

A Figura 5.1 mostra as regras que tratam da água: caída de 1 a 2 % no sentido do fluxo, tomada por cima e perna de dreno no ponto baixo. Completam a montagem as válvulas de setor, a válvula de bloqueio em cada descida e nenhum trecho fechado na ponta, que acumula água e ferrugem.

5.2 Materiais: o que pode e o que não pode

O **aço carbono** é barato, mas corrói por dentro com ar úmido: a crosta de ferrugem reduz o diâmetro útil e, em alguns anos, a perda de pressão pode dobrar. **Alumínio modular**, inox, cobre e plásticos certificados para ar mantêm por décadas a perda do primeiro dia; o alumínio, de encaixe rápido, é o padrão das instalações novas. Nos últimos metros, um engate rápido de passagem estreita custa de 0,3 a 0,6 bar, e uma mangueira de 6 mm com 10 m perde mais de 1 bar. E há um material proibido, como mostra o caso a seguir.

CASE REAL · ESTADOS UNIDOS, 20 DE MAIO DE 1988

O tubo de água que virou estilhaço

Nas décadas de 1970 e 1980, o PVC rígido de água fria tornou-se comum em oficinas americanas para distribuir ar: leve, barato, com pressão de trabalho impressa superior à da rede. Depois de uma sequência de acidentes, o órgão federal de segurança e saúde no trabalho dos Estados Unidos emitiu, em maio de 1988, um boletim de alerta. Em um dos casos, um trecho instalado a cerca de oito metros de altura em um depósito explodiu, e os fragmentos foram lançados a até dezoito metros.

A água é praticamente incompressível: o tubo que trinca perde a pressão no mesmo instante. O ar a 7 bar guarda a energia de toda a rede e se expande com violência. O PVC tem ruptura frágil, estilhaça, e envelhece: a pressão admissível, válida a 23 °C, cai a menos da metade a 50 °C. O boletim recomendou não usar PVC em ar comprimido acima do solo, a menos que enterrado ou totalmente encapsulado.

A lição: a pressão marcada em um tubo de água não vale para gás. Nunca usar PVC de água em ar comprimido, nem em extensão provisória; ao encontrar um, comunicar e planejar a troca.

Fontes: OSHA, Hazard Information Bulletin de 20/05/1988: uso de tubo de PVC em instalações aéreas de ar comprimido (casos no Texas); OSHA, Hazard Information Bulletin de 13/12/1990 (atualização sobre tubos termoplásticos)

5.3 O diâmetro pela queda de pressão

Pela fórmula prática, a perda cresce com a vazão elevada a quase 2, é proporcional ao comprimento e cai

com a **quinta potência** do diâmetro: com 2 m³/min a 7 bar, 100 m de tubo de 25 mm perdem 0,38 bar, e os de 32 mm, 0,11 bar. Na linha principal admitem-se 0,1 bar de perda e 6 a 10 m/s, no máximo. Curvas, tês e válvulas somam-se como **comprimento equivalente** (30 a 60 % do real, na falta de detalhe).

$$\Delta p = \frac{450 \cdot Q^{1,85} \cdot L}{d^5 \cdot p}$$

Fórmula prática de queda de pressão em tubo de aço: vazão Q de ar livre, em litros por segundo. Comprimento L, em metros. Diâmetro interno d, em milímetros. Pressão absoluta p, em bar. O resultado sai em bar.

EXEMPLO RESOLVIDO

O diâmetro de uma linha principal

Uma linha principal conduzirá 100 L/s de ar livre, 6 m³/min, por 120 m de comprimento real, com conexões que somam mais 40 m equivalentes, a 7 bar no manômetro. A queda admissível é de 0,1 bar. Que diâmetro adotar?

01 Comprimento total: 120 + 40 = 160 m. Pressão absoluta: 8 bar.

02 Com 50 mm: 450 × $100^{1,85}$ × 160 ÷ (50^5 × 8) = 0,144 bar. Acima do limite.

03 Com 65 mm: 450 × 5 012 × 160 ÷ (65^5 × 8) = 0,039 bar. Atende.

04 Velocidade em 65 mm: (0,100 ÷ 8) ÷ 0,00332 = 3,8 m/s.

Resposta: Tubo de 65 mm, com perda de 0,04 bar e velocidade de 3,8 m/s. O de 50 mm ficaria um pouco acima do limite hoje, e muito acima no dia em que a fábrica crescer 30 %: 0,23 bar. A diferença de custo entre os dois, em 120 metros, é pequena diante do que custa um bar a mais no compressor.

ERRO QUE CUSTA CARO

A rede dimensionada para a inauguração

A produção dobrou no mesmo tubo: a perda quase quadruplica, a última máquina reclama, alguém sobe a pressão do compressor e a fábrica inteira paga, para sempre, pelo trecho que ficou pequeno. Dimensiona-se para dez ou vinte anos.

5.4 Vazamentos: medir, localizar e controlar

Bem mantida, uma rede vaza até 5 a 10 % da vazão produzida; sem controle, 20 a 30 %. Com a produção parada, tudo o que o compressor produz é vazamento.

$$\text{vazamento} = Q_{\text{compressor}} \cdot \frac{t_{\text{carga}}}{t_{\text{carga}} + t_{\text{alívio}}}$$

Método do ciclo de carga: com todos os consumidores desligados e a rede pressurizada, mede-se, por vários ciclos, o tempo em que o compressor fica em carga e o tempo em alívio. A fração do tempo em carga, multiplicada pela vazão do compressor, é a vazão de vazamentos.

Com 6 m³/min, 3 minutos em carga e 9 em alívio, perdem-se 1,5 m³/min: em 6 000 h por ano, a 6,5 kW por m³/min e R$ 0,80/kWh, são R$ 46 800. Com a fábrica em operação, o **detector ultrassônico** localiza o som agudo do ar que escapa. Mede-se a cada três ou seis meses, consertando os maiores primeiro.

NA PRÁTICA

Onde a pressão realmente se perde

É comum perder 0,1 bar em 200 m de rede e 1,5 bar nos 5 m finais. Antes de subir o compressor, mede-se a pressão na ferramenta, em uso.

CASE REAL · DEVON, INGLATERRA, DE SETEMBRO DE 1847 A SETEMBRO DE 1848

A ferrovia vencida por uma tira de couro



Rosser1954, via Wikimedia Commons · CC BY-SA 4.0

Na ferrovia atmosférica, um êmbolo dentro de um tubo de ferro, entre os trilhos, puxava o primeiro vagão por uma haste. Bombas a vapor extraíam o ar à frente do trem, e a atmosfera empurrava o êmbolo. A haste passava por uma fenda no topo do tubo, fechada por uma aba de couro vedada com sebo.

Isambard Brunel adotou o sistema na ferrovia do sul de Devon, e os trens com passageiros começaram a circular em setembro de 1847, a mais de 100 quilômetros por hora. Mas a aba secava e rachava no verão, congelava no inverno e apodrecia. Pelas trincas o ar entrava, e as bombas passaram a trabalhar muito mais tempo, com mais carvão. Em meados de 1848, trocar toda a aba custaria mais do que a empresa suportava. Em setembro de 1848, Brunel recomendou o abandono, com prejuízo de centenas de milhares de libras.

A lição: o vazamento aparece como consumo, e não como falha. Se as horas em carga do compressor sobem sem que a produção suba, é vazamento.

Fontes: Grace's Guide to British Industrial History, Atmospheric Railway; Newton Abbot Town & GWR Museum, Atmospheric Railway (operação de setembro de 1847 a setembro de 1848; válvula de couro)

PARA LEVAR DESTE CAPÍTULO

1. A rede tem linha principal, linha de distribuição e descidas, montadas com **caída de 1 a 2 %** no sentido do fluxo, tomada por cima e perna de dreno no ponto baixo.
2. O aço carbono corrói por dentro e, em alguns anos, a perda pode dobrar; o **alumínio modular** mantém por décadas a perda do primeiro dia e é o padrão das instalações novas.
3. Tubo de PVC de água nunca serve para ar comprimido: a ruptura é frágil, o tubo estilhaça e o ar guarda a **energia de toda a rede**.
4. A perda de pressão cresce com a vazão elevada a quase 2, é proporcional ao comprimento e cai com a **quinta potência** do diâmetro; curvas e válvulas entram como comprimento equivalente.
5. Na linha principal admitem-se 0,1 bar de perda e de 6 a 10 m/s, e a rede se dimensiona para dez ou vinte anos, e não para a inauguração.
6. As maiores perdas costumam estar nos últimos metros, em engates e mangueiras: antes de subir o compressor, mede-se a pressão na ferramenta, em uso.
7. Uma rede bem mantida vaza 5 a 10 % do ar, e uma sem controle, 20 a 30 %; mede-se pelo ciclo de carga e localiza-se com o **detector ultrassônico**.

PARA NÃO ESQUECER $\Delta p = 450 \times Q^{1,85} \times L \div (d^5 \times p)$

5.5 Exercícios

Nível: ★ conceito · ★★ aplicação · ★★★ desafio

1 ★ Um eletricista sugere fazer o ramal com tubo de PVC de água, que "aguenta 10 bar". O que responder?

a) Não: o PVC estilhaça, e o ar guarda energia
b) Pode, se a rede ficar abaixo de 10 bar
c) Pode, desde que seja pintado de azul

2 ★ Mantendo a mesma vazão, o diâmetro interno do tubo é dobrado. A queda de pressão:

a) Cai pela metade
b) Cai cerca de 32 vezes
c) Cai a um quarto

3 ★ A ferramenta do fim da rede reclama de pressão baixa, mas o manômetro da sala marca 7 bar. Onde medir primeiro?

a) Na saída do compressor, de novo
b) No reservatório, com tudo parado
c) Na entrada da ferramenta, com ela em uso

4 ★★ Com a produção parada, um compressor de 10 m³/min fica 2 minutos em carga e 6 em alívio, e a rede passa assim 2 000 horas por ano. Qual é a vazão de vazamentos, e quantos m³ de ar livre se perdem por ano?

5 ★★ **Complete a tabela.** Um tubo de aço de 25 mm, com 100 m de comprimento, conduz 2 m³/min a 7 bar e perde 0,38 bar. Use as proporções da queda de pressão (vazão elevada a 1,85, comprimento, quinta potência do diâmetro) e complete a tabela, sempre a 7 bar. Em quais casos a perda atende o limite de 0,1 bar da linha principal?

Caso	Vazão	Comprimento	Diâmetro	Perda
Base	2 m³/min	100 m	25 mm	0,38 bar
1	2 m³/min	200 m	25 mm	
2	4 m³/min	100 m	25 mm	
3	2 m³/min	100 m	50 mm	

6 ★★★ **Projeto.** A linha principal de uma fábrica tem 100 m de tubo de 25 mm, com conexões que somam mais 30 m de comprimento equivalente, a 7 bar. Foi feita para 2 m³/min, mas a produção passou a consumir 4 m³/min, e a ampliação prevista leva o consumo a 5 m³/min em dez anos. A queda admissível é de 0,1 bar. Calcule a perda atual e escolha o diâmetro da nova linha entre 32, 40 e 50 mm. Use a fórmula prática do capítulo.

ANOTAÇÕES

CAPÍTULO 6 · PREPARAÇÃO DO AR E ATUADORES

06 Unidade de conservação: filtro, regulador e lubrificador

A rede entrega o ar tratado na entrada da máquina, mas ainda com alguma água, alguma sujeira e uma pressão que oscila a cada ciclo do compressor. Ali, um conjunto do tamanho de um livro decide se o ar chega limpo, na pressão exata e, quando preciso, com uma névoa de óleo. Montado na ordem errada, escolhido pela rosca do tubo ou com o regulador girado até o fim, ele estraga a máquina mais cara da linha e gasta ar todos os dias, sem que ninguém perceba.

AO FIM DESTE CAPÍTULO, VOCÊ VAI

- Identificar os componentes da unidade de conservação, e a ordem de montagem.
- Explicar o funcionamento do filtro de máquina e dos tipos de dreno.
- Explicar o funcionamento do regulador de pressão, com e sem alívio.
- Decidir quando lubrificar o ar, e ajustar um lubrificador.
- Dimensionar a unidade pela vazão, e reconhecer as válvulas de bloqueio e de partida suave.

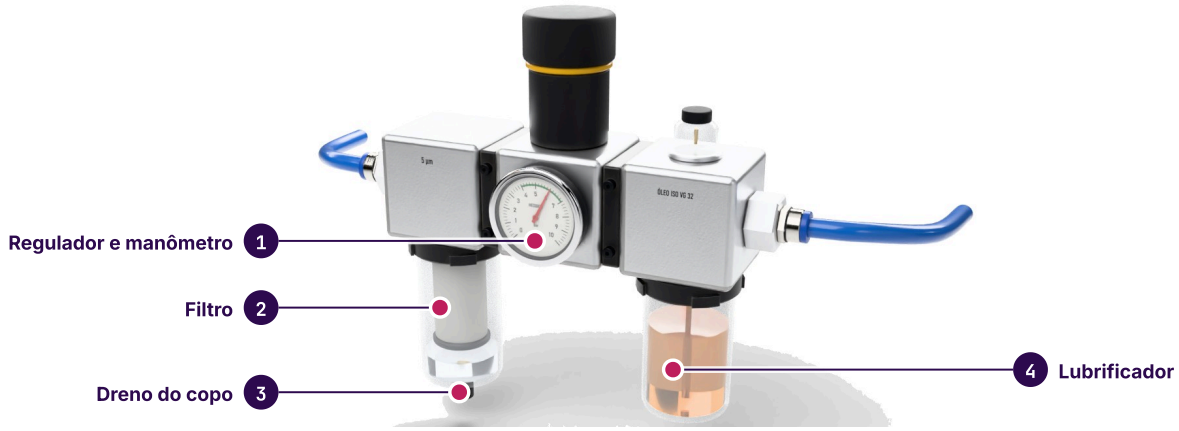


Figura 6.1 A unidade de conservação, peça por peça. Modelo 3D da aula, em corte. No lado maior, o conjunto mede cerca de 40 cm.

1. **Regulador e manômetro.** A manopla ajusta a mola, e a mola define a pressão de saída, mostrada no manômetro: aqui, 6 bar. O anel laranja trava o ajuste.
2. **Filtro com copo e elemento.** O ar gira no copo, a água e as partículas caem, e o elemento de 5 µm retém o resto.
3. **Dreno do copo.** Retira a água acumulada no fundo. O automático abre sozinho; o manual depende de alguém.
4. **Lubrificador.** Pinga óleo no ar na proporção do fluxo; a cúpula de cima mostra as gotas. Só onde o fabricante pede: depois de começar, não se pode parar.

em 3D e na sua mesa

6.1 O conjunto e a ordem de montagem

O ar passa primeiro pela válvula de fechamento, depois pelo **filtro**, pelo **regulador** e, por último, pelo **lubrificador**, quando existe. O filtro protege o regulador, cujas passagens e diafragma são sensíveis a sujeira. O lubrificador vem depois do regulador, e o mais perto possível do consumidor: em mais de 5 a 8 m de tubo,

ou em subidas, a névoa de óleo se deposita na parede.

A unidade fica na vertical, com o copo para baixo, em local visível e com a seta de fluxo gravada no corpo no sentido do ar: se ela for montada ao contrário, o filtro não separa a água e o regulador não regula. Cada máquina tem a sua, porque cada uma tem a sua pressão de trabalho.

6.2 O filtro: rotação, elemento e dreno

Aletas inclinadas fazem o ar girar dentro do copo, e as gotas de água e as partículas maiores são lançadas contra a parede e escorrem para o fundo, onde um defletor cria uma **zona calma** que impede que o líquido seja arrastado de volta. Depois, o ar atravessa o **elemento filtrante** (bronze sinterizado, polímero poroso ou malha), de fora para dentro, e nele ficam as partículas maiores que o grau de filtragem.

Tabela 6.1

Grau de filtragem	Onde se usa
40 micrômetros	O padrão para cilindros e válvulas comuns, e para ferramentas
5 micrômetros	Válvulas de assento pequeno, componentes de precisão, motores pneumáticos, e como pré-filtro de filtros finos
1 micrômetro, coalescente	Instrumentação, válvulas proporcionais
0,01 micrômetro, coalescente	Pintura, medição, ar em contato com produto, vácuo por ejetor em ambiente limpo
Carvão ativado	Remoção de vapores de óleo e de odor, depois de um coalescente

Fonte: graus de filtragem em unidades de conservação. Vale a exigência do fabricante do componente.

O dreno pode ser **manual**, **semiautomático** (abre a cada desligamento) ou **automático de boia**, para operação contínua. Se o condensado passa da marca de nível, a zona calma deixa de existir e a água vai de uma vez para a máquina: um filtro cheio é pior que nenhum filtro. O elemento é trocado a cada seis a doze meses, ou quando a queda entre entrada e saída passa de 0,5 bar. O copo de policarbonato trinca com solventes e óleos sintéticos, e copo trincado se troca na hora. E o filtro de máquina não seca o ar: retira água líquida, e não vapor.

6.3 O regulador: mola contra diafragma

A manopla comprime uma mola, que empurra o diafragma e abre o obturador. A pressão de saída age por baixo do diafragma, contra a mola, e o obturador quase fecha quando as duas forças se igualam: a pressão de saída é a que equilibra a mola. Se a saída sobe além do ajuste, o diafragma descobre um furo central e o excesso escapa para a atmosfera. Esse é o regulador **com alívio**, o mais comum. O **sem alívio** não tem o furo: para baixar a pressão, é preciso consumir o ar.

O regulador só reduz, e precisa de 0,5 a 1 bar de folga entre a rede e o ajuste. Quanto maior a vazão, mais a saída cai, e tanto mais quanto menor o regulador. A maioria dos reguladores de máquina é encontrada no máximo: um dia faltou força, alguém girou a manopla e ninguém voltou.

NA PRÁTICA

A pressão certa de cada máquina

Reduz-se a pressão aos poucos até o ciclo começar a falhar ou atrasar, volta-se meio bar e trava-se a manopla. O consumo é proporcional à pressão absoluta: de 6 para 5 bar, (5 + 1) ÷ (6 + 1) = 0,86, ou 14 % menos ar. E um regulador só na linha de recuo, a 3 bar, economiza 43 % de ar, em relação a 6 bar, no recuo de um cilindro que volta vazio.

CASE REAL · PARIS E BANDOL, DE DEZEMBRO DE 1942 A JUNHO DE 1943

O regulador que levou o homem ao fundo do mar



Tim Sheerman-Chase, via Wikimedia Commons · CC BY 4.0

Na França ocupada, Émile Gagnan, engenheiro de uma companhia francesa de gases industriais, tinha projetado para carros a gás um regulador de demanda, pequeno, de baquelite, que fornecia o gás na quantidade que o motor aspirasse. O tenente de marinha Jacques-Yves Cousteau procurava justamente isso: os aparelhos de mergulho davam ar em fluxo contínuo e esvaziavam os cilindros em minutos. Em dezembro de 1942, Cousteau visitou Gagnan em Paris.

O regulador tinha uma membrana: de um lado, a pressão da água; do outro, a câmara de onde o mergulhador aspira. Ao inspirar, a pressão na câmara cai, a membrana é empurrada e abre o ar comprimido; ao parar, a válvula fecha. No primeiro teste, em um rio perto de Paris, em janeiro de 1943, o aparelho funcionava na horizontal, mas de cabeça para cima o ar saía em fluxo livre. A saída de exalação ficava vários centímetros distante da membrana, e essa diferença de altura, debaixo d'água, era uma diferença de pressão. Aproximada a exalação, o defeito sumiu, e no verão de 1943, em Bandol, vieram centenas de mergulhos.

A lição: o regulador de mergulho é o deste capítulo com outra referência: no de máquina, uma mola define a saída; no de demanda, a pressão ambiente. Nos dois, o diafragma responde a tudo o que age sobre ele, inclusive diferenças de altura.

Fontes: Lemelson-MIT, Jacques-Yves Cousteau and Emile Gagnan; Cousteau Society, Cousteau's Aqua Lung (primeiro mergulho em junho de 1943, perto de Bandol); Wikipedia (inglês), Aqua-Lung e Émile Gagnan (encontro em dezembro de 1942; regulador derivado de um redutor de gás para carros)

6.4 Lubrificação, dimensionamento e partida

No lubrificador, o ar acelera em um estreitamento e a pressão cai (efeito Venturi), aspirando óleo até um visor, onde ele pinga em gotas contáveis que a corrente despedaça em névoa. O óleo acompanha a vazão de ar. Ajusta-se, como ordem de grandeza, de 1 a 5 gotas por 1 000 L de ar livre, com óleo mineral fino para pneumática (cerca de 32 cSt), nunca óleo de motor ou vegetal.

ERRO QUE CUSTA CARO

Uma vez lubrificado, sempre lubrificado

O óleo do ar lava a graxa de fábrica. Um componente que funcionou com ar lubrificado, por pouco tempo que seja, passa a depender do óleo: se o lubrificador for retirado ou secar, ele falha. Antes de instalar ou retirar um lubrificador, consulta-se o manual. Onde não é preciso, evita-se: o óleo sai pelos escapes e suja o produto e o ar do operador.

A unidade se escolhe pela **vazão de pico** da máquina, a do instante em que os cilindros maiores se movem juntos, e não pela rosca do tubo que chega. Pequena demais, derruba a pressão a cada movimento. A queda cresce com o quadrado da vazão: $\Delta p \approx 1\ \text{bar} \times (Q \div Q_{nominal})^2$, quando a vazão nominal é definida com 1 bar de queda. Uma máquina com pico de 1 600 L/min, em uma unidade de 1/4" de 1 200 L/min, perde $(1\,600 \div 1\,200)^2 = 1{,}8$ bar: regulada para 6 bar, recebe 4,2 no instante em que mais precisa. Com uma de 1/2", de 4 500 L/min, a queda é de 0,13 bar.

Na entrada, a **válvula de fechamento** de três vias corta a alimentação, descarrega o ar da máquina e aceita

cadeados: é a base do bloqueio para manutenção (capítulo 19). A **válvula de partida suave** pressuriza a máquina por um estrangulamento, para os cilindros irem devagar aos fins de curso, e abre a passagem plena perto de metade da pressão nominal.

CASE REAL · DENVER, COLORADO, DE 1925 A 1927

O lubrificador montado na cozinha

No início do século XX, as ferramentas pneumáticas tinham pistões e válvulas internas, metal contra metal em alta velocidade, que dependiam de lubrificação que o ar não fornecia. A cada hora, o operador despejava óleo na mangueira: excesso no primeiro minuto, que saía pelo escape em nuvem, e nada no resto do tempo. As ferramentas duravam pouco.

Carl Norgren, de Denver, enfrentava o problema nas ferramentas a ar e nos equipamentos de pintura com que trabalhava. A história da empresa registra um primeiro esboço em 1925 e a montagem, em casa, em 1927, de um lubrificador automático de linha, que aspirava o óleo gota a gota pela passagem do ar. Depois vieram o filtro de copo e o regulador, e o conjunto dos três virou o padrão da pneumática industrial. Desde as décadas de 1970 e 1980, graxas permanentes dispensam o óleo em cilindros e válvulas; o lubrificador segue indispensável onde nasceu, nas ferramentas.

A lição: a invenção resolveu um problema de dosagem, sem depender da memória de alguém. Lubrificar ou não se decide componente por componente, pelo manual do fabricante.

Fontes: Bimba (atual dona da marca), History: primeiro lubrificador de linha esboçado por Carl Norgren em 1925, para ferramentas a ar; Colorado Business Hall of Fame, Carl A. Norgren

PARA LEVAR DESTE CAPÍTULO

1. O ar passa pela válvula de fechamento, pelo **filtro**, pelo **regulador** e só então pelo lubrificador; a unidade fica na vertical, com o copo para baixo e a seta de fluxo no sentido do ar.
2. No filtro, as aletas fazem o ar girar, a água desce para a **zona calma** e o elemento filtrante retém as partículas; o elemento é trocado quando a queda passa de 0,5 bar.
3. Um copo de filtro acima da marca de nível manda a água de uma vez para a máquina, e o filtro de máquina retira água líquida, mas **não seca** o ar.
4. No regulador, a pressão de saída é a que equilibra a mola sobre o **diafragma**; ele só reduz e precisa de 0,5 a 1 bar de folga entre a rede e o ajuste.
5. O consumo de ar é proporcional à **pressão absoluta**: baixar o ajuste de 6 para 5 bar gasta (5 + 1) ÷ (6 + 1) = 0,86, ou 14 % menos ar.
6. O lubrificador dosa de 1 a 5 gotas por 1 000 L de ar livre, com óleo mineral fino, e um componente que recebeu ar lubrificado passa a **depender** do óleo.
7. A unidade se escolhe pela **vazão de pico**, e não pela rosca: a queda cresce com o quadrado da vazão, e uma unidade pequena rouba pressão no instante em que mais se precisa.

PARA NÃO ESQUECER $\Delta p \approx 1\ \text{bar} \times (Q \div Q_{\text{nominal}})^2$

6.5 Exercícios

Nível: ★ conceito · ★★ aplicação · ★★★ desafio

1 ★ O copo do filtro da máquina enche de água em meia hora. Qual é a causa mais provável?

a) O filtro está pequeno demais
b) O regulador está ajustado alto
c) Falta secador ou dreno na rede

2 ★ Com o cilindro parado, o técnico baixa o ajuste do regulador, mas a pressão de saída não cai. Por quê?

a) O manômetro está com defeito
b) O regulador é sem alívio
c) A rede está acima de 8 bar

3 ★ Cilindros com vedação pré-lubrificada receberam ar com óleo por meses, e o lubrificador foi retirado. O que acontece?

a) Nada, porque já tinham graxa de fábrica
b) Ficam mais rápidos e duram mais
c) Desgastam: o óleo lavou a graxa original

4 ★★ Um cilindro de 40 mm que fecha pacotes só precisa fazer 450 N, com fator de carga de 0,7. Qual é a menor pressão, em bar, em que o regulador pode ser ajustado? Quanto se economiza de ar em relação a 6 bar?

5 ★★ **Diagnóstico.** Depois de uma parada para manutenção, a unidade de conservação de uma envasadora foi recolocada na linha. No dia seguinte, o operador relata gotas de água saindo pelos escapes das válvulas, e o mecânico percebe que, ao girar a manopla do regulador, o manômetro de saída quase não responde e acompanha a pressão da rede. O copo do filtro está vazio e o dreno funciona. Qual é a causa provável e como confirmá-la sem desmontar nada?

6 ★★★ **Projeto.** Uma máquina de montagem tem vazão de pico de 2 000 L/min, a rede é estável em 7 bar e o processo exige pelo menos 5,0 bar nos cilindros durante o movimento. Há duas unidades de conservação em estoque: uma de 3/8 de polegada, com vazão nominal de 2 500 L/min, e uma de 1/2 polegada, com 4 500 L/min, ambas definidas para 1 bar de queda. Com o regulador em 6 bar, qual é a pressão no pico em cada uma? Qual delas permite baixar o ajuste para 5,5 bar, e quanto ar isso economiza?

ANOTAÇÕES

CAPÍTULO 7 · PREPARAÇÃO DO AR E ATUADORES

07 Cilindros pneumáticos: construção, tipos e montagem

Um tubo, um êmbolo e uma haste fazem quase todo o movimento de uma fábrica: prender, empurrar, levantar, expulsar. Em um cilindro normalizado, com ar seco e dentro dos limites de carga e velocidade, a vedação percorre de 5 000 a 10 000 quilômetros ao longo da vida. O que encurta essa vida quase nunca é o desgaste normal: é a água que lava a graxa, a sujeira que risca a camisa, a carga lateral e a pancada no fim do curso.

AO FIM DESTE CAPÍTULO, VOCÊ VAI

- Identificar as partes de um cilindro pneumático e a função de cada uma.
- Distinguir cilindros de simples ação, de dupla ação e as variantes construtivas.
- Explicar o amortecimento de fim de curso, e calcular a energia a absorver.
- Selecionar a fixação adequada, e reconhecer os efeitos da carga lateral.
- Reconhecer as normas dimensionais e os sensores de posição.

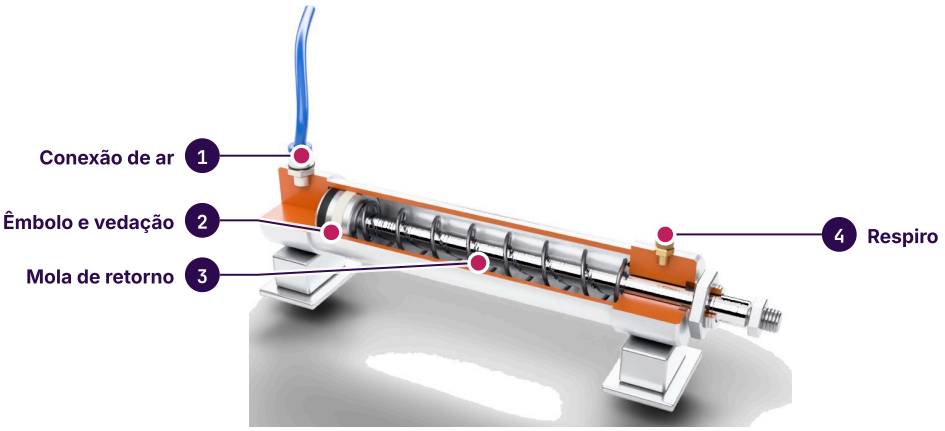


Figura 7.1 O cilindro de simples ação, em corte. Modelo 3D da aula, em corte. No lado maior, o conjunto mede cerca de 29 cm.

1. **Conexão de ar (só atrás).** O ar entra por uma única via e empurra o êmbolo: é o avanço.
2. **Êmbolo e vedação.** Uma vedação só, do lado do ar. O outro lado é a câmara da mola. O anel escuro é o ímã que aciona o sensor.
3. **Mola de retorno.** Quando a válvula escapa o ar, a **mola** devolve a haste. A força de avanço é a do ar **menos** a da mola.
4. **Respiro com filtro.** A câmara da mola não tem pressão: só respira, por um filtro de bronze sinterizado que impede a entrada de pó.

em 3D e na sua mesa

7.1 A construção e as vedações

No cilindro de dupla ação, o êmbolo divide o interior em duas câmaras. A **camisa**, de alumínio anodizado ou inox, tem rugosidade interna de décimos de micrômetro. A **haste**, de aço cromado duro, retificada e polida, atravessa o cabeçote dianteiro por uma **bucha de guia**, uma vedação e um **raspador**, que a limpa a cada recuo.

As **vedações** decidem a vida do cilindro. As de lábio são empurradas contra a parede pela própria pressão do ar e deslizam sobre uma película de graxa: não toleram riscos na camisa, cantos vivos nem funcionamento a seco. O poliuretano, o mais usado, vai de −20 a +80 °C. Abaixo de 10 a 20 mm/s, o atrito faz o êmbolo avançar aos trancos. A haste é a única parte móvel exposta, e qualquer risco ou respingo de solda nela destrói a vedação a cada passagem: nunca se segura a haste com alicate ou morsa, só pelo encaixe de chave da ponta.

7.2 Os tipos: quem faz a haste voltar

O de **simples ação** (Figura 7.1) serve para movimentos curtos, de fixar ou travar, e sempre que a posição sem ar precisa ser definida.

Tabela 7.1 Tipos de cilindro

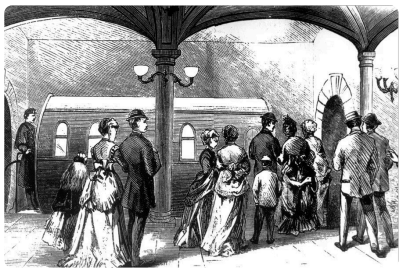
Tipo	Como funciona	Vantagens	Limites
Simples ação, retorno por mola	O ar empurra; a mola devolve	Uma linha de ar, metade do consumo, volta sozinho sem ar	A mola rouba força; curso até cerca de 100 mm
Dupla ação	O ar faz o avanço e o recuo	Força nos dois sentidos, cursos de metros, velocidade regulável	Duas linhas de ar; sem ar, fica onde estiver
Haste passante	A haste atravessa os dois cabeçotes	Mesma força nos dois sentidos, melhor guia	Ocupa o dobro do comprimento
Guiado	Hastes de guia paralelas	Suporta carga lateral e torque; não gira	Custo e tamanho

Fonte: tipos de cilindro de haste.

CASE REAL · NOVA YORK, 26 DE FEVEREIRO DE 1870

O metrô empurrado pelo ar

Alfred Ely Beach, inventor e editor de uma revista de divulgação científica, defendia o transporte pneumático para a Nova York sufocada pelas carroças. Com licença para um pequeno tubo de correio sob a Broadway, construiu em segredo, retirando a terra pelo porão de uma loja, um túnel de tijolos com cerca de 2,4 m de diâmetro e pouco menos de 100 m de comprimento.



Scientific American (1870), Linda Hall Library, via Wikimedia Commons · Domínio público

O vagão, para vinte e dois passageiros, tinha seção circular ajustada à do túnel, com folga de poucos centímetros: era, literalmente, um êmbolo. Um soprador de lóbulos movido a vapor criava atrás dele uma pressão de uma fração de quilopascal, que, sobre os quase cinco metros quadrados da face do vagão, bastava para movê-lo. No fim da linha, o soprador invertia o sentido e puxava o vagão de volta. A linha abriu em 26 de fevereiro de 1870 e levou cerca de 400 mil passageiros no primeiro ano. A extensão esbarrou na política e na crise de 1873; o túnel só foi reencontrado em 1912.

A lição: força é pressão vezes área: com metros quadrados, uma pressão minúscula move toneladas. O soprador que inverte o sentido é a válvula de um cilindro de dupla ação, e a folga do vagão é o que, no cilindro, vira uma vedação com tolerância de centésimos.

Fontes: nycsubway.org, Beach Pneumatic Transit (túnel feito em 58 dias, aberto em 26/02/1870); Scientific American, The First Subway in New York City Was a Cylindrical Car Pushed by Air; A. E. Beach, The Pneumatic Tunnel Under Broadway, Scientific American, 05/03/1870, p. 154

O de **dupla ação** é o padrão: como a haste ocupa parte da área do lado dianteiro, o recuo tem de 10 a 20 %

menos força. Com as câmaras abertas para a atmosfera, ele fica solto, e uma carga vertical desce: em eixos verticais usam-se retenções pilotadas ou trava de haste.

7.3 Amortecimento: a energia do fim do curso

Um êmbolo com carga, a um metro por segundo, precisa parar em poucos milímetros: se o amortecimento não absorve a energia do movimento, a tampa absorve. A energia cresce com o quadrado da velocidade.

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Energia cinética a absorver no fim do curso: metade da massa em movimento, em quilogramas, multiplicada pelo quadrado da velocidade, em metros por segundo. O resultado sai em joules. A massa inclui a carga, a haste e o êmbolo.

EXEMPLO RESOLVIDO

O amortecimento aguenta?

Um cilindro de 50 mm, com amortecimento pneumático capaz de absorver 7 J, move horizontalmente uma massa total de 30 kg. Qual é a velocidade máxima no fim do curso? E a 1,0 m/s, o que acontece?

01 Da energia: v = raiz de (2 × E ÷ m) = raiz de (2 × 7 ÷ 30) = 0,68 m/s.

02 A 1,0 m/s: E = 0,5 × 30 × 1,0² = 15 J.

Resposta: Até 0,68 m/s, o amortecimento do cilindro dá conta. A 1,0 m/s, são 15 joules, o dobro do limite: o êmbolo bate na tampa. As saídas são reduzir a velocidade com a válvula de controle de fluxo, usar um cilindro maior, ou instalar um amortecedor externo. Em movimento vertical para baixo, soma-se a energia da queda da massa durante o trecho de amortecimento.

Batentes elásticos servem para cilindros pequenos; o **amortecimento pneumático regulável**, padrão dos normalizados, forma um colchão de ar nos últimos 15 a 30 mm; o **amortecedor hidráulico externo** absorve dezenas a centenas de vezes mais. No pneumático, uma ponta do êmbolo fecha a saída principal, e o ar restante só escapa por um canal regulado por um parafuso de agulha: a pressão que sobe na câmara freia a massa. A capacidade cresce com o diâmetro: cerca de 4 J em um cilindro de 40 mm, 7 J no de 50 mm e 12 J no de 63 mm (vale o catálogo).

NA PRÁTICA

Regular o amortecimento

O parafuso de cada cabeçote é ajustado com a carga e a velocidade reais. Fechado demais, o êmbolo quica e demora a encostar; aberto demais, bate com estalo metálico, que solta tirantes e quebra cabeçotes. O certo é chegar ao fim sem pancada e sem recuar.

7.4 Fixação, carga lateral, sensores e normas

Fixação por **pés** ou **flange** é rígida, para carga guiada em linha reta; **articulação traseira** e **munhão** deixam o corpo oscilar quando a ponta da haste descreve um arco. Na ponta, olhal com rótula ou **acoplamento flutuante** compensam desalinhamentos. As normas fixam as cotas de montagem: ISO 6432 para os miniatura, ISO 15552 para os de perfil e tirantes (32 a 320 mm) e ISO 21287 para os compactos.

O ímã do êmbolo aciona **sensores** presos na ranhura do perfil: de lâminas (reed), simples, com contato que se desgasta, ou de estado sólido, mais rápidos e duráveis, com três condutores.

CASE REAL · ESSLINGEN, ALEMANHA, DE 1955 EM DIANTE

O grampo que virou indústria

A firma, fundada em 1925 em Esslingen, fazia máquinas para marcenaria. Na década de 1950, Kurt Stoll, filho de um dos fundadores, visitou fábricas americanas e viu o ar comprimido acionando dispositivos de fixação: um pequeno cilindro prendia a tábua em meio segundo, no lugar do grampo de rosca.

A empresa passou a fazer cilindros e válvulas para as próprias máquinas e, a partir de 1955 e 1956, a vendê-los. A mesma dupla prendia uma peça de metal, fechava uma embalagem, empurrava uma garrafa. Em poucos anos, a pneumática virou o negócio principal. Consolidaram a nova indústria a padronização, quando os fabricantes europeus acordaram dimensões comuns de fixação, e o ensino, com uma divisão de material didático criada em 1965, cujas bancadas foram adotadas por escolas técnicas de dezenas de países.

A lição: a norma existe para que um componente possa ser trocado por outro: ao especificar um cilindro, citar norma, diâmetro e curso garante a intercambialidade.

Fontes: Festo, History of Festo (fundação em 1925 como Fezer & Stoll; primeiros produtos pneumáticos em 1955); Deutsche Biographie, Stoll, Gottlieb

ERRO QUE CUSTA CARO

O cilindro não é guia

O cilindro empurra e puxa ao longo do eixo, e só ao longo dele. Carga em balanço na haste ou guia não paralela criam força lateral, suportada só pela bucha e pelo êmbolo, com braço de alavanca que cresce com o curso: a bucha e as vedações se gastam de um lado, aparece o vazamento e a haste empena. Guia-se a carga por fora.

PARA LEVAR DESTE CAPÍTULO

1. Um cilindro normalizado, com ar seco e dentro dos limites, percorre de 5 000 a 10 000 km; o que encurta a vida é água, sujeira, **carga lateral** e pancada no fim do curso.
2. As vedações de lábio deslizam sobre uma película de graxa, e a haste é a única parte móvel exposta: nunca se segura a **haste** com alicate ou morsa, só pelo encaixe de chave.
3. O cilindro de **simples ação** volta pela mola, gasta metade do ar e tem posição definida sem ar, mas a mola rouba força e limita o curso a cerca de 100 mm.
4. No cilindro de **dupla ação**, a haste ocupa parte da área dianteira, e o recuo tem de 10 a 20 % menos força; sem ar, ele fica solto e uma carga vertical desce.
5. A energia do fim do curso cresce com o **quadrado da velocidade**; o amortecimento pneumático absorve cerca de 4 J em 40 mm, 7 J em 50 mm e 12 J em 63 mm.
6. O parafuso de amortecimento se regula com a carga real: fechado demais, o êmbolo quica; aberto demais, bate com estalo metálico que solta tirantes e quebra cabeçotes.
7. Fixação rígida serve para carga guiada em linha reta, articulação para a ponta que descreve arco, e a norma **ISO 15552** garante a troca entre fabricantes.

PARA NÃO ESQUECER $E = \frac{1}{2} \times m \times v^2$

7.5 Exercícios

Nível: ★ conceito · ★★ aplicação · ★★★ desafio

1 ★ A porta de uma máquina precisa fechar sozinha se faltar ar. Qual cilindro?

a) Dupla ação, comandado por válvula 5/2
b) Simples ação, com retorno por mola
c) Dupla ação, com haste passante

2 ★ O amortecimento do cilindro absorve até 7 J, e a carga chega com 9,6 J. O que fazer?

a) Reduzir a velocidade ou usar amortecedor externo
b) Apertar mais o parafuso de amortecimento
c) Aumentar a pressão da linha

3 ★ Por que especificar cilindros conforme a ISO 15552?

a) Porque são sempre mais baratos
b) Troca por outro fabricante sem mudar a máquina
c) Porque dispensam o amortecimento

4 ★★ Curso de 200 mm, 30 ciclos por minuto, 16 h por dia, 250 dias por ano: quantos quilômetros a vedação percorre por ano? Com vida de 10 000 km, quanto ela dura?

5 ★★ **Complete a tabela.** Complete a tabela com a energia que chega ao fim do curso e diga se o amortecimento pneumático interno basta, usando as capacidades típicas de 4 J (40 mm), 7 J (50 mm) e 12 J (63 mm). Linha 1: cilindro de 40 mm, carga de 10 kg, 0,8 m/s, energia ___ J, basta? ___. Linha 2: 50 mm, 20 kg, 0,9 m/s, energia ___ J, basta? ___. Linha 3: 63 mm, 25 kg, 0,9 m/s, energia ___ J, basta? ___. Linha 4: 63 mm, 25 kg, 1,0 m/s, energia ___ J, basta? ___.

6 ★★★ **Diagnóstico.** Um cilindro de 50 mm, preso por flange dianteira, empurra uma alavanca articulada que gira em torno de um pino, de modo que a ponta da haste descreve um arco. Após três meses, aparece vazamento pela vedação da haste; a bucha de guia está gasta só no lado de cima e a haste tem uma faixa brilhante de um lado. Trocadas as vedações, o vazamento volta em três semanas. Qual é a causa, como confirmá-la e qual é a solução definitiva?

ANOTAÇÕES

CAPÍTULO 8 · PREPARAÇÃO DO AR E ATUADORES

08 Dimensionamento de cilindros: força, flambagem e consumo

Escolher um cilindro é responder a três perguntas, nesta ordem. Ele tem **força** para o trabalho? A **haste** aguenta essa força sem dobrar? E quanto **ar** ele vai gastar? A primeira decide o diâmetro; a segunda limita o curso; a terceira decide a válvula, a tubulação e uma parte da conta de energia da fábrica por toda a vida da máquina. Este capítulo trata das três contas, na ordem em que o projetista as faz.

AO FIM DESTE CAPÍTULO, VOCÊ VAI

- Calcular a força teórica de avanço e de recuo de um cilindro.
- Aplicar atrito e fator de carga para obter a força útil, e dimensionar o diâmetro.
- Verificar a haste quanto à flambagem, conforme a fixação.
- Calcular o consumo de ar de um cilindro, e o seu custo.
- Estimar a vazão de pico, para dimensionar válvulas e tubos.

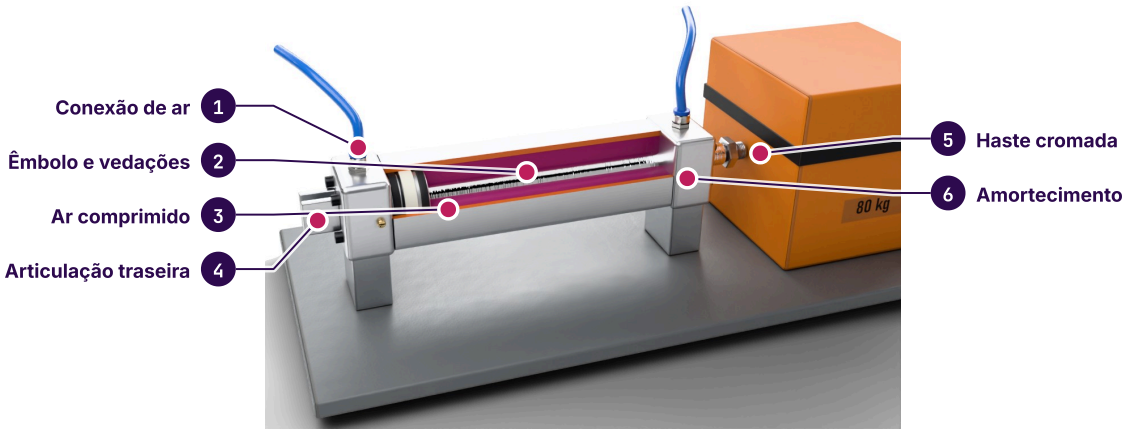


Figura 8.1 O cilindro da ME-03, por dentro e em tamanho real. Modelo 3D da aula, em corte. No lado maior, o conjunto mede cerca de 85 cm.

1. **Conexão de ar e tubo.** O tubo entre a válvula e o cilindro também é enchido e esvaziado: tubo longo é consumo sem trabalho.
2. **Êmbolo, vedações e fita guia.** As duas **vedações pretas** separam as câmaras; o atrito delas come de 10 a 15 % da força teórica.
3. **Ar comprimido na câmara traseira.** No avanço, o ar entra por trás e empurra a **face inteira do êmbolo**: é a área $\pi \cdot D^2/4$ da fórmula.
4. **Articulação traseira.** Preso por olhal com pino, o cilindro pode oscilar: com a carga articulada, o comprimento de flambagem é **o dobro do curso**.
5. **Haste cromada.** No recuo, o ar empurra só o **anel em volta da haste**. Em compressão, é ela que pode **flambar**.
6. **Parafuso de amortecimento.** Regula o freio de ar no fim do curso. Quanto maior a massa e a velocidade, mais importante ele fica.

em 3D e na sua mesa

8.1 Pressão vezes área, no avanço e no recuo

A força teórica é a pressão manométrica multiplicada pela área em que ela age: a face inteira do êmbolo no

avanço e o anel em volta da haste no recuo (Figura 8.1, partes 2 e 5).

$$F_{avanço} = p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \qquad F_{recuo} = p \cdot \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4}$$

Forças teóricas: pressão manométrica multiplicada pela área. D é o diâmetro do êmbolo, e d, o da haste. Com a pressão em bar e as áreas em centímetros quadrados, o produto, multiplicado por 10, dá a força em newtons.

Tabela 8.1 **Forças teóricas a 6 bar**

Êmbolo	Haste	Área de avanço	Área de recuo	Força de avanço	Força de recuo
32 mm	12 mm	8,04 cm²	6,91 cm²	483 N	415 N
40 mm	16 mm	12,6 cm²	10,6 cm²	754 N	633 N
50 mm	20 mm	19,6 cm²	16,5 cm²	1 178 N	990 N
63 mm	20 mm	31,2 cm²	28,0 cm²	1 870 N	1 682 N
80 mm	25 mm	50,3 cm²	45,4 cm²	3 016 N	2 721 N
100 mm	25 mm	78,5 cm²	73,6 cm²	4 712 N	4 418 N

Fonte: forças teóricas dos cilindros normalizados, a 6 bar. Para outra pressão, multiplica-se por p ÷ 6.

A força cresce com o quadrado do diâmetro: de um tamanho da série ao seguinte, cerca de 60 %. O recuo é mais fraco (16 % menos no cilindro de 50 mm): quando o trabalho é feito puxando, dimensiona-se pela área de recuo.

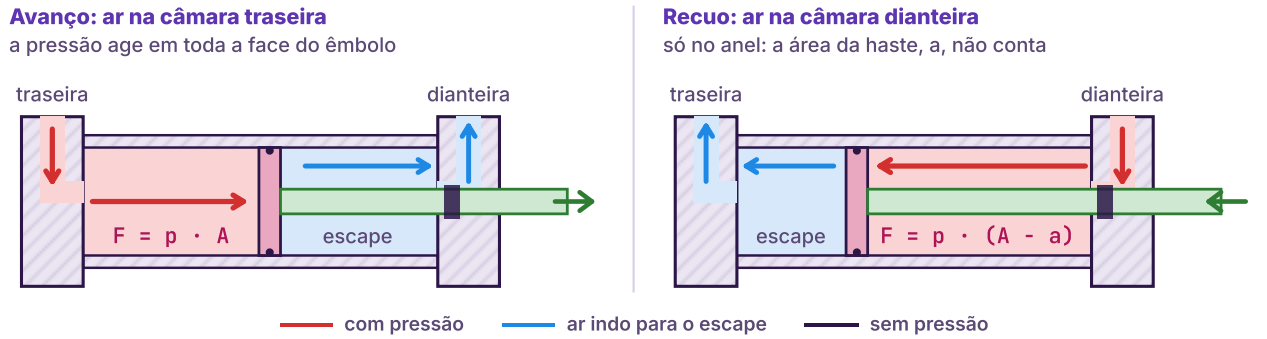


Figura 8.2 O cilindro de dupla ação em corte esquemático. No avanço, a pressão age na face inteira do êmbolo; no recuo, só no anel em volta da haste, e a força é menor. O ar da câmara oposta sai pelo escape. No QR, a figura no celular, situação por situação.

8.2 A força útil: atrito e fator de carga

As vedações e a bucha consomem de 10 a 15 % da força teórica em cilindros médios, e mais de 20 % nos pequenos ou em pressão baixa. E a força precisa sobrar: se fosse igual à carga, o êmbolo ficaria parado, em equilíbrio. A folga acelera a carga e vence a contrapressão da outra câmara. O **fator de carga** η é a razão entre a força que a carga exige e a força teórica: a força teórica necessária é a da carga dividida por η.

A força da carga, na elevação vertical, é o peso (massa × 9,81); no deslizamento horizontal, o peso vezes o coeficiente de atrito (0,01 a 0,05 em guias de rolamento, 0,3 a 0,5 em mesa seca); na fixação, o aperto pedido pelo processo. Usa-se a pressão disponível na máquina, em geral 5 a 6 bar.

EXEMPLO RESOLVIDO

O cilindro para elevar uma carga

Um cilindro deve elevar, na vertical, uma massa de 80 kg, incluindo a mesa, com velocidade normal. A pressão disponível é de 6 bar. Que diâmetro adotar?

01 Força da carga: 80 × 9,81 = 785 N.

02 Fator de carga para movimento normal: 0,5.

03 Força teórica necessária: 785 ÷ 0,5 = 1 570 N.

04 Área: 1 570 ÷ (6 × 10) = 26,2 cm². Diâmetro: raiz de (26,2 × 4 ÷ π) = 5,77 cm.

05 Diâmetro normalizado acima de 57,7 mm: 63 mm, com 1 870 N teóricos.

06 Fator de carga real: 785 ÷ 1 870 = 0,42.

Resposta: Cilindro de 63 mm. O de 50 mm, com 1 178 N teóricos, ergueria a carga, com fator de 0,67: devagar, e sensível a qualquer variação de pressão ou de atrito. O de 63 mm sobra um pouco, e a pressão pode ser reduzida para 5 bar, o que dá fator de 0,50 e economiza 14 % de ar. Na descida, o problema é o oposto: a carga ajuda, e é preciso controlar a velocidade.

O exemplo usou 0,5. Os fatores usuais são até 0,85 para força estática (fixar, prender), até 0,7 para movimento lento sob carga, 0,5 a 0,6 para o movimento normal e 0,3 a 0,5 para movimento rápido. Quanto menor o fator, mais rápido e regular o movimento, e maior o cilindro. Calcula-se o diâmetro, adota-se o normalizado imediatamente acima e confere-se o fator real.

CASE REAL · NOVA YORK E DENVER, DE 1871 A 1897

A fazedora de viúvas

A perfuratriz de rocha a ar comprimido virou produto comercial com um modelo patenteado em 1871 por Simon Ingersoll, mecânico e inventor de Nova York. Montada em um tripé, um êmbolo movido pelo ar golpeava a rocha com a própria broca, presa a ele. A potência vinha dos golpes por minuto, limitados pela vazão da mangueira. Consumia de 2 a 4 m³ de ar livre por minuto, a potência de um compressor de 15 a 25 kW.

A broca, em rocha seca, levantava pó de sílica que o ar do escape espalhava pela galeria. Respirado por anos, o pó causa silicose, e os operadores das minas do oeste americano morriam com trinta ou quarenta anos. Em 1897, John Leyner, de Denver, lançou uma perfuratriz de broca oca, com um jato de água que transformava o pó em lama. Nela, um martelo interno leve batia na broca encostada na rocha: menos massa em movimento, mais golpes e mais furo por metro cúbico de ar. A perfuração com água tornou-se obrigatória por lei em vários estados.

A lição: o projeto pneumático inclui o que sai pelo escape. E a máquina de Leyner fazia mais com menos ar porque reduziu a massa acelerada a cada ciclo: em mecanismo rápido, a massa em movimento define o diâmetro, o consumo e o amortecimento.

Fontes: ASME, Simon Ingersoll (biografia, patente básica da perfuratriz em 1871 e montagem em tripé); Google Patents, US 112254, Improvement in rock-drills, S. Ingersoll, 1871; National Mining Hall of Fame, John George Leyner (perfuratriz a ar de 1897 e versão com água); ASME, John George Leyner (broca oca com água e ar; proibição da perfuração a seco)

8.3 Flambagem: quando o curso longo limita a força

Uma barra esbelta comprimida pelas pontas não falha por esmagamento: a partir de certa força, curva-se de lado, de modo súbito. A força crítica cai com o **quadrado do comprimento** e cresce com a **quarta potência** do diâmetro da haste. O comprimento da conta não é o curso, e sim o **comprimento de flambagem**, que

depende de como o corpo e a ponta da haste estão presos.

$$F_k = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_k^2} \qquad I = \frac{\pi \cdot d^4}{64} \qquad F_{adm} = \frac{F_k}{S}$$

Força crítica de flambagem, pela fórmula de Euler: E é o módulo de elasticidade do aço, 210 000 N/mm². I, o momento de inércia da seção da haste. Lk, o comprimento de flambagem. A força admissível é a crítica dividida por um coeficiente de segurança S, de 3,5 a 5.

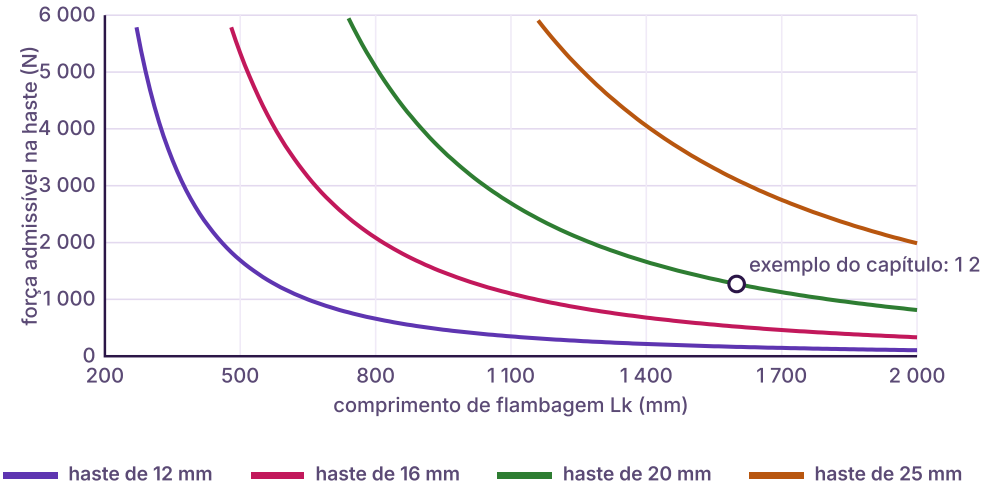


Figura 8.3 Força admissível na haste pelo comprimento de flambagem, pela fórmula de Euler, com aço (E = 210 000 N/mm²) e coeficiente de segurança 5. Dobrar o comprimento divide a força por quatro; engrossar a haste de 16 para 20 mm a multiplica por 2,4. O ponto marcado é o exemplo do capítulo.

O comprimento de flambagem vale 0,5 vez o curso com flange dianteira e carga rigidamente presa e guiada, 0,7 vez com carga articulada e guiada, 2 vezes com articulação traseira e carga articulada e guiada, e 4 vezes com fixação rígida e carga na ponta, sem guia. Um cilindro de 50 mm, com haste de 20 mm ($I = \pi \times 20^4 \div 64 = 7\,854$ mm^4), articulado atrás e com 800 mm de curso, tem L_k = 1,6 m: a força crítica é $\pi^2 \times 210\,000 \times 7\,854 \div 1\,600^2 = 6\,359$ N, e a admissível, com segurança de 5, 1 272 N. Passa, no limite, para os 1 178 N do cilindro. Com 1 000 mm, cairia para 814 N.

Verifica-se sempre que o curso passa de 10 a 15 vezes o diâmetro do êmbolo, ou quando o cilindro empurra articulado nas duas pontas. As saídas: mudar a fixação, guiar a carga, usar haste reforçada, trabalhar em tração ou, para cursos de metros, usar cilindro sem haste (capítulo 9).

8.4 Quanto ar por ciclo, por minuto e no pico

A cada curso, o cilindro é enchido com ar na pressão de trabalho, que no curso seguinte vai para a atmosfera. Pela lei de Boyle (capítulo 2), o volume varrido vezes a pressão absoluta dá o ar livre consumido. No simples ação, só o avanço consome.

$$V_{ciclo} = (A_{avanço} + A_{recuo}) \cdot s \cdot (p + 1) \qquad Q = V_{ciclo} \cdot n$$

Consumo de ar livre por ciclo completo, de avanço e recuo: soma das duas áreas, multiplicada pelo curso s e pela pressão absoluta, em bar. Com áreas em cm² e curso em cm, dividindo por 1 000, o resultado sai em litros. O consumo por minuto é o do ciclo multiplicado pelo número de ciclos por minuto, n.

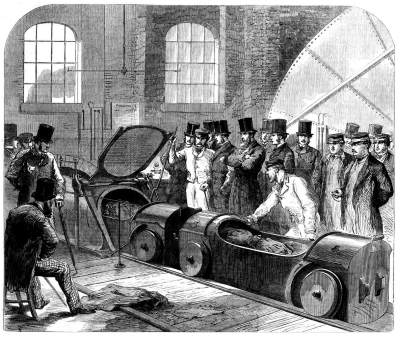
Um cilindro de 50 mm, com haste de 20 mm e curso de 200 mm, a 6 bar, gasta (19,63 + 16,49) × 20 × 7 ÷ 1 000 = 5,06 L de ar livre por ciclo; com 30 ciclos por minuto, 152 L/min. A fórmula não conta os tubos entre a válvula e o cilindro, enchidos e esvaziados a cada ciclo (2 m de tubo de 6 mm de diâmetro interno têm 57

cm³), nem volumes mortos e vazamentos: acrescentam-se de 10 a 30 %.

CASE REAL · LONDRES, DE 1863 A 1874

O correio que andava de tubo

Na década de 1850, as malas postais levavam mais tempo entre as estações e as agências de Londres, a cavalo, do que entre as cidades, de trem. A companhia pneumática de despacho de Londres, fundada em 1859, propôs um tubo de ferro fundido em forma de ferradura, com cerca de 80 cm de altura, por onde corriam vagonetes com abas de borracha ajustadas à seção. Um ventilador a vapor de mais de seis metros soprava para empurrá-los e aspirava para trazê-los de volta.



Gravura anônima (1863), via Wikimedia Commons · Domínio público

A primeira linha, de cerca de 600 m, a partir da estação de Euston, entrou em serviço em 1863: quinze malas por vagonete, em cerca de um minuto, a 40 km/h. Era um cilindro de quilômetros com um êmbolo solto: poucos quilopascals sobre meio metro quadrado, e o volume do tubo inteiro gasto a cada viagem, com a máquina ligada o dia todo, houvesse ou não malas. O ganho sobre as carroças, de cerca de quatro minutos por viagem, não compensava o preço: em 1874, o correio deixou de usar o serviço.

A lição: a energia de um sistema pneumático é proporcional ao volume enchido a cada ciclo e à pressão: um tubo de quilômetros, enchido a cada viagem para mover algumas dezenas de quilos, gasta quase toda a energia movendo ar.

Fontes: Grace's Guide to British Industrial History, Pneumatic Despatch Co; Wikipedia (inglês), London Pneumatic Despatch Company: fundação em 1859, linha de Euston em 20/02/1863, fim em 1874

NA PRÁTICA

Onde se economiza ar em cilindros

Diâmetro calculado, e não o maior que cabe: cada degrau da série custa cerca de 60 % a mais de ar, para sempre. Pressão regulada ao mínimo que faz o trabalho: cada bar a menos, cerca de 14 % a menos. Recuo em pressão reduzida quando o cilindro volta vazio (capítulo 6), simples ação onde a mola basta e válvula perto do cilindro.

O consumo por minuto é uma média. Durante o movimento, a vazão é a área vezes a velocidade vezes a pressão absoluta: o mesmo cilindro, avançando os 200 mm em 0,4 s, pede 19,63 × 50 × 7 ÷ 1 000 = 6,87 L/s, ou 412 L/min, enquanto se move. É a **vazão de pico** que escolhe a válvula, as conexões e a unidade de conservação.

ERRO QUE CUSTA CARO

Força teórica igual à carga

Escolher o cilindro cuja força de tabela empata com a carga é o erro mais comum: sem sobra, o êmbolo não acelera, e qualquer queda de pressão ou aumento de atrito o deixa lento ou parado. O erro oposto, subir tamanhos por garantia, se paga em ar todos os dias. Os dois se evitam com a mesma conta, a do fator de carga.

PARA LEVAR DESTE CAPÍTULO

1. A força teórica é pressão vezes área: a face do êmbolo no avanço e o **anel** no recuo; a 6 bar, o cilindro de 50 mm faz 1 178 N e 990 N.
2. A força cresce com o quadrado do diâmetro, e cada degrau da série normalizada dá cerca de 60 % mais força e, para sempre, cerca de 60 % mais consumo de ar.
3. A força teórica necessária é a força da carga dividida pelo **fator de carga**: até 0,85 para fixar, até 0,7 para movimento lento, 0,5 a 0,6 no normal e 0,3 a 0,5 no rápido.
4. Adota-se o diâmetro normalizado imediatamente acima do calculado e confere-se o fator real: força de tabela igual à carga deixa o êmbolo parado em equilíbrio.
5. Na **flambagem**, a força crítica cai com o quadrado do comprimento de flambagem e cresce com a quarta potência do diâmetro da haste; verifica-se em cursos acima de 10 a 15 diâmetros.
6. O consumo por ciclo é o volume varrido vezes a **pressão absoluta**: 50 mm, 200 mm de curso e 6 bar gastam 5,06 L de ar livre, mais 10 a 30 % de tubos.
7. A média por minuto paga a energia, mas é a **vazão de pico**, área vezes velocidade vezes pressão absoluta, que escolhe a válvula, as conexões e a unidade de conservação.

PARA NÃO ESQUECER $F_{teórica} = p \times A = F_{carga} \div \eta$

8.5 Exercícios

Nível: ★ conceito · ★★ aplicação · ★★★ desafio

1 ★ Uma prensa de fixação usa cilindro de 40 mm a 6 bar e precisa apertar a peça com 600 N. O colega diz que "sobra força". Ele está certo?

a) Não: 754 N menos 600 N deixa só 154 N, menos que o atrito
b) Sim: com 15 % de atrito, a força útil fica perto de 640 N
c) Não dá para saber sem conhecer o curso do cilindro

2 ★ Num cilindro articulado nas duas pontas, o curso foi dobrado de 800 para 1 600 mm, com a mesma força. O que acontece com a força admissível da haste?

a) Cai pela metade, na mesma proporção do curso
b) Cai para um quarto, porque depende do comprimento ao quadrado
c) Não muda, porque a haste continua a mesma

3 ★ O cilindro pede 412 L/min **durante** o avanço e 152 L/min na média do minuto. Por qual valor se escolhe a válvula?

a) Pelo pico: mais de 412 L/min, com folga
b) Pela média: 200 L/min já cobrem 152
c) Tanto faz: a velocidade se acerta no regulador

4 ★★ A garra que segura a chapa em uma prensa de dobra usa um cilindro de dupla ação de 32 mm, com haste de 12 mm e curso de 80 mm, a 5 bar, fazendo 45 ciclos por minuto. Quantos litros de ar livre por minuto ela consome, sem contar tubos e volumes mortos?

5 ★★ **Complete a tabela.** Complete a tabela escolhendo o cilindro normalizado pela Tabela 8.1 (6 bar). Linha 1: fixar uma peça com 1 200 N, η = 0,85; força teórica necessária ___ N; cilindro ___. Linha 2: elevar 40 kg na vertical, devagar, η = 0,7; força da carga ___ N; força teórica ___ N; cilindro ___. Linha 3: empurrar uma caixa de 150 kg sobre mesa seca (μ = 0,35), movimento normal, η = 0,5; força da carga ___ N; força teórica ___ N; cilindro ___. Linha 4: puxar uma comporta no recuo com 900 N, η = 0,6; força teórica ___ N; cilindro ___.

6 ★★★ **Projeto.** Um cilindro de 63 mm, com haste de 20 mm (I = 7 854 mm⁴, aço com E = 210 000 N/mm²), empurra a 6 bar uma carga articulada e guiada, com o corpo preso por articulação traseira, e curso de 700 mm. A força teórica de avanço é 1 870 N e a segurança à flambagem é 5. A haste aguenta? Se não, qual é o maior curso nessa montagem, e que alternativas resolvem sem reduzir o curso?

ANOTAÇÕES

CAPÍTULO 9 · PREPARAÇÃO DO AR E ATUADORES

09 Atuadores especiais: giro, garras, vácuo e motores

Nem todo movimento de máquina é uma linha reta entre dois batentes. A mesa precisa girar um quarto de volta, o carro precisa percorrer três metros em um corredor curto, a garra precisa segurar a peça sem deixá-la escorregar, a chapa lisa só pode ser erguida pelo vácuo e a ferramenta precisa girar sem parar. Em todos esses casos, a regra continua sendo pressão vezes área. O que muda é a carga: a **inércia** no giro, o **atrito** na garra, a **atmosfera** na ventosa. Este capítulo mostra a conta de cada um.

AO FIM DESTE CAPÍTULO, VOCÊ VAI

- Calcular o torque de um atuador giratório, e verificar a energia do giro.
- Escolher entre cilindros sem haste, guiados, tandem e de várias posições.
- Dimensionar a força de pega de uma garra.
- Dimensionar ventosas, e entender o funcionamento do gerador de vácuo.
- Interpretar a curva de torque e de potência de um motor pneumático.

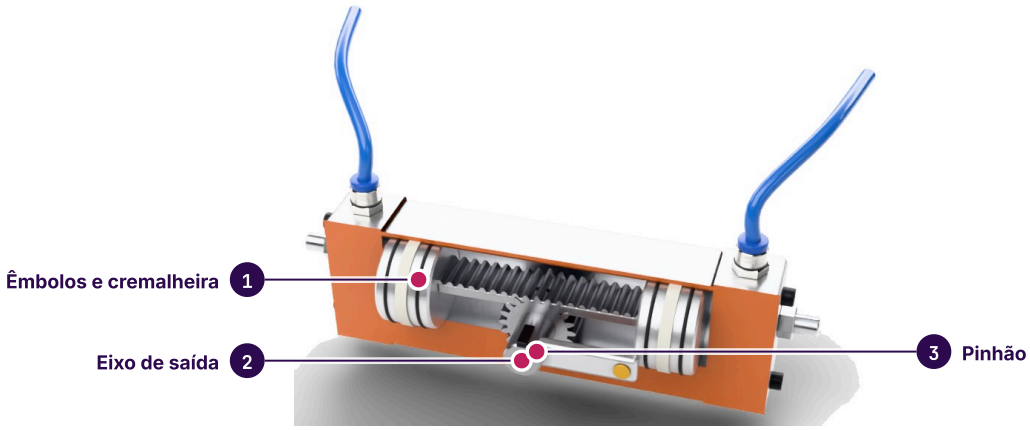


Figura 9.1 O atuador giratório de pinhão e cremalheira. Modelo 3D da aula, em corte. No lado maior, o conjunto mede cerca de 24 cm.

1. **Êmbolos e cremalheira.** O ar empurra os dois êmbolos, presos à cremalheira, que se desloca em linha reta.
2. **Eixo de saída.** Gira 90° a cada curso, levando a carga presa nele (aqui, o braço). Os parafusos nas pontas ajustam o ângulo final.
3. **Pinhão.** A cremalheira gira o pinhão: o torque é a força nos êmbolos vezes o raio primitivo.

em 3D e na sua mesa

9.1 Giro limitado: torque e energia da parada

No atuador de pinhão e cremalheira (Figura 9.1), o torque é a força do êmbolo vezes o raio primitivo do pinhão: $M = p \cdot A \cdot r$. Um êmbolo de 40 mm (12,57 cm²) a 6 bar faz 754 N; com raio primitivo de 15 mm, o torque teórico é 754 × 0,015 = **11,3 N·m**. Como nos cilindros, o torque exigido em movimento não deve passar de metade do teórico.

Em um giro rápido, porém, sustentar o peso é a parte pequena do trabalho. A parte grande é acelerar e, sobretudo, **parar** a massa que gira. Quem mede isso é o momento de inércia J, que depende da massa e do quadrado da distância dela ao eixo: m · r² para uma massa concentrada, m · L² ÷ 3 para uma barra girando pela ponta. A energia do giro precisa ser absorvida na parada, pelo batente ou pelo amortecedor.

$$E = \frac{J \cdot \omega^2}{2} \qquad \omega \approx \frac{2 \cdot \theta}{t}$$

Energia cinética de uma massa em giro: J é o momento de inércia, em kg·m², e ω, a velocidade angular, em radianos por segundo. Para um giro de ângulo θ, em radianos, feito no tempo t, com aceleração constante, a velocidade final é aproximadamente o dobro da média.

EXEMPLO RESOLVIDO

A energia de um giro

Um giratório move, em 180 graus, um braço de 0,5 kg e 30 cm, girando pela ponta, com uma garra e peça de 2 kg na extremidade. O giro leva 0,5 segundo. Qual é a energia a absorver na parada?

01 Inércia do braço: 0,5 × 0,3² ÷ 3 = 0,015 kg·m².

02 Inércia da garra com a peça: 2 × 0,3² = 0,18 kg·m². Total: 0,195 kg·m².

03 Velocidade angular final: 2 × 3,14 ÷ 0,5 = 12,6 rad/s.

04 Energia: 0,195 × 12,6² ÷ 2 = 15,4 J.

Resposta: 15,4 joules, a cada parada. É muito: um giratório desse porte, com batente simples, admite uma fração de joule, e, com amortecedor hidráulico, alguns joules. As saídas: giro mais lento, pois o dobro do tempo reduz a energia a um quarto. Braço mais curto. Amortecedor hidráulico externo, dimensionado para a energia. Ou um atuador maior.

9.2 Cilindros especiais: sem haste, guiados, tandem

O **cilindro sem haste** move um carro que desliza sobre o próprio tubo: não há haste saindo nem flambagem, e o comprimento ocupado não depende da posição, o que permite cursos de vários metros. No acoplamento **mecânico**, um rasgo no tubo é vedado por uma fita que se abre só onde o êmbolo passa; transmite forças altas, com pequeno vazamento. No **magnético**, ímãs no êmbolo arrastam ímãs no carro através da parede fechada: vedação perfeita, mas acima de certa força o carro se desacopla.

Tabela 9.1 Outros atuadores lineares

Atuador	O que tem de especial	Quando usar
Cilindro guiado	Duas hastes de guia paralelas à principal, com placa frontal	Carga lateral, carga que não pode girar
Cilindro tandem	Dois êmbolos em linha, na mesma haste	Quase o dobro da força com diâmetro limitado; o consumo também dobra
Várias posições	Dois cilindros unidos pelos fundos	Cursos de 50 e 100 mm dão quatro posições: 0, 50, 100 e 150 mm
Cilindro com trava	Freio mecânico sobre a haste, liberado pelo ar	Segurar a carga em falta de ar
Músculo pneumático	Tubo de borracha com malha de fibras, que encurta ao ser pressurizado	Força inicial muito alta, que cai a zero no fim; movimento suave

Fonte: atuadores lineares especiais. As denominações variam entre fabricantes.

CASE REAL · DOWNEY, CALIFÓRNIA, DÉCADA DE 1950

O músculo de McKibben

Em 1952, ano de uma das piores epidemias de poliomielite nos Estados Unidos, a doença atingiu Karan McKibben, filha de Joseph McKibben, físico que havia integrado a equipe do laboratório de Los Alamos. Ela foi tratada em um hospital de reabilitação em Downey, na Califórnia, onde uma equipe desenvolvia órteses leves para devolver movimentos a mãos sem força. Faltava o atuador: um motor elétrico, com as baterias da época, era pesado demais para uma cadeira de rodas.

A proposta de McKibben, desenvolvida com os médicos por volta de 1957, foi um tubo de borracha dentro de uma malha trançada, ligado por uma válvula a um pequeno cilindro de gás carbônico. Pressurizado, o tubo inflava, a malha se alargava e encurtava, puxando um cabo que fechava os dedos. Pesava poucas dezenas de gramas e se comportava como um músculo: força grande no início da contração, que diminui à medida que encurta. Perdeu espaço na década seguinte porque dependia de recargas de gás. Voltou na década de 1980, em uma versão industrial de um fabricante japonês de pneus, e hoje está em catálogo.

A lição: a escolha do atuador começa pelo perfil de força que a tarefa pede. E o atuador é só metade do sistema: o músculo saiu de uso pela fonte de energia.

Fontes: Make:, Joseph McKibben and the air muscle (a filha, Karan, com poliomielite em 1952); Wikipedia (inglês), Pneumatic artificial muscles (origem do músculo de McKibben, 1957, no Rancho Los Amigos, em Downey)

9.3 Garras e vácuo: pegar por atrito, segurar pela atmosfera

Na garra pneumática, um pequeno cilindro interno move dois ou três dedos. Quando a peça é segura só por atrito, a força por dedo é $F = m \cdot (g + a) \cdot S \div (\mu \cdot n)$, com segurança S de 2 a 4. Uma peça de aço de 0,5 kg, com dedos de aço (μ = 0,15), aceleração de 5 m/s² e S = 2, pede **49 N por dedo**, dez vezes o peso dela. Com dedos de borracha (μ = 0,5), cai para 15 N; com dedos em V, a forma sustenta a peça. O projeto dos dedos vale mais que o tamanho da garra.

Para peças lisas, planas ou frágeis, usa-se o vácuo. A ventosa não puxa nada: retirado o ar entre ela e a peça, a atmosfera empurra a peça com até 1 bar, ou 10 N por cm². Com 60 % de vácuo, a diferença é de 6 N por cm². No **ejetor** (Figura 9.2), o ar comprimido acelera em um bocal, a pressão cai abaixo da atmosférica e o jato arrasta o ar da ventosa: 80 a 90 % de vácuo em frações de segundo, sem partes móveis, mas com consumo de dezenas a centenas de litros de ar por minuto. Com vacuostato e retenção, o ar é cortado quando o vácuo é atingido.

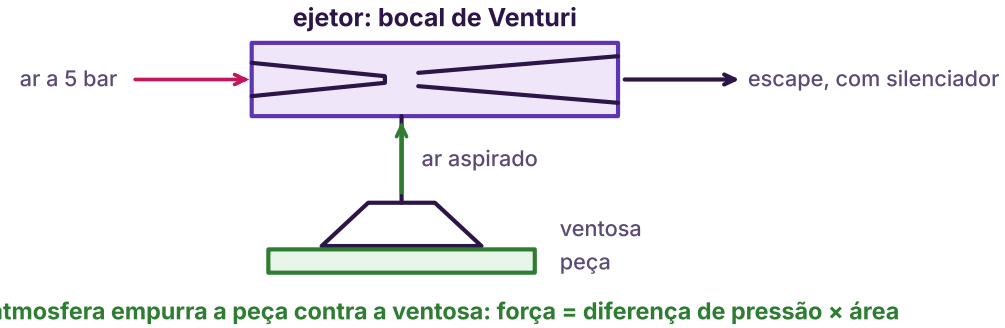


Figura 9.2 Gerador de vácuo por efeito Venturi, com ventosa. Não tem partes móveis: o ar comprimido, acelerado no bocal, arrasta o ar da ventosa.

EXEMPLO RESOLVIDO

Ventosas para uma chapa

Uma chapa de aço de 12 kg deve ser erguida na horizontal, por cima, com aceleração de 3 m/s², por quatro ventosas, com vácuo de 60 % e segurança de 2. Que diâmetro de ventosa adotar?

01 Força necessária: 12 × (9,81 + 3) × 2 = 307 N.

02 Por ventosa: 307 ÷ 4 = 77 N.

03 Área: 77 ÷ 6 N por cm² = 12,8 cm². Diâmetro: 40,4 mm.

Resposta: Ventosas de 50 mm, o tamanho normalizado seguinte, com 118 N teóricos cada. Se a mesma chapa fosse transportada em pé, sustentada pelo atrito, com coeficiente de 0,5 e segurança de 4, a força necessária seria de 1 230 N: quatro vezes mais, e as ventosas passariam a 100 mm. A posição da peça muda tudo.

ERRO QUE CUSTA CARO

Sem ar, a peça cai

O ejetor só faz vácuo enquanto recebe ar comprimido. Uma queda de energia ou de pressão solta a carga. Em cargas pesadas, usam-se válvula de retenção, reservatório de vácuo e vacuostato com alarme. E, com várias ventosas em um só gerador, uma ventosa descoberta derruba o vácuo de todas: usa-se válvula de bloqueio em cada uma.

9.4 Motores pneumáticos: torque, rotação e potência

O motor de palhetas, o mais comum, está em quase toda ferramenta manual; o de pistões dá torque alto em baixa rotação; a turbina dá rotação altíssima com torque baixo. Parado, com o ar ligado, o motor faz o torque máximo, o de partida. Com a rotação subindo, o torque cai quase em linha reta até zero na rotação livre. A potência, P = M · n ÷ 9,55 (watts, com n em rpm), é nula nos dois extremos e máxima na metade da rotação livre, onde o torque é metade do de partida. Um motor de 4 N·m de partida e 3 000 rpm livres entrega no máximo 2 × 1 500 ÷ 9,55 = **314 W**, a 1 500 rpm. A 2 400 rpm (80 % da livre), o mesmo motor entrega só 4 × (1 − 0,8) = 0,8 N·m e 201 W: gira rápido, folgado e gastando ar.

Daí as propriedades práticas: o motor se autorregula (mais carga, menos rotação e mais torque), **pode travar** sem aquecer nem queimar (por isso serve às apertadeiras) e se regula sem eletrônica: a pressão ajusta o torque e o estrangulamento ajusta a rotação. Escolhe-se para trabalhar entre 40 e 60 % da rotação livre. O preço é a energia: cerca de 1 m³ de ar livre por minuto para cada quilowatt no eixo, que custam de 6 a 7 kW no compressor.

NA PRÁTICA

Onde o motor a ar ainda ganha

Em área explosiva, porque não gera faísca. Em ferramenta de mão, porque pesa uma fração de um elétrico equivalente. Em serviço com travamento, umidade, poeira e calor. Onde o trabalho é contínuo e o motor elétrico pode ser usado, este gasta várias vezes menos energia: o rendimento global do motor a ar fica entre 10 e 20 %. O escape é ruidoso e pede silenciador; motores de palhetas tradicionais exigem ar lubrificado e lançam névoa de óleo no ambiente, mas há versões que trabalham a seco.

CASE REAL · WASHINGTON, DÉCADA DE 1950

A turbina do dentista

Até a metade do século XX, a cárie era removida com brocas de aço giradas por um motor de correia, a poucos milhares de rotações por minuto. Nessa velocidade a broca corta por pressão: o dentista empurra, o dente vibra, o atrito aquece. Correias e engrenagens não suportavam centenas de milhares de rotações na ponta de um instrumento do tamanho de uma caneta.



Caneta Borden Airotor, por volta de 1960. Biberbach, via Wikimedia Commons · CC BY-SA 4.0

A versão que mudou a prática foi a de John Borden, dentista de Washington, lançada comercialmente em 1957: um pequeno rotor de pás sobre rolamentos de esferas minúsculos, girado por um jato de ar que chegava por um tubo fino dentro do cabo, com a broca presa diretamente ao rotor. Girava a cerca de 300 mil rotações por minuto. O torque era mínimo, e isso virou vantagem: se o dentista pressionasse demais, a turbina simplesmente perdia rotação. Em poucos anos estava na maior parte dos consultórios dos países ricos, e o som agudo do consultório é o do escape dessa turbina.

A lição: é a curva do motor pneumático levada ao extremo: rotação altíssima, torque quase nulo e a queda de rotação sob carga usada como proteção.

Fontes: Virtual Dental Museum (Universidade do Pacífico), A dynamic decade: speeding up the handpiece (patente do Airotor em 1957); Stony Brook University Libraries, Borden Air Turbine High-Speed Handpiece; Spear Education, Facts and figures: the high-speed handpiece

PARA LEVAR DESTE CAPÍTULO

1. No **pinhão e cremalheira**, o torque é a força do êmbolo vezes o raio primitivo: 40 mm a 6 bar, com raio de 15 mm, dão 11,3 N·m; em movimento, usa-se a metade.
2. Em giro rápido, o trabalho grande é parar a massa: o **momento de inércia** cresce com o quadrado da distância ao eixo, e a energia vai para o batente ou o amortecedor.
3. O **cilindro sem haste** não flamba e ocupa o mesmo comprimento em qualquer posição; o acoplamento mecânico transmite forças altas, e o magnético veda perfeitamente, mas desacopla acima de certa força.
4. Na garra que segura por atrito, o atrito dos dedos decide a força: uma peça de aço de 0,5 kg pede 49 N por dedo de aço e 15 N com **borracha**.
5. A ventosa não puxa: a atmosfera empurra a peça com até 10 N por cm², ou 6 N por cm² com 60 % de vácuo; sem ar comprimido no **ejetor**, a peça cai.
6. No motor pneumático, o torque cai em linha reta da partida a zero na **rotação livre**, e a potência é máxima na metade dela; trabalha-se entre 40 e 60 % da livre.
7. O motor a ar pode travar sem queimar e se regula pela pressão e pelo estrangulamento, mas gasta cerca de 1 m³ de ar livre por minuto para cada **quilowatt** no eixo.

PARA NÃO ESQUECER $P = M \cdot n \div 9{,}55$ (W, com n em rpm)

9.5 Exercícios

Nível: ★ conceito · ★★ aplicação · ★★★ desafio

1 ★ É preciso levar peças por 3 m, num corredor que só tem 3,5 m de comprimento. Qual atuador?

a) Cilindro com haste de 3 m
b) Dois cilindros em tandem
c) Cilindro sem haste

2 ★ A mesma chapa é erguida com ventosas na horizontal (por cima) e na vertical (em pé). Qual posição pede mais ventosa?

a) Na horizontal, porque pesa mais
b) Na vertical, porque segura por atrito
c) Tanto faz, a força é o peso

3 ★ Um motor pneumático é travado por excesso de carga. O que acontece?

a) Queima, como um motor elétrico
b) Para sem danos e volta quando a carga cai
c) Dispara de rotação até quebrar

4 ★★ Uma ventosa circular de 80 mm de diâmetro (área de 50,3 cm²) trabalha com vácuo de 70 %. Qual é a força teórica de sustentação? Que massa ela pode erguer na horizontal, parada, com segurança 2? E em pé, sustentando a peça por atrito (μ = 0,5) com segurança 4?

5 ★★ **Diagnóstico.** Um manipulador com quatro ventosas ligadas a um só ejetor ergue chapas de 1 200 × 800 mm sem problema, com o vacuômetro marcando 75 % de vácuo. A linha passou a produzir chapas de 1 000 × 600 mm, e na nova posição uma das ventosas fica para fora da borda. Desde então, as chapas caem logo depois de erguidas, e o vacuômetro não passa de 15 %. A pressão de alimentação do ejetor está normal. Qual é a causa provável e como confirmá-la?

6 ★★★ **Projeto.** Um agitador de tinta, em área com risco de explosão, precisa de 2 N·m a cerca de 1 500 rpm, em serviço contínuo. Há dois motores de palhetas no catálogo: o motor A, com 4 N·m de torque de partida e 3 000 rpm de rotação livre, e o motor B, com 6 N·m e 2 400 rpm. Em que rotação cada um gira com essa carga, qual atende melhor e quanto ar livre por minuto ele consome, aproximadamente? Que potência isso representa no compressor?

ANOTAÇÕES

CAPÍTULO 10 · VÁLVULAS E SIMBOLOGIA

10 Válvulas direcionais: vias, posições e acionamentos

A válvula direcional decide para onde o ar vai. Ela abre o caminho para o avanço, depois para o recuo, e define o que fica ligado quando ninguém a aciona. Esta última decisão é a que mais pesa: quando a energia cai ou o sinal some, é a válvula que diz se o cilindro recua, para ou continua onde estava. Ler o símbolo certo, pela numeração normalizada das conexões, evita a máquina que se move sozinha. Este capítulo ensina a ler o símbolo, escolher o tipo, entender a construção e dimensionar a válvula pela vazão.

AO FIM DESTE CAPÍTULO, VOCÊ VAI

- Ler o símbolo de uma válvula direcional: vias, posições, repouso e acionamentos.
- Identificar as conexões pela numeração normalizada.
- Escolher entre válvulas 2/2, 3/2, 5/2 e 5/3 conforme o atuador e a função.
- Distinguir construção de assento e de carretel, e válvulas monoestáveis e biestáveis.
- Selecionar o acionamento e o tamanho da válvula pela vazão nominal.

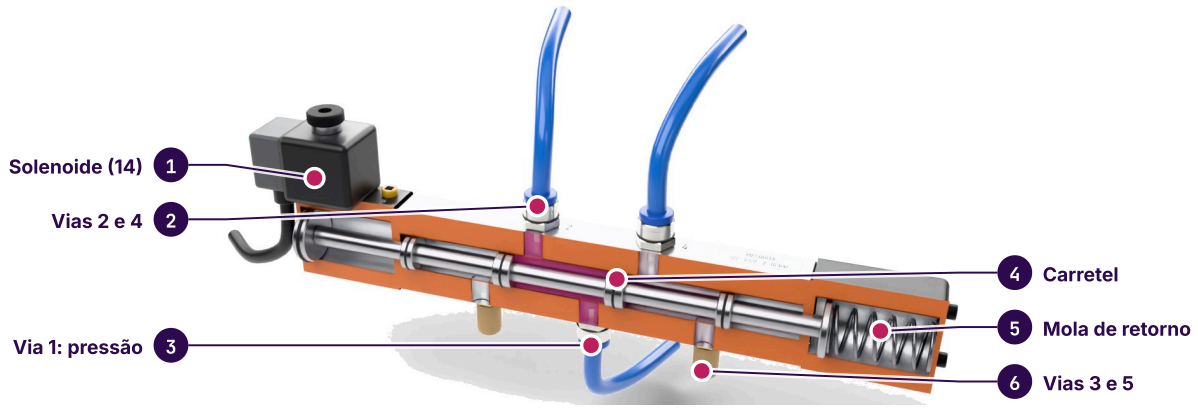


Figura 10.1 A válvula 5/2 por dentro. Modelo 3D da aula, em corte. No lado maior, o conjunto mede cerca de 35 cm.

1. **Piloto e solenoide (marcação 14).** O solenoide abre um pequeno ar de piloto, que empurra o êmbolo da esquerda: a válvula é **servopilotada**. O 14 gravado diz que este comando liga 1 a 4. O botão laranja é o comando manual.
2. **Vias 2 e 4: saídas para o cilindro.** Em repouso, a pressão vai para a **2**; pilotada pelo 14, para a **4**. Cada uma alimenta uma câmara do cilindro.
3. **Via 1: alimentação.** O ar comprimido da rede entra por baixo, no meio do corpo. Na numeração da norma, 1 é sempre a pressão.
4. **Carretel com ressaltos e anéis O.** Os ressaltos, com seus anéis O, tapam e destapam as vias. Deslocado 25 mm, o carretel troca as ligações: é a mudança de posição do símbolo.
5. **Mola de retorno.** Sem sinal, a mola devolve o carretel ao repouso: a válvula é **monoestável**.
6. **Vias 3 e 5: escapes.** O ar que volta do cilindro sai por aqui, pelos silenciadores de bronze sinterizado. A **3** serve a 2, e a **5** serve a 4.

em 3D e na sua mesa

10.1 Como se lê o símbolo de uma válvula

O símbolo não mostra como a válvula é feita: mostra o que ela faz. Cada **quadrado** é uma posição que a peça móvel pode ocupar. Dentro dele, a seta indica passagem e o T, via bloqueada. As **vias** são desenhadas só no quadrado de **repouso** (nas válvulas com mola, o vizinho à mola); para ver a outra posição, deslocam-se mentalmente os quadrados sob as conexões, que não saem do lugar. A válvula é chamada por dois números: vias / posições. A da Figura 10.2 é uma **5/2**, "cinco por dois": cinco vias, contadas em um quadrado só, e duas posições. As conexões de comando não entram na conta.

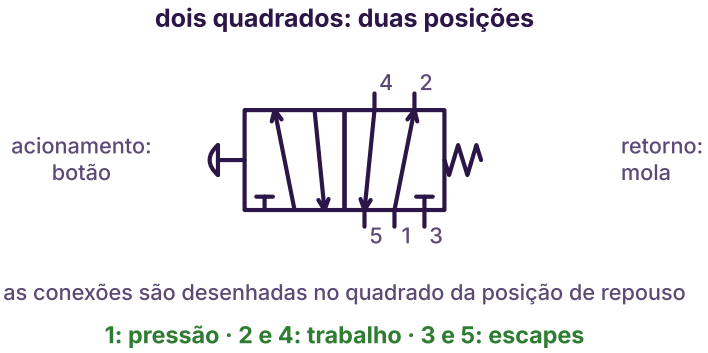


Figura 10.2 Anatomia do símbolo de uma válvula direcional de 5 vias e 2 posições, acionada por botão, com retorno por mola.

A numeração das conexões (ISO 5599) aparece na Figura 10.1: **1** é a pressão, **2** e **4** são as saídas de trabalho, **3** e **5** os escapes. Os comandos têm dois algarismos, lidos separados: **14** é o sinal que liga 1 com 4, **12** liga 1 com 2, e **10** fecha a passagem de 1. Em válvulas e diagramas antigos aparecem letras: P para a pressão, A e B para as saídas, R e S para os escapes, Z e Y para os comandos. Nas válvulas de 2 e 3 vias, o repouso tem nome. **Normalmente fechada** (NF): em repouso, a pressão está bloqueada e a saída em escape. **Normalmente aberta** (NA): em repouso, a pressão passa para a saída. Cuidado: em pneumática, "aberta" quer dizer que o ar passa; em elétrica, contato aberto não deixa a corrente passar.

10.2 Qual válvula para qual função

Tabela 10.1 Válvulas direcionais e seus usos

Válvula	O que faz	Aplicação típica
2/2	Abre e fecha uma passagem; não alivia a saída	Sopro de ar, ejetores, alimentação de um trecho
3/2 NF	Pressuriza a saída, ou a liga ao escape	Cilindro de simples ação; botões e fins de curso; corte e despressurização
3/2 NA	A saída fica pressurizada em repouso	Cilindro que deve ficar avançado sem sinal; inversão de um sinal
5/2	Inverte duas saídas, com um escape para cada	Cilindro de dupla ação: a válvula de potência padrão
5/3 de centro fechado	No centro, todas as vias bloqueadas	Interromper o movimento do cilindro no meio do curso
5/3 de centro em escape	No centro, as saídas ligadas aos escapes	Deixar o cilindro livre, sem força, para ajuste manual ou emergência

Fonte: válvulas direcionais e seus usos. Existem também a 4/2, pouco usada hoje, e a 5/3 de centro pressurizado.

Por que cinco vias, e não quatro. A 4/2 faz a mesma inversão com um escape comum. A 5/2 dá a cada

câmara o seu escape, e isso permite regular a velocidade de cada sentido com um estrangulador no escape correspondente. Na numeração da ISO 5599, em repouso a via 1 alimenta a 2, e a 4 descarrega pela 5; acionado o comando 14, a via 1 passa a alimentar a 4, e a 2 descarrega pela 3 (Figura 10.3).

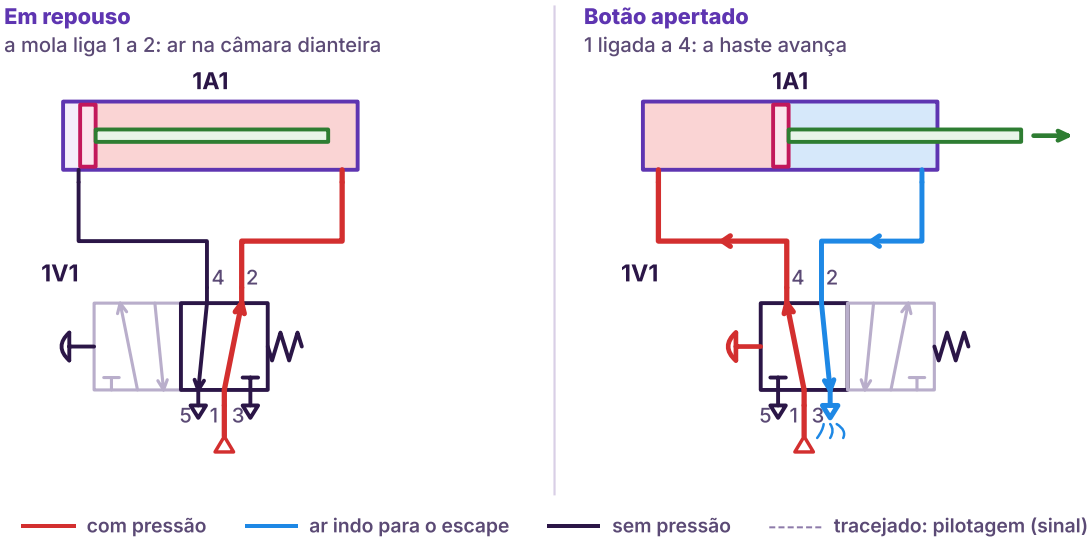


Figura 10.3 Comando direto de um cilindro de dupla ação por uma válvula 5/2 de botão, em duas situações. Nas figuras em situações, a válvula aparece no quadrado que está agindo naquele instante; no projeto, o diagrama se desenha sempre em repouso (capítulo 12). No QR, a figura no celular, situação por situação.

O centro da 5/3. No centro fechado, o ar fica preso nas duas câmaras e o cilindro para, mas não com exatidão: o ar é compressível, a carga faz o êmbolo ceder e qualquer vazamento o deixa escorregar. No centro em escape, o cilindro fica solto, e uma carga vertical desce. No centro pressurizado, a área maior vence e a haste avança devagar.

Monoestável e biestável. A **monoestável** tem acionamento de um lado e mola do outro: fica acionada enquanto houver sinal e volta quando ele some. A **biestável** tem acionamento dos dois lados e nenhuma mola: um pulso a muda de posição e ela permanece ali, mesmo sem sinal, até receber o pulso oposto. É uma memória.

CASE REAL · PITTSBURGH, DE 1869 A 1893

A válvula que freia pela falta de ar

Até a década de 1860, um trem era freado à mão: guarda-freios corriam pelo teto dos vagões, em movimento, girando volantes ao sinal do apito. George Westinghouse, então com pouco mais de vinte anos, patenteou em 1869 um freio de ar comprimido. Um tubo com mangueiras corria por todo o trem, e, para frear, o maquinista admitia nele o ar do reservatório da locomotiva. Esse freio direto tinha um defeito grave: dependia de o tubo estar inteiro. Um engate rompido, justamente quando os vagões soltos mais precisariam parar, deixava-os sem freio algum.

A solução, patenteada por volta de 1872, foi o freio automático. Cada vagão ganhou o seu reservatório e uma válvula tríplice. Com o tubo pressurizado, ela mantém o reservatório carregado e o cilindro de freio em escape. Quando a pressão do tubo cai, ela muda de posição e liga o reservatório ao cilindro: freio aplicado. A lógica ficou invertida: o maquinista freia retirando ar, e uma mangueira solta aplica o freio em todos os vagões. Em 1893, uma lei federal americana tornou o freio a ar obrigatório, e o princípio continua em uso nas ferrovias.

A lição: a pergunta do projeto é sempre a mesma: se o ar, o sinal ou a energia faltarem, em que estado o atuador deve ficar? Respondida, a válvula e o seu repouso estão quase escolhidos.

Fontes: Britannica, verbete sobre George Westinghouse e o freio a ar (patente de 1869; lei de segurança ferroviária de 1893); American-Rails.com, Westinghouse air brake (válvula tríplice e freio automático, por volta de 1872); HowStuffWorks, Railroad expansion (adoção obrigatória a partir de 1893)

10.3 Assento ou carretel, comando direto ou servopilotado

Por dentro, a válvula pode ser de **assento** (um disco, cone ou esfera que se afasta de uma sede: estanque, pouco sensível à sujeira, mas com força de acionamento maior, e em geral limitada a 2/2 e 3/2) ou de **carretel** (um êmbolo com ressaltos que desliza e cobre ou descobre furos: força de acionamento pequena, qualquer função, porém mais sensível à sujeira).

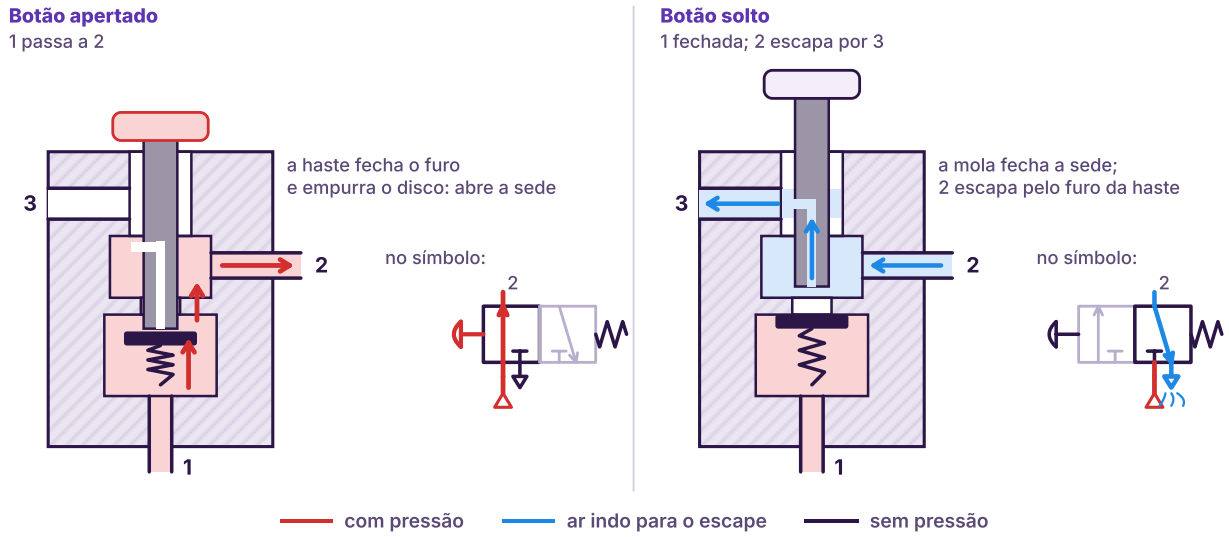


Figura 10.4 Válvula 3/2 NF de assento, de botão, em corte esquemático, com o símbolo da mesma situação ao lado. Em repouso, a mola e a própria pressão apertam o disco contra a sede: a vedação é estanque. Apertado o botão, a haste fecha o seu furo de escape e afasta o disco. No QR, a figura no celular, situação por situação.

No **comando direto**, o acionamento move a própria peça principal: funciona com qualquer pressão, inclusive zero e vácuo, mas, nas válvulas elétricas, exige bobina grande, e por isso fica nos tamanhos pequenos. Na **servopilotada**, construção da maior parte das válvulas elétricas, um solenoide de poucos watts abre uma passagem de menos de um milímetro; o ar da própria linha entra por ali e empurra o carretel com dezenas de newtons, abrindo passagens para centenas ou milhares de litros por minuto. A exigência é uma **pressão mínima** de trabalho, tipicamente de 1,5 a 3 bar; abaixo disso o piloto não comuta, e para baixa pressão ou vácuo usa-se alimentação separada do piloto.

ERRO QUE CUSTA CARO

O comando manual auxiliar move a máquina

As válvulas elétricas têm um pequeno botão ou parafuso que comuta o piloto à mão, para testar o atuador sem o comando elétrico. Ele move a máquina fora do controle do sistema, e alguns modelos travam na posição acionada. Só se usa com a área livre, e o comando volta ao repouso antes de religar a máquina.

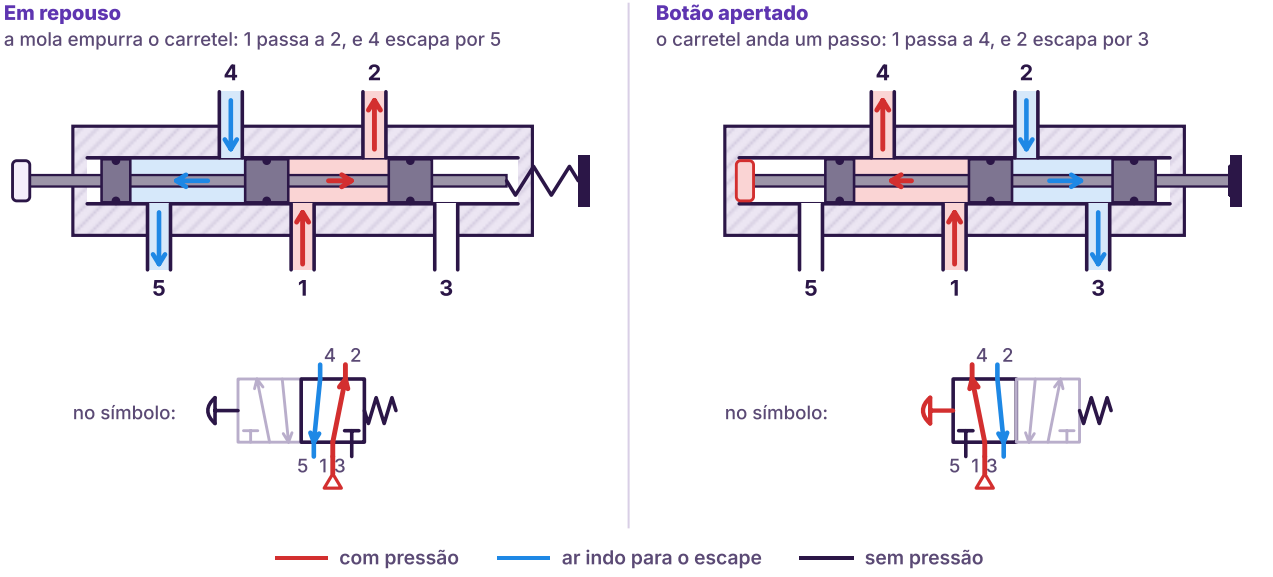


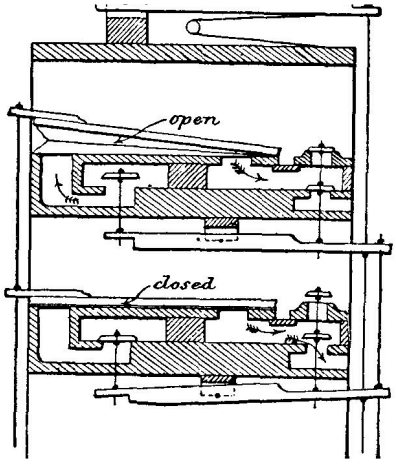
Figura 10.5 Válvula 5/2 de carretel em corte esquemático, com o símbolo da mesma situação embaixo. Os ressaltos, com anéis O, separam as câmaras; deslocado um passo, o carretel troca as ligações, que é o que o símbolo mostra trocando de quadrado. No QR, a figura no celular, situação por situação.

CASE REAL · INGLATERRA E FRANÇA, DA DÉCADA DE 1830 A 1841

O dedo comanda, o ar faz a força

No órgão de tubos, cada tecla puxava, por hastes de madeira, a válvula que o ar comprimia contra a sede. No início do século XIX, os órgãos cresciam em tubos e em pressão, e, com vários teclados acoplados, a força na tecla tornava impraticável tocar passagens rápidas.

Na década de 1830, o construtor inglês Charles Barker pôs, para cada tecla, um pequeno fole auxiliar. A tecla passou a abrir só uma válvula minúscula, que admitia ar do próprio órgão no fole; o fole inflava e puxava o mecanismo pesado. Ao soltar a tecla, a válvula fechava a entrada e abria um escape, e o fole murchava. Recusada pelos construtores ingleses, a ideia foi patenteada na França por volta de 1839. Aristide Cavaillé-Coll, que construía o órgão da basílica de Saint-Denis, perto de Paris, enfrentava exatamente esse problema e incorporou o mecanismo ao instrumento, inaugurado em 1841.



Alavanca de Barker, aberta e fechada. R. H. M. Bosanquet, Encyclopædia Britannica, 11ª ed. (1911), via Wikimedia Commons · Domínio público

A lição: é uma válvula servopilotada completa, um século antes das eletroválvulas: um sinal fraco comuta uma válvula pequena, que usa a energia da linha para mover o elemento grande. E ela exige o que as de hoje exigem: pressão para o piloto e escape livre para o retorno.

Fontes: Wikipedia (inglês), Barker lever e Charles S. Barker (patente francesa de 1839; órgão de Saint-Denis inaugurado em 21/09/1841); Britannica, Barker lever

10.4 Acionamento e tamanho: quanto ar a válvula passa

Por fora, o acionamento pode ser **muscular** (botão, cogumelo, alavanca, pedal), **mecânico** (pino, rolete, rolete escamoteável), **pneumático** (piloto), **elétrico** (solenoide, em geral de 24 V em corrente contínua e 1 a 5 W, com as bobinas marcadas 14 e 12, como os comandos) ou combinado. Por dentro, o que conta é a passagem. A rosca da conexão não diz quanto ar a válvula passa: o dado que importa é a **vazão nominal**, a

vazão de ar livre com 6 bar na entrada e queda de 1 bar. Catálogos americanos dão o coeficiente Cv, e $Q_n \approx 984 \cdot Cv$, em L/min. Em ordem de grandeza, uma válvula de 1/8 de polegada passa de 400 a 900 L/min e atende cilindros de 25 a 50 mm; uma de 1/4, de 900 a 1 800 L/min, para 50 a 80 mm; mas o valor do catálogo é o que vale.

EXEMPLO RESOLVIDO

A válvula para um cilindro

Um cilindro de 63 mm (31,2 cm²) deve avançar 300 mm em 0,6 s, a 6 bar. Que vazão nominal a válvula deve ter?

01 Velocidade: 300 ÷ 0,6 = 500 mm/s, ou 50 cm/s.

02 Vazão de pico: 31,2 cm² × 50 cm/s × 7 ÷ 1 000 = 10,9 L/s, ou 655 L/min.

03 Com folga de 30 %: 850 L/min.

Resposta: Válvula com vazão nominal de pelo menos 850 L/min: uma de 1/4 de polegada, ou uma boa de 1/8. A conta da vazão de pico é a do capítulo 8. A folga cobre tubos, conexões e reguladores de fluxo em série: vale a menor passagem do caminho.

PARA LEVAR DESTE CAPÍTULO

1. No símbolo, cada quadrado é uma posição, e as vias são contadas e desenhadas só no quadrado de **repouso**; a válvula se chama vias / posições, e as conexões de comando não entram na conta.
2. Pela ISO 5599, **1** é a pressão, 2 e 4 são as saídas de trabalho e 3 e 5 os escapes; o comando 14 liga 1 com 4, e o 12 liga 1 com 2.
3. Na válvula **normalmente fechada**, o repouso bloqueia a pressão e põe a saída em escape; em pneumática, aberta quer dizer que o ar passa, ao contrário do contato elétrico.
4. A 5/2 dá a cada câmara o seu escape e permite regular cada sentido; a 5/3 de centro fechado prende o ar e para o cilindro, mas sem exatidão, porque o ar é compressível.
5. A válvula **monoestável** volta pela mola quando o sinal some; a **biestável** muda com um pulso e permanece na posição até receber o pulso oposto: é uma memória.
6. A válvula servopilotada usa um solenoide de poucos watts e o ar da própria linha para mover o carretel, mas exige pressão mínima, tipicamente de 1,5 a 3 bar, para comutar.
7. A válvula se escolhe pela **vazão nominal**, medida com 6 bar na entrada e 1 bar de queda, comparada com a vazão de pico do cilindro mais uma folga de cerca de 30 %.

PARA NÃO ESQUECER Qn ≈ 984 · Cv (L/min)

10.5 Exercícios

Nível: ★ conceito · ★★ aplicação · ★★★ desafio

1 ★ Que válvula comanda um cilindro de simples ação?

a) 2/2, que só abre e fecha
b) 5/2, a mais completa
c) 3/2, que alimenta e escapa a câmara

2 ★ Um solenoide de 1 W comanda uma válvula de 1/2 polegada. Como isso é possível?

a) Comando direto: o solenoide move o carretel
b) O próprio cilindro ajuda a mover a válvula
c) Servopilotada: o solenoide comanda o ar piloto

3 ★ Uma válvula 5/2 biestável recebeu um pulso no comando 14, e o sinal sumiu. A válvula:

a) Fica na posição até receber sinal em 12
b) Volta pela mola à posição inicial
c) Vai ao centro, com tudo fechado

4 ★★ O catálogo de uma válvula 5/2 informa Cv de 1,2. Qual é a vazão nominal aproximada? Ela serve para um cilindro de 80 mm (50,3 cm²) que deve avançar a 0,4 m/s, a 6 bar, com folga de 30 %? E a 0,5 m/s?

5 ★★ **Leitura.** Uma válvula 5/2 monoestável, servopilotada, com solenoide 14 e retorno por mola, comanda um cilindro de dupla ação. Na montagem, a via 2 foi ligada à câmara traseira e a via 4 à câmara dianteira. A pressão mínima de pilotagem do catálogo é de 2 bar. Diga o que o cilindro faz: (a) ao abrir o ar, com a bobina desligada; (b) com a bobina energizada; (c) se a energia elétrica cair com a bobina energizada; (d) se a alimentação estiver em 1 bar e a bobina for energizada.

6 ★★★ **Projeto.** Um cilindro vertical de 50 mm (19,6 cm²) ergue a porta de proteção de uma máquina, com 25 kg, avançando 400 mm em 0,5 s, a 6 bar. Em emergência, a porta deve parar onde estiver e não pode descer por falta de energia nem por vazamento. O catálogo oferece válvulas de Cv 0,6 e Cv 1,0, nas versões 5/2 monoestável e 5/3 de centro fechado ou de centro em escape. Que função e que tamanho escolher, e o que mais é preciso no circuito?

ANOTAÇÕES

CAPÍTULO 11 · VÁLVULAS E SIMBOLOGIA

11 Válvulas de fluxo, de bloqueio e de pressão

Velocidade, sentido do fluxo e pressão mínima se controlam com válvulas pequenas e baratas, desde que estejam no lugar certo do circuito. Fora do lugar, não fazem nada, ou fazem o contrário. A velocidade de um cilindro de dupla ação se regula estrangulando o ar que **sai**, e não o que entra. A retenção garante o sentido, a alternadora e a simultaneidade combinam sinais, e a válvula de sequência transforma pressão em informação: diz se o cilindro já está fazendo força. Este capítulo trata de cada uma e de onde ela deve ficar.

AO FIM DESTE CAPÍTULO, VOCÊ VAI

- Regular a velocidade de cilindros com válvulas de fluxo, na entrada e no escape.
- Aplicar válvulas de retenção, simples e pilotadas, e de escape rápido.
- Usar válvulas alternadoras e de simultaneidade como funções OU e E.
- Distinguir válvulas reguladoras, limitadoras e de sequência, e pressostatos.
- Estimar a vazão por um estrangulamento, e posicionar as válvulas no circuito.

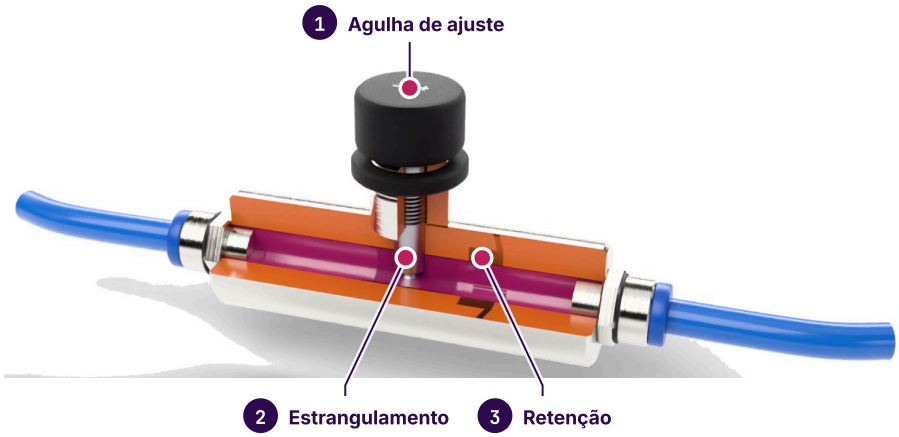


Figura 11.1 A reguladora de fluxo unidirecional, em corte. Modelo 3D da aula, em corte. No lado maior, o conjunto mede cerca de 21 cm.

1. **Agulha de ajuste.** Girando o botão, a agulha estreita a passagem e limita a vazão nesse sentido. A contraporca trava o ajuste.
2. **Sede do estrangulamento.** É por esta fresta que todo o ar regulado passa.
3. **Retenção.** No sentido oposto, o lábio de vedação se abre e o ar passa livre: por isso é **unidirecional**.

em 3D e na sua mesa

11.1 Regular a velocidade: por que no escape

A **estranguladora** é uma passagem estreita com uma agulha cônica rosqueada que reduz ou aumenta a seção; estrangula o fluxo nos dois sentidos. A **reguladora de fluxo unidirecional** (Figura 11.1) é uma estranguladora com uma retenção em paralelo: num sentido a retenção fecha e o ar passa pela agulha; no outro, abre e o ar passa quase livre. Com uma em cada conexão do cilindro, regulam-se avanço e recuo

separadamente. A questão é em que conexão montá-las: na de entrada ou na de escape de cada câmara.

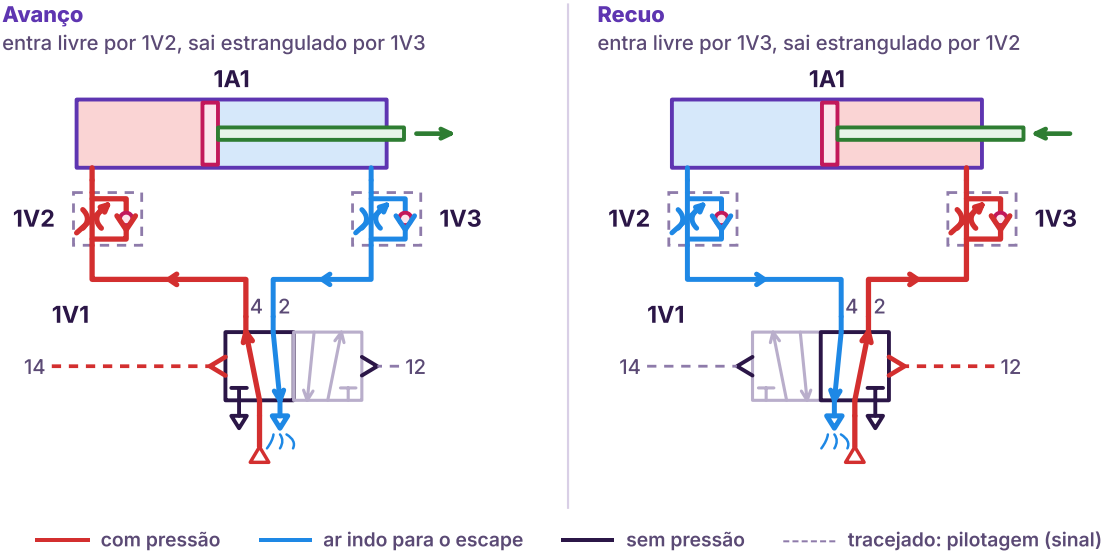


Figura 11.2 Regulagem de velocidade no escape de um cilindro de dupla ação, nas duas situações. Nos dois sentidos o ar entra livre pela retenção e sai estrangulado pela reguladora do lado oposto: é o escape que regula a velocidade. No QR, a figura no celular, situação por situação.

Em dupla ação, a resposta é o escape, e o motivo é a compressibilidade do ar. Com a entrada estrangulada, a câmara que empurra enche devagar; quando a pressão vence o atrito de partida, o êmbolo salta, o volume aumenta, a pressão cai e ele para, até a pressão subir de novo: é o movimento aos trancos. Com o escape estrangulado, a câmara que empurra recebe pressão plena e o êmbolo comprime o ar da outra câmara, que só sai pela agulha. Ele anda apoiado nessa almofada. Ainda assim, abaixo de 20 a 30 mm/s a regulagem pneumática fica instável; para avanço lento e uniforme, como em furação, usa-se um freio hidráulico em paralelo.

No cilindro de **simples ação**, o avanço é regulado na entrada, por falta de alternativa. As reguladoras em forma de cotovelo, que substituem a conexão do cilindro, são vendidas em duas versões, para escape e para entrada, quase idênticas por fora: só o símbolo gravado as distingue.

CASE REAL · BOSTON, POR VOLTA DE 1880

A porta que não batia

Fechar uma porta com uma mola é simples. O problema é que a mola acelera a porta durante todo o percurso e a entrega ao batente com a velocidade máxima. Mola fraca não fecha contra o vento; mola forte bate. Lewis Norton, de Boston, enfrentou a questão por volta de 1880, a partir, segundo o relato tradicional, das portas de uma igreja da cidade.

A solução separava as duas funções. A mola continuava a dar a força; a velocidade passava a ser limitada por um cilindro, com um êmbolo ligado à porta por um braço. Ao abrir a porta, o cilindro se enchia de ar por uma válvula de retenção. Solta a porta, a retenção fechava, e o ar preso só podia sair por um orifício pequeno: a porta voltava devagar, apoiada numa almofada. O dispositivo foi patenteado e vendido como amortecedor pneumático de porta.

Tinha os limites do ar: empurrada pelo vento, a porta cedia e oscilava, e a regulagem era sensível ao tamanho do orifício, à temperatura e à sujeira. Nas décadas seguintes, os fabricantes passaram ao óleo, incompressível, com orifício regulável por parafuso: é o fecha-portas hidráulico de hoje.

A lição: o fecha-portas é uma reguladora de fluxo unidirecional aplicada a um êmbolo: a força vem da mola e a velocidade é definida pelo fluido que sai. E mostra o limite do ar: para velocidade lenta e uniforme, entra o óleo.

Fontes: Google Patents, US 228776, Door-check, L. C. Norton, Boston, 15/06/1880; Allegion (LCN), LCN brand history (primeiro fecha-portas na Trinity Church de Boston); I Dig Hardware, The rector wanted it quiet

Tabela 11.1

Aspecto	Regulagem na entrada	Regulagem no escape
O que é estrangulado	O ar que entra na câmara que empurra	O ar que sai da câmara oposta
Pressão na câmara que empurra	Baixa: só a necessária para vencer a carga	Alta: a da rede, desde o início
Pressão na câmara oposta	Atmosférica: câmara vazia	Elevada: forma uma almofada de ar
Comportamento com carga variável	O êmbolo dá trancos: para, acumula pressão, e salta	Movimento firme: o êmbolo fica preso entre duas pressões
Carga que puxa o êmbolo	O cilindro dispara: nada o segura	A almofada do escape segura a carga
Onde se usa	Cilindros de simples ação. Cilindros muito pequenos e de curso curto	Cilindros de dupla ação: a regra geral

Fonte: comparação entre as duas formas de regular a velocidade. Em inglês, aparecem nos catálogos como meter-in e meter-out.

11.2 Retenção, escape rápido e as funções OU e E

A **retenção** deixa o ar passar num sentido e o bloqueia no outro; está dentro de muitas outras válvulas. A **alternadora** (função OU) tem uma esfera solta entre duas entradas: o sinal que chega por uma empurra a esfera contra a outra e segue para a saída. Com um simples T no lugar dela, o sinal de um botão escaparia pelo escape do outro botão, em repouso. A **simultaneidade** (função E) tem um carretel solto com dois assentos: o sinal que chega sozinho fecha a própria passagem, e só quando chega o segundo há caminho para a saída. Duas válvulas 3/2 em série fazem a mesma função E. Para combinar n sinais, usam-se n – 1 válvulas de simultaneidade.

CASE REAL · NOVA YORK, DÉCADA DE 1890

Uma retenção que se abre com o dedo

O pneu com câmara de ar, patenteado em 1888, transformou a bicicleta em poucos anos, mas a válvula era o ponto fraco: os modelos iniciais não permitiam esvaziar o pneu, nem medir ou corrigir a pressão sem perdê-la. August Schrader, imigrante alemão estabelecido em Nova York, fabricava desde a década de 1840 peças de borracha e de latão, e fornecia bombas e válvulas para mergulho. Por volta de 1891, a pedido de fabricantes de pneus, desenvolveu uma válvula para câmaras de ar.



Anúncio da Schrader na revista Horseless Age, 1918. A. Schrader's Son, Inc., via Wikimedia Commons · Domínio público

O princípio é o de uma retenção com mola, aberta por um pino. A vedação é mantida contra a sede por uma mola fraca e, sobretudo, pela pressão do próprio pneu: quanto mais cheio, mais firme. O bico da bomba empurra o pino, a vedação se afasta e o ar entra. O filho, George Schrader, patenteou a válvula em 1893, e a empresa chegou à forma definitiva: o mecanismo num núcleo removível, rosqueado no corpo, trocado em segundos. É a válvula dos pneus de carros, de caminhões e de boa parte das bicicletas.

A lição: é uma retenção auxiliada pela pressão e aberta à força por um comando externo, o princípio da retenção pilotada. E o elemento que se desgasta se troca sem desmontar o sistema.

Fontes: Wikipedia (inglês), August Schrader (válvula de 1891; patente de George Schrader em 1893); Schrader, Schrader history (schradertpms.com)

A **retenção pilotada** resolve o problema do cilindro vertical que, comandado por uma 5/3 de centro fechado, desce aos poucos pelos vazamentos e despenca se o tubo romper: rosqueada em cada conexão, prende o ar no cilindro, e o sinal que pressuriza um lado abre a retenção do outro. O **escape rápido** descarrega a câmara ali mesmo, sem o caminho de volta pelo tubo, e chega a dobrar a velocidade de cilindros grandes com tubos longos. Não se combina com reguladora no mesmo lado (o ar sairia sem passar pela agulha) e pede silenciador.

O QUE A NORMA DIZ

Comando bimanual não é uma válvula E

Exigir as duas mãos do operador em dois botões parece a aplicação típica da simultaneidade, mas não basta: com uma válvula E simples, o operador trava um botão com fita e opera com uma mão. O comando bimanual de segurança exige que os dois botões sejam apertados quase ao mesmo tempo, em menos de meio segundo, e soltos antes de um novo ciclo. A NR-12 e a ISO 13851 pedem um bloco bimanual próprio, que é componente de segurança.

11.3 Pressão que limita, regula e dá sinal

As válvulas de pressão têm construção parecida (mola ajustável de um lado, pressão do outro) e funções diferentes. A **reguladora** fica em série e trabalha o tempo todo, mantendo a pressão de saída (capítulo 6). A **limitadora**, ou de alívio, fica em derivação, fechada, e só abre para a atmosfera numa sobrepressão; uma não substitui a outra, porque uma reguladora travada aberta deixa passar a pressão de entrada inteira. O **pressostato** fecha ou abre um contato elétrico numa pressão ajustada. E a válvula geral de **corte com descarga** é uma 3/2 com cadeado: ao fechar, esvazia o circuito; uma 2/2 que só fecha deixaria a máquina com energia para um movimento.

A **válvula de sequência** é uma 3/2 NF cujo piloto só vence a mola quando a pressão atinge o valor ajustado. Ela responde a uma pergunta que o fim de curso não responde: o cilindro já está fazendo força? O ajuste fica entre a pressão com que o êmbolo se desloca livre e a pressão da rede, com folga para os dois lados: fora dessa faixa, a válvula comuta durante o avanço ou não comuta nunca.

$$F = p_{ajuste} \cdot A$$

Força que o cilindro está exercendo no instante em que a válvula de sequência comuta: a pressão ajustada, multiplicada pela área do êmbolo. Com a pressão em bar e a área em cm², multiplica-se por 10 para obter newtons.

EXEMPLO RESOLVIDO

Furar só depois de prender

Um cilindro de 50 mm prende uma peça. A furação só pode começar quando a força de aperto atingir 800 N. A rede fornece 6 bar. Em que pressão ajustar a válvula de sequência?

01 Área do êmbolo: 19,6 cm².

02 Pressão para 800 N: 800 ÷ (19,6 × 10) = 4,1 bar.

Resposta: Ajuste em cerca de 4,1 bar. O cilindro avança com 1 ou 2 bar na câmara, encosta na peça, e a pressão sobe. Ao passar por 4,1 bar, a válvula emite o sinal que libera a furação. Um fim de curso, no mesmo lugar, informaria só que o cilindro chegou a uma posição: com uma peça menor, ou sem peça, daria o sinal do mesmo modo, ou não daria nunca. A válvula de sequência informa a força, qualquer que seja a posição.

11.4 Quanto ar passa por um estrangulamento

$$Q \approx 6{,}7 \cdot d^2 \cdot (p + 1)$$

Vazão aproximada de ar livre, em litros por minuto, através de um orifício de diâmetro d, em milímetros, com pressão manométrica p, em bar, a montante, e descarga para a atmosfera. Vale quando a pressão absoluta a montante é pelo menos o dobro da de jusante.

A vazão cresce com o quadrado do diâmetro: a 6 bar, uma passagem de 1 mm deixa passar 47 L/min, e uma de 2 mm, 188 L/min. Um cilindro pequeno pede poucas dezenas de litros por minuto, ou seja, passagens de menos de 1 mm, e nessa faixa um décimo de milímetro muda muito a vazão. Por isso a agulha é cônica e de passo fino, e uma reguladora grande demais para o cilindro é impossível de ajustar: toda a faixa útil fica na primeira meia volta. Reguladora se escolhe pelo tamanho do cilindro, não pelo do tubo. Um cilindro de 32 mm que avança a 100 mm/s, com 6,9 cm² na câmara dianteira, solta 6,9 × 10 = 69 cm³/s, o que equivale a 29 L/min de ar livre com a câmara a cerca de 6 bar: pela fórmula, uma passagem de 0,8 mm. Para 20 mm/s, a passagem cai para 0,35 mm, e é por isso que a regulagem fica instável em velocidades muito baixas.

ERRO QUE CUSTA CARO

Válvula auxiliar longe do cilindro não funciona

Reguladora de fluxo, escape rápido e retenção pilotada vão **rosqueados na conexão do cilindro**. No painel, o volume do tubo entre a válvula e o cilindro age como mola e anula a regulagem; e a retenção pilotada deixa do lado de fora justamente a mangueira que pode romper. A tomada da válvula de sequência também fica junto ao cilindro, para medir a pressão da câmara.

PARA LEVAR DESTE CAPÍTULO

1. Em cilindro de dupla ação, a velocidade se regula estrangulando o ar que **sai**: o êmbolo anda apoiado na almofada de ar do escape e não dá trancos com carga variável.
2. No cilindro de **simples ação**, o avanço só pode ser regulado na entrada; as reguladoras em cotovelo para entrada e para escape são quase idênticas e só o símbolo gravado as distingue.
3. A **alternadora** realiza a função OU e a **simultaneidade**, a função E; para combinar n sinais em E são necessárias n − 1 válvulas de simultaneidade.
4. A **retenção pilotada**, rosqueada em cada conexão, prende o ar no cilindro vertical; o escape rápido descarrega a câmara ali mesmo e não se combina com reguladora no mesmo lado.

5 A **válvula de sequência** comuta quando a pressão da câmara atinge o ajuste e confirma força: $F = p \cdot A \cdot 10$, com p em bar, A em cm² e F em newtons.

6 A vazão por um estrangulamento cresce com o quadrado do diâmetro, $Q \approx 6{,}7 \cdot d^2 \cdot (p + 1)$; por isso a **reguladora** se escolhe pelo tamanho do cilindro, e não pelo do tubo.

7 Abaixo de 20 a 30 mm/s a regulagem pneumática fica instável; para avanço lento e uniforme, como em furação, usa-se um **freio hidráulico** em paralelo.

PARA NÃO ESQUECER $F = p \cdot A \cdot 10$ (p em bar, A em cm², F em N)

11.5 Exercícios

Nível: ★ conceito · ★★ aplicação · ★★★ desafio

1 ★ Um cilindro de dupla ação deve avançar devagar e sem trancos, com carga que varia. Onde regular a velocidade?

a) Na entrada, estrangulando o ar
b) No escape, com reguladora unidirecional
c) No regulador de pressão da unidade

2 ★ Dois botões, um em cada ponta da máquina, devem comandar a mesma ação. Qual válvula une os sinais?

a) De simultaneidade, função E
b) Alternadora, função OU
c) Retenção simples

3 ★ O que faz um pressostato?

a) Reduz a pressão da linha
b) Transforma pressão em sinal elétrico
c) Impede o ar de voltar

4 ★★ Um cilindro de fixação de 63 mm (31,2 cm²) só pode liberar o passo seguinte com 1 250 N de aperto; a rede tem 6 bar. Em que pressão ajustar a válvula de sequência? E com um cilindro de 50 mm (19,6 cm²)?

5 ★★ **Diagnóstico.** Numa mesa de deslizamento, um cilindro de dupla ação de 50 mm passou a avançar aos trancos depois de uma manutenção: para, ganha pressão e salta, sobretudo quando a carga varia. As duas reguladoras de fluxo unidirecionais, em forma de cotovelo, foram trocadas por peças novas, iguais por fora às antigas, e estão rosqueadas nas duas conexões do cilindro. A rede tem 6 bar e o regulador da unidade está correto. Qual é a causa provável e como confirmá-la sem desmontar o circuito?

6 ★★★ **Projeto.** Um cilindro de 50 mm com haste de 20 mm (câmara dianteira de 16,5 cm²) deve avançar a 80 mm/s numa transferência. Uma máquina igual deve avançar a 15 mm/s, para furação. Nos dois casos a câmara de escape fica a cerca de 6 bar. Usando $Q \approx 6{,}7 \cdot d^2 \cdot (p + 1)$, com Q em L/min de ar livre e d em mm, calcule a passagem da agulha da reguladora em cada caso e diga se a regulagem pneumática atende à furação.

ANOTAÇÕES

12

CAPÍTULO 12 · VÁLVULAS E SIMBOLOGIA

Simbologia e diagramas pneumáticos

O diagrama é a linguagem comum de quem projeta, monta e conserta. Ele não mostra onde as peças estão na máquina: mostra o que cada uma faz e a que está ligada. Com os símbolos da ISO 1219, a energia subindo pela folha e um código único para cada componente, qualquer técnico lê qualquer máquina, de qualquer fabricante. Este capítulo apresenta o vocabulário dos símbolos, a organização do diagrama em níveis, a designação dos componentes e a documentação que acompanha o desenho, que só vale enquanto for igual ao que está montado.

AO FIM DESTE CAPÍTULO, VOCÊ VAI

- Reconhecer os símbolos de linhas, de alimentação, de atuadores e de válvulas.
- Organizar um diagrama pelos níveis de energia e de sinal, de baixo para cima.
- Designar componentes pelo código normalizado, e ler a designação numérica antiga.
- Representar o circuito na posição inicial, com fins de curso e válvulas acionadas.
- Ler um diagrama passo a passo, e identificar a documentação de uma máquina.

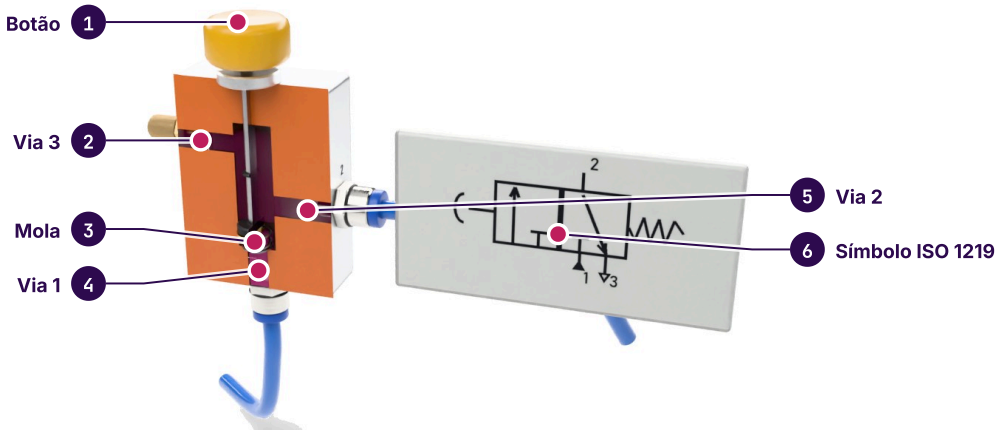


Figura 12.1 A válvula 3/2 de botão e o seu símbolo. Modelo 3D da aula, em corte. No lado maior, a peça mede cerca de 192 mm.

1. **Botão: o quadrado da esquerda.** Apertado, empurra a haste e o obturador: 1 passa a 2. É o quadrado do lado do botão no símbolo.
2. **Via 3: escape.** Pelo silenciador, o ar da via 2 vai embora quando o botão é solto.
3. **Mola de retorno.** Solto o botão, a mola fecha a sede: volta o quadrado da direita, que é o da posição de repouso.
4. **Via 1: pressão.** Entra por baixo e fica presa na sede: em repouso, a via 1 está **bloqueada**. No símbolo, é o T no quadrado da direita.
5. **Via 2: utilização.** Vai para o cilindro ou para o piloto de outra válvula. Em repouso, está ligada ao escape.
6. **O mesmo componente no papel.** O símbolo mostra a **função**, não a construção: duas posições, três vias, botão de um lado, mola do outro. As vias saem do quadrado de repouso.

em 3D e na sua mesa

12.1 O vocabulário: linhas, alimentação, atuadores e válvulas

A linha **contínua** é a de trabalho: leva o ar de potência da alimentação à válvula e da válvula ao atuador. A **tracejada** é a de pilotagem: leva sinais de comando. Linhas que se cruzam com um ponto estão ligadas; sem ponto, apenas passam. Um **triângulo vazado** na ponta da linha, apontando para ela, indica ligação à rede de ar comprimido e poupa o desenho das linhas de alimentação; na via de escape, o triângulo vazado aponta para fora e indica descarga livre para a atmosfera. Em pneumática o triângulo é sempre vazado: cheio, indicaria óleo. Uma moldura de traço e ponto em volta de vários símbolos indica que formam um só corpo.



Figura 12.2 Linhas e terminações. O tipo de traço distingue o ar que move o atuador do ar que apenas comanda.

Tabela 12.1 Grupos de símbolos

Grupo	Elemento básico do símbolo
Alimentação (compressor, filtro, regulador, manômetro)	Círculo para máquinas e instrumentos; losango para tratamento do ar
Atuadores lineares	Retângulo com êmbolo e haste; mola desenhada, se houver
Giratórios e motores	Semicírculo para giro limitado; círculo com triângulos para motores
Válvulas direcionais	Um quadrado por posição
Válvulas de bloqueio	Esfera e sede
Válvulas de fluxo	Dois arcos que estreitam a linha; seta inclinada, se ajustável
Válvulas de pressão	Um quadrado só, com seta, mola e linha de pilotagem

Fonte: grupos de símbolos pneumáticos. Nos símbolos de compressores e motores, o triângulo de sentido do fluxo vazio indica ar; cheio, óleo.

CASE REAL · DETROIT, DÉCADA DE 1940

Um idioma imposto por quem compra

Até a metade do século XX, os diagramas de circuitos de fluidos eram, em geral, desenhos em corte dos componentes, quase impossíveis de ler num circuito com dezenas de válvulas. Cada fabricante desenhava do seu jeito, e o técnico de manutenção precisava aprender um idioma por máquina.

A indústria automobilística americana, concentrada em torno de Detroit, era a maior compradora de máquinas com acionamento hidráulico e pneumático. Na década de 1940, as grandes montadoras e os fabricantes de máquinas-ferramenta formaram um comitê conjunto, conhecido pela sigla JIC, e publicaram normas para os equipamentos que comprariam. Uma delas exigia diagramas com símbolos gráficos padronizados, que representassem a função de cada componente, e não a sua forma. A norma internacional que unificou as práticas foi publicada em 1976 e vem sendo revista desde então.

A lição: a força de uma norma de desenho vem de quem mantém as máquinas: para a fábrica com equipamentos de vinte origens, a linguagem comum é a diferença entre consertar em uma hora e em um dia.

Fontes: Industrial Monitor Direct, JIC Industrial Control Standards: historical reference vs NFPA 79 (normas JIC para máquinas-ferramenta com revisões em 1944, 1956 e 1967; fonte secundária); ISO 1219:1976, primeira edição da norma internacional de símbolos para sistemas hidráulicos e pneumáticos

12.2 De baixo para cima: a estrutura do diagrama

A posição no diagrama segue o papel na cadeia de comando, não o lugar na máquina. De baixo para cima ficam: a **alimentação**, a **entrada de sinais** (botões, pedais, fins de curso), o **processamento** (alternadoras, temporizadores), o **comando final** (a válvula de potência de cada atuador), a **regulagem** (reguladoras de fluxo, escape rápido) e, no alto, os **atuadores**. Vários cilindros ficam lado a lado no alto, na ordem em que se movem, com a haste para a direita e a válvula de potência logo abaixo.

O fim de curso fica junto ao cilindro na máquina, mas no diagrama vai embaixo, com os botões, porque também emite um sinal. Junto ao cilindro, na posição da haste em que ele é tocado, desenha-se um **traço** com o mesmo código da válvula.

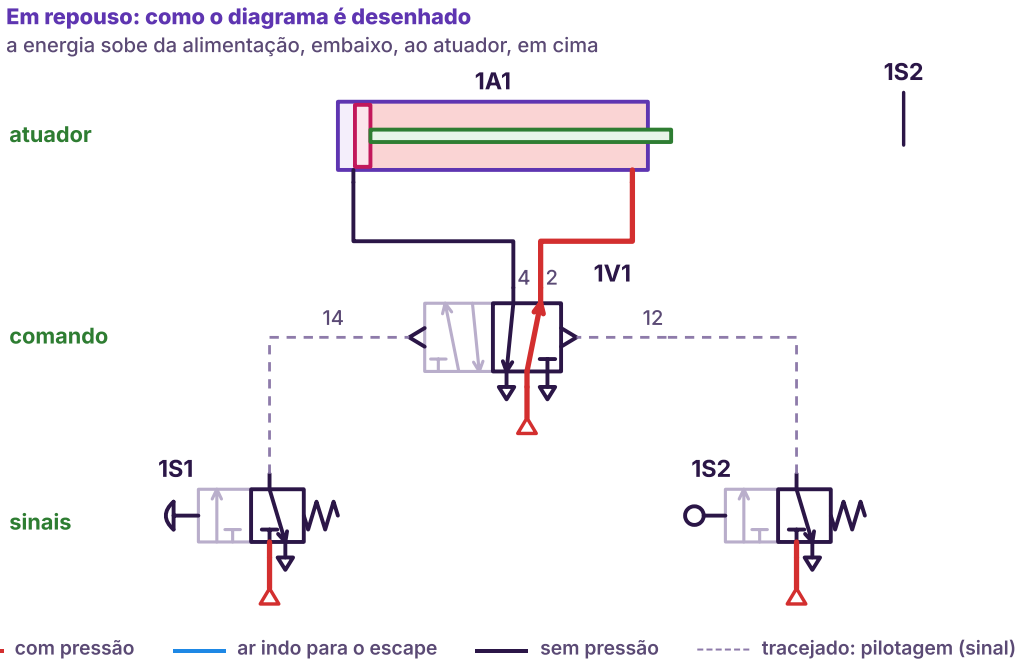


Figura 12.3 Um circuito completo, em três faixas, desenhado em repouso, como manda a norma: só têm pressão as linhas ligadas à alimentação. O botão 1S1 comanda o avanço. O fim de curso 1S2, tocado no fim do avanço, comanda o recuo. No QR, a figura no celular.

O diagrama representa a **posição inicial**: a máquina pressurizada e pronta, antes da partida, com os cilindros em geral recuados. Posição inicial não é repouso (o estado da válvula como sai da caixa). Na maioria dos componentes, os dois coincidem; no fim de curso que a haste recuada já pressiona, não: ele é desenhado **acionado**, com um ressalto junto ao rolete.

EXEMPLO RESOLVIDO

Ler o circuito da Figura 12.3

Na Figura 12.3, 1V1 é uma 5/2 biestável. O que acontece quando o operador aperta e solta o botão 1S1?

01 Posição inicial: 1V1 com 1 ligada a 2, ar na câmara dianteira, haste recuada.

02 1S1 apertado: o sinal chega ao piloto 14, 1V1 liga 1 a 4 e a haste avança. O botão pode ser solto: 1V1 guarda a posição.

03 Fim do avanço: a haste toca o rolete de 1S2, que pilota 12; 1V1 volta a ligar 1 a 2 e a haste recua.

Resposta: Um ciclo completo com um toque no botão. Mas, se o botão ainda estiver apertado quando a haste chegar ao fim, haverá sinal nos dois pilotos e a haste ficará avançada até ele ser solto. Ler o diagrama inclui procurar esses casos.

ERRO QUE CUSTA CARO

Desenhar tudo em repouso

Desenhar todas as válvulas no quadrado da mola é o erro mais comum. Um fim de curso que a haste já pressiona, desenhado em repouso, faz quem lê esperar um sinal que já existe, e a análise do ciclo sai errada.

12.3 O código de cada componente

A designação mais difundida tem três partes: o **número do circuito**, uma **letra** que diz o que o componente é e o **número do componente** dentro do circuito. Em **1V2**, 1 é o circuito, V indica válvula e 2 distingue esta das outras válvulas do circuito 1. Cada atuador, com tudo o que o comanda, forma um circuito (1, 2, 3); a alimentação comum é o circuito 0.

Tabela 12.2

Letra	Tipo de componente	Exemplos
A	Atuadores	1A1: o cilindro do circuito 1
V	Válvulas	1V1: válvula de potência do circuito 1. 1V2, 1V3: reguladoras de fluxo
S	Captadores de sinal	1S1: botão de partida. 1S2: fim de curso
P	Bombas e compressores	0P1: o compressor
M	Motores de acionamento	0M1: o motor do compressor
Z	Todos os demais	0Z1: unidade de conservação. 0Z2: reservatório

Fonte: letras da designação de componentes. O circuito de número 0 reúne a alimentação de energia, comum a todos.

Diagramas feitos até a década de 1990, e muito material didático, usam um sistema só de números, separados por ponto: **1.0** é o atuador do circuito 1 (hoje 1A1) e **1.1** a sua válvula de potência (1V1); **1.2, 1.4, 1.6**, de final par, são os sinais que influem no avanço, e **1.3, 1.5**, de final ímpar, os que influem no recuo; **1.01, 1.02** ficam entre a válvula e o atuador; **0.1, 0.2** são a alimentação. A regra dos pares e ímpares ajuda na procura de defeitos: se o cilindro 2 não avança, os suspeitos são os elementos 2.2, 2.4, 2.6. Em diagramas de sequência, os cilindros viram A, B, C, e os fins de curso a0 e a1 (haste recuada e avançada).

12.4 A documentação e a máquina real

O diagrama vem acompanhado da **lista de componentes** (para compra e reposição), do **diagrama de movimentos**, do **desenho de disposição** (onde cada peça está), da **tabela de ajustes** (pressões, voltas das

reguladoras, tempos) e do **registro de alterações**. Os códigos também vão para a máquina: etiquetas na estrutura, ao lado de cada componente, para sobreviver à troca dele, e nas duas pontas de cada tubo.

NA PRÁTICA

Depois de montar ou alterar, teste função por função

Conferir a montagem contra o desenho não basta. Antes de liberar a máquina, pressurize em baixa pressão e acione cada sinal, um de cada vez, verificando o movimento. Depois, revise o diagrama, com data e autor: uma modificação que não está no desenho não existe para o próximo técnico.

CASE REAL · SUDBURY, CANADÁ, 1973

A tomada que não era de oxigênio

Hospitais distribuem oxigênio, óxido nitroso, ar medicinal e vácuo por redes de tubos embutidos, cada gás com a sua tomada identificada na parede. Em Sudbury, na província canadense de Ontário, um hospital geral ampliou as suas instalações no início da década de 1970. Durante a obra, em algum ponto da tubulação embutida que servia a nova área de emergência, as linhas de oxigênio e de óxido nitroso foram ligadas trocadas.



O antigo prédio do Sudbury General Hospital, em 2024, já desativado. Platttenbau, via Wikimedia Commons · CC BY 4.0

A troca não era visível: as tomadas estavam corretamente identificadas, e os dois gases são incolores e quase sem cheiro. Um paciente grave que recebe gás anestésico no lugar de oxigênio piora, e a piora é atribuída à doença. A situação durou meses, até que, em 1973, a suspeita de um médico levou à análise do gás nas tomadas. O inquérito examinou mais de vinte mortes na área afetada e atribuiu ao menos nove delas à troca. A instalação nova não tinha passado por um teste que verificasse, tomada por tomada, qual gás saía de cada uma. As normas mudaram: conectores de formatos diferentes para cada gás e verificação independente antes do uso.

A lição: a identificação estava perfeita, e errada. Onde a troca é perigosa, a melhor proteção é física: conexões que não permitem a montagem errada.

Fontes: CBC News, Sudbury General Hospital gas deaths, 1973 (inquérito de 23 mortes; ao menos 9 atribuídas à troca das linhas de gás); Time, Medicine: Breath of Death; Toronto Public Library, arquivo digital do Toronto Star (fotos do inquérito de 1974)

PARA LEVAR DESTE CAPÍTULO

1. A linha **contínua** leva o ar de trabalho e a **tracejada**, os sinais de pilotagem; em pneumática o triângulo da alimentação e do escape é sempre vazado, porque cheio indicaria óleo.
2. O diagrama se organiza de baixo para cima: alimentação, entrada de sinais, processamento, comando final, regulagem e, no alto, os **atuadores**, lado a lado na ordem em que se movem.
3. O **fim de curso** é desenhado na faixa de sinais, junto aos botões, e um traço com o mesmo código marca, junto à haste, a posição em que ele é tocado.
4. O diagrama mostra a **posição inicial**, com a máquina pressurizada e pronta; o fim de curso que a haste recuada já pressiona é desenhado acionado, e não em repouso.
5. O código **1V2** reúne o número do circuito, a letra do tipo de componente (A, V, S, P, M ou Z) e o número do componente; a alimentação comum é o circuito 0.
6. Na notação antiga, 1.0 é o atuador e 1.1 a válvula de potência; sinais de final par influem no avanço e os de final ímpar, no recuo, o que orienta a procura de defeitos.

7 Toda alteração é testada **função por função**, em baixa pressão, e lançada no diagrama com data e autor; os códigos vão em etiquetas na estrutura e nas duas pontas de cada tubo.

12.5 Exercícios

Nível: ★ conceito · ★★ aplicação · ★★★ desafio

1 ★ Na notação antiga, o código 1.1 indica:

a) A válvula de potência do circuito 1
b) A primeira folha do desenho da máquina
c) O cilindro pneumático do circuito 1

2 ★ Um fim de curso detecta o cilindro 1A1 avançado. Como ele aparece no diagrama?

a) Desenhado colado ao cilindro, no alto
b) Apenas na lista de componentes
c) Nos sinais, com marca na posição da haste

3 ★ A máquina foi modificada, mas o diagrama não foi atualizado. Qual é o risco?

a) O próximo técnico confiar num desenho errado
b) Nenhum, desde que a máquina funcione bem
c) Só atrasar a compra das peças de reposição

4 ★★ Uma máquina de rotular tem dois cilindros de dupla ação (cada um com válvula 5/2, duas reguladoras e dois fins de curso), um de simples ação (válvula 3/2, uma reguladora, um fim de curso), unidade de conservação, válvula de corte geral, partida suave e dois botões. Quantos componentes aparecem na lista? Designe os do circuito 3 (o de simples ação) e os da alimentação.

5 ★★ **Complete a tabela.** O circuito 2 de uma prensa antiga está documentado na notação só de números. Ele tem o cilindro, a sua válvula 5/2 de potência, o botão de partida, o fim de curso de rolete que manda recuar e a reguladora de fluxo do avanço; a unidade de conservação é da alimentação. Complete a tabela e diga quais elementos são suspeitos se o cilindro não recuar sozinho.

Código antigo	Código atual	Papel na regra antiga
2.0		
2.1		
2.2		
2.3		
2.01		
0.1		

6 ★★★ **Diagnóstico.** Uma máquina de rotular voltou de reforma. No circuito 2, a válvula 2V1 é uma 5/2 biestável, pilotada pelo botão 2S1 (avanço) e pelo fim de curso 2S2, tocado no fim do avanço (recuo); no diagrama, 2A1 está recuado na posição inicial. Ao abrir o ar, 2A1 avança sozinho e fica avançado. Um toque em 2S1 o faz recuar, e daí em diante nada mais o move. 2V1 foi testada em bancada e comuta normalmente. Qual é a causa provável e como confirmar?

ANOTAÇÕES

FICHA DE BANCADA · CAPÍTULO 12

Montar pelo diagrama o circuito em três faixas e etiquetar

Objetivo. Montar na bancada o circuito em três faixas do capítulo 12 a partir do diagrama, identificar cada componente e cada tubo pelo código e testar a montagem função por função.

Nome _____ Turma _____ Data _____

MATERIAL

- ☐ 1 cilindro de dupla ação (1A1)
- ☐ 1 válvula 5/2 de duplo piloto (1V1)
- ☐ 1 válvula 3/2 NF de botão (1S1)
- ☐ 1 válvula 3/2 NF de rolete, fim de curso do avanço (1S2)
- ☐ 1 unidade de conservação com regulador e manômetro (0Z1)
- ☐ 1 distribuidor de ar com conexões rápidas
- ☐ Tubos de 4 mm e de 6 mm, etiquetas adesivas e caneta
- ☐ 1 cronômetro

SEGURANÇA ANTES DE ABRIR O AR

- ☐ Regule a pressão de trabalho em no máximo 6 bar; faça o primeiro teste com cerca de 3 bar.
- ☐ Feche e despressurize a entrada de ar da bancada antes de ligar, soltar ou trocar qualquer tubo.
- ☐ Use óculos de segurança durante toda a prática.
- ☐ Antes de abrir o ar, puxe levemente cada tubo para confirmar que está travado na conexão rápida.
- ☐ Com o circuito pressurizado, mantenha as mãos fora do curso da haste e do rolete de 1S2.

MONTAGEM E TESTE

1. Com o ar fechado, fixe 1A1 no perfil e posicione 1S2 de modo que a haste toque o rolete no fim do avanço.
2. Fixe 1V1 abaixo do cilindro e 1S1 na faixa de sinais, na disposição do diagrama.
3. Com tubo de 6 mm, ligue a alimentação à via 1 de 1V1, a via 4 à câmara traseira e a via 2 à câmara dianteira de 1A1.
4. Com tubo de 4 mm, alimente a via 1 de 1S1 e de 1S2, ligue a saída 2 de 1S1 ao piloto 14 e a saída 2 de 1S2 ao piloto 12.
5. Etiquete cada componente na estrutura e as duas pontas de cada tubo com o código e a via (por exemplo, 1V1-4).
6. Confira a montagem tubo a tubo contra o diagrama, regule 0Z1 em 3 bar e abra o ar: a haste deve ficar recuada.
7. Teste função por função: dê um toque em 1S1 e observe o avanço e o recuo por 1S2; repita a 6 bar e, depois, com 1S1 mantido apertado.

MEDIÇÕES

Ensaio	Tempo de avanço (s)	Tempo de recuo (s)	O que a haste fez
Toque curto em 1S1, a 3 bar			
Toque curto em 1S1, a 6 bar			
1S1 mantido apertado até o fim do avanço, a 6 bar			

O PROFESSOR PROVOCA UM DEFEITO

Com o ar aberto e a pressão normal no manômetro, um toque em 1S1 não move a haste, que continua recuada. Ao soltar o botão, ouve-se o escape de 1S1. Qual é a causa provável, e como você confirma?

CONCLUSÕES

1. Por que 1S2 é desenhado na faixa de sinais, se na bancada está junto ao cilindro?
2. O que aconteceu quando 1S1 ficou apertado até o fim do avanço, e por quê?
3. Que etiqueta permitiu achar o defeito mais depressa: a do componente ou a do tubo?

CAPÍTULO 13 · CIRCUITOS E LÓGICA PNEUMÁTICA

13 Circuitos básicos: comando direto, indireto e ciclo automático

Todo circuito pneumático começa com dois componentes: a válvula e o cilindro. Daí em diante, cada acréscimo resolve um problema. O cilindro é grande e o botão fica longe? Entra uma válvula de potência, e o botão passa só a avisá-la. O operador não deve precisar mandar a haste voltar? Entra um fim de curso. A máquina deve repetir o movimento sozinha? Entra um segundo fim de curso. E, no fim, uma conta simples diz quantas peças por hora o dispositivo entrega, e onde está o tempo que se perde em cada ciclo.

AO FIM DESTE CAPÍTULO, VOCÊ VAI

- Montar o comando direto de cilindros de simples e de dupla ação, e conhecer os seus limites.
- Montar o comando indireto, com válvula de potência monoestável e biestável.
- Obter retorno automático e ciclo contínuo com fins de curso.
- Inserir a regulagem de velocidade e o escape rápido no circuito.
- Calcular o tempo de ciclo e a cadência de um dispositivo.

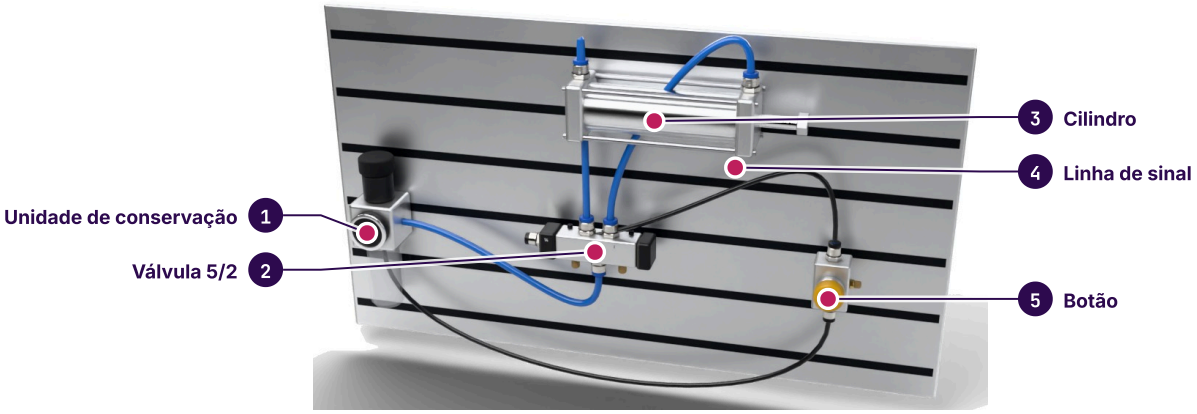


Figura 13.1 O comando indireto, montado na bancada. Modelo 3D da aula, em corte. No lado maior, o conjunto mede cerca de 52 cm.

1. **Unidade de conservação.** Alimenta a válvula de potência e o botão. Todo circuito começa por ela, embaixo, no diagrama.
2. **Válvula de potência 5/2.** Pilotada pelo sinal no 14, comuta e manda o ar da via 1 para a 4: o cilindro avança. Sem sinal, a mola a devolve e o ar vai para a 2.
3. **Cilindro de dupla ação.** Recebe o ar pelos tubos de 6 mm, direto da válvula de potência. Tubo curto entre válvula e cilindro: menos ar perdido a cada ciclo.
4. **Linha de sinal.** Pode ser longa e fina: só enche o piloto. Por isso o botão pode ficar longe da máquina, no painel do operador.
5. **Botão: só um sinal.** O botão é uma 3/2 pequena. Ele **não alimenta o cilindro**: manda um sinal fino, pelo tubo preto de 4 mm, para a válvula de potência.

em 3D e na sua mesa

13.1 Comando direto: o ar do botão é o ar do cilindro

No comando direto, a válvula do operador alimenta o próprio cilindro. Com **simples ação e 3/2**, a válvula em repouso liga a câmara ao escape e a mola mantém a haste recuada; apertado o botão, a via 1 se liga à 2 e a haste avança. Com **dupla ação e 5/2**, o repouso liga 1 à 2 e a câmara dianteira segura a haste recuada com força; apertado o botão, 1 se liga à 4 e a dianteira descarrega pela 3. Nos dois casos, **o movimento acompanha o botão**: soltá-lo no meio do curso faz a haste voltar de onde estiver.

É o circuito de menos componentes, mas todo o ar do cilindro passa pela válvula do operador, que precisa ser grande para um cilindro grande, e os tubos de potência vão até o posto de comando, com volume morto e atraso. Por isso, em geral, só se usa com cilindros de até 25 ou 32 mm, a pouca distância: morsas pneumáticas, pequenas prensas de pedal, bicos de sopro.

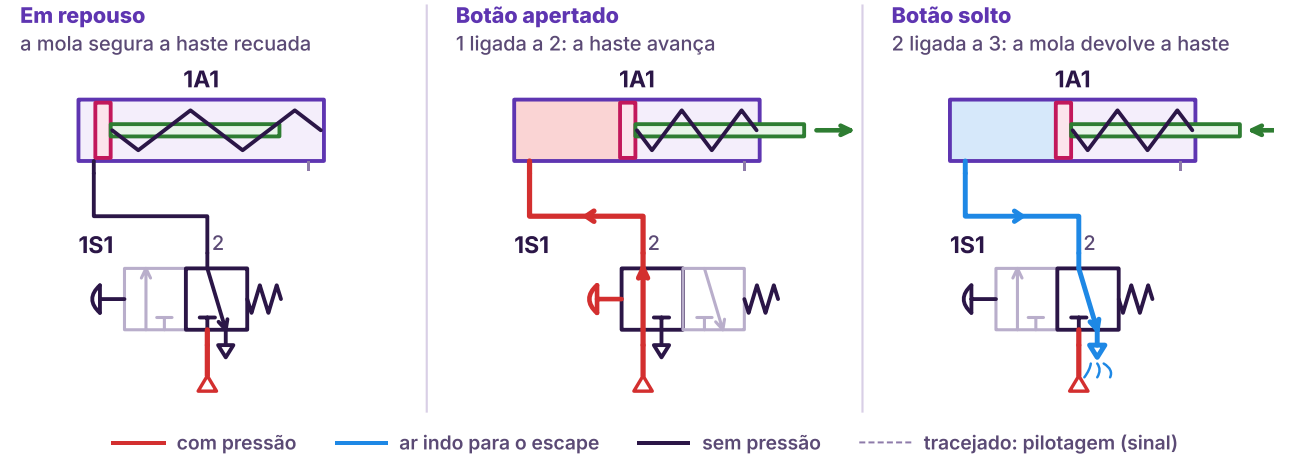


Figura 13.2 Comando direto de um cilindro de simples ação por uma válvula 3/2 de botão, em três situações. O movimento acompanha o botão: solto no meio do curso, a via 2 escapa por 3 e a mola devolve a haste. O de dupla ação, com 5/2, é o da Figura 10.3. No QR, a figura no celular, situação por situação.

13.2 Comando indireto: o botão só envia um sinal

No comando indireto (Figura 13.1), o botão 1S1 apenas pilota, pela entrada 14, a válvula de potência 1V1, montada junto ao cilindro. Com 1V1 **monoestável**, o operador vê o mesmo comportamento do comando direto. Com 1V1 **biestável**, um toque no botão do piloto 14 faz a haste avançar e ficar avançada; um toque no do piloto 12 a faz recuar. A válvula memoriza a última ordem.

Tabela 13.1

Aspecto	Potência monoestável	Potência biestável
Sinal para avançar	Mantido durante todo o tempo em que a haste deve ficar avançada	Um pulso
Sinal para recuar	Nenhum: basta retirar o sinal de avanço	Um pulso, no outro piloto
Botão solto no meio do avanço	A haste volta	A haste completa o curso
Falta de ar de pilotagem	A válvula volta ao repouso	A válvula fica onde está
Cuidado	O sinal precisa durar	Sinais simultâneos nos dois pilotos: vale o primeiro

Fonte: os dois comandos indiretos básicos. A escolha segue o critério do capítulo 10: o que o atuador deve fazer na falta de sinal.

O comando indireto permite cilindros grandes com botões pequenos e **distância** entre o posto de comando e a máquina. Permite **vários pontos de comando** (dois botões unidos por uma alternadora) e **condições** (o

sinal passa por uma simultaneidade, ou por outra 3/2 em série, e só chega ao piloto com a proteção fechada ou a peça presente). O sinal leva alguns centésimos de segundo por metro de tubo fino para chegar; em linhas de dezenas de metros, o atraso se torna perceptível, e é uma das razões para o comando elétrico em máquinas grandes.

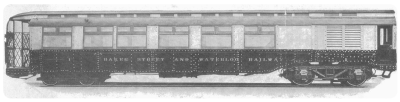
O QUE A NORMA DIZ

Lógica pneumática não é proteção das mãos

Uma prensa que avança pelo botão A **ou** pelo B, **e** só com a proteção fechada, resolve-se com uma alternadora e uma simultaneidade. Essa lógica organiza o comando, mas não protege o operador: em uma prensa real, a proteção das mãos exige componentes de segurança, como visto no capítulo 11, e a NR-12 exige a parada de emergência definida pela análise de risco.

CASE REAL · LONDRES, INÍCIO DA DÉCADA DE 1920

Um botão para as portas de um trem inteiro



Autor desconhecido (cerca de 1906), via Wikimedia Commons · Domínio público

Os primeiros trens das linhas profundas do metrô de Londres, abertas a partir de 1890, recebiam os passageiros pelas pontas dos vagões, por plataformas com portões de ferro. Em cada junção entre dois vagões viajava um funcionário, que abria e fechava os portões à mão: um trem de seis vagões levava cinco deles. Com o aumento do movimento, as aberturas estreitas viraram o gargalo do sistema.

A solução foram portas corrediças largas no meio da lateral, cada uma movida por um cilindro pneumático alimentado pelo ar que o trem já produzia para os freios. Os primeiros vagões com portas a ar entraram em serviço por volta de 1920 e, a partir de 1923, uma grande série de trens novos adotou o sistema. O guarda apertava um botão que enviava um sinal elétrico ao longo do trem; junto a cada porta, uma válvula comandada por esse sinal admitia ar no cilindro. Um homem passou a operar todas as portas. Vieram também força de fechamento limitada e bordas de borracha, um contato por porta que só liberava a partida com todas fechadas, e alívio manual do ar para evacuar o trem sem energia.

A lição: é o comando indireto em escala de trem. Quando o botão sai de perto do cilindro, é preciso um sinal de volta que confirme o movimento, uma força limitada pelo que pode estar no caminho e um meio de mover o atuador sem energia.

Fontes: Wikipedia (inglês), London Underground 1920 Stock (primeiros carros projetados com portas a ar) e London Underground Standard Stock (série de 1923); London Transport Museum, registro fotográfico 1998-70054 (posto do guarda num carro convertido para portas a ar, 1920 a 1923)

13.3 Retorno automático e ciclo contínuo

Com a válvula de potência biestável, o botão de recuo pode ser trocado por uma 3/2 de rolete, 1S2, no fim do avanço: um toque na partida, a haste avança, toca o rolete e o sinal dele pilota o recuo. Para o **ciclo contínuo**, um segundo fim de curso, 1S1, na posição recuada, passa a dar o sinal de avanço, e uma chave com trava, 1S3, o alimenta. Desligada a chave, a haste termina o ciclo em andamento e para recuada. A chave nunca deve pilotar o avanço diretamente: o sinal seria permanente, e 1S2 não conseguiria comandar o recuo.

O circuito funciona porque os dois sinais nunca existem juntos: cada fim de curso dá um sinal que some assim que o movimento que ele comandou começa. Mas, se o operador mantiver o botão de partida apertado quando a haste tocar 1S2, haverá sinal nos dois pilotos, e a biestável, que obedece ao primeiro, não volta; a saída é transformar a partida num pulso curto, com o formador de pulso do capítulo 14. Alimentar a partida

através do fim de curso recuado garante que um ciclo só comece com a haste toda recuada.

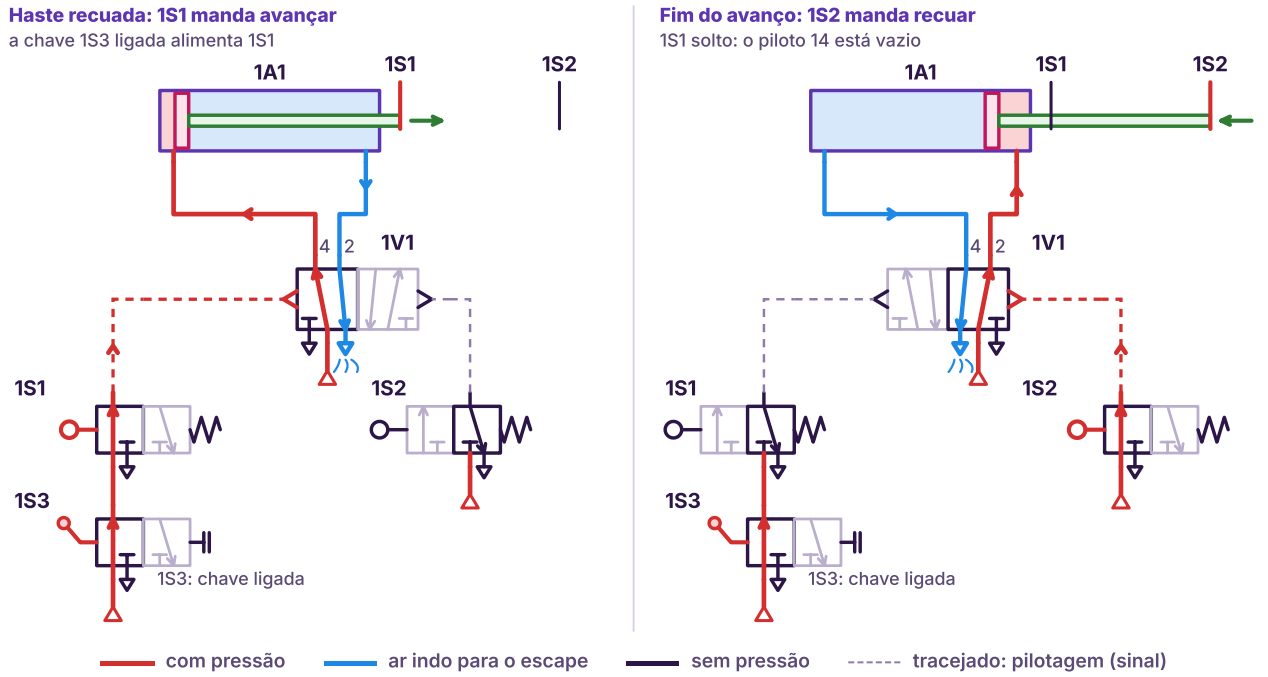


Figura 13.3 Ciclo contínuo, em duas situações. A chave 1S3 ligada alimenta o fim de curso 1S1: com a haste recuada, 1S1 tocado pilota o avanço; no fim do avanço, 1S2 pilota o recuo. Os dois sinais nunca existem juntos, e por isso a válvula biestável sempre obedece. No QR, a figura no celular, situação por situação.

CASE REAL · DETROIT E CHICAGO, 1893

O martelo que é um ciclo contínuo

No fim do século XIX, cascos de navios, caldeiras e pontes eram unidos por rebites aquecidos ao rubro e esmagados a golpes alternados de marreta por dois homens, enquanto um terceiro segurava o rebite pelo outro lado. As prensas rebitadoras eram máquinas fixas.

Charles King, engenheiro de Detroit, apresentou na exposição mundial de Chicago, em 1893, um martelo pneumático portátil, que patenteou no ano seguinte. Um homem o segurava com as duas mãos, e ele batia mais de mil vezes por minuto. Dentro, um êmbolo pesado corre livre: o ar o empurra contra a ferramenta e, perto do fim do curso, o próprio êmbolo descobre um furo na parede, por onde a pressão chega a uma pequena válvula e a inverte. O êmbolo volta, descobre outro furo, e a válvula inverte de novo. O gatilho é a chave de ciclo contínuo. Um operador e um ajudante passaram a substituir uma equipe. Os efeitos vieram depois: a vibração prolongada lesa vasos e nervos das mãos, e o ruído causa surdez; as ferramentas atuais têm punhos amortecidos, e normas limitam o tempo de exposição.

A lição: o fim de curso não precisa ser uma válvula de rolete: qualquer coisa que transforme a chegada do êmbolo em sinal serve. E o ciclo só funciona porque cada sinal de inversão some logo depois de agir; quando um sinal permanece, o ciclo trava.

Fontes: Detroit Historical Society, Charles B. King (martelo pneumático premiado na Exposição de Chicago de 1893); Patente US 513 941, C. B. King, ferramenta pneumática, 30/01/1894

13.4 Velocidade no circuito e tempo de ciclo

As reguladoras de fluxo unidirecionais entram entre a válvula de potência e o cilindro, junto às conexões dele, estrangulando o escape (capítulo 11): a dianteira regula o avanço, a traseira, o recuo. Para recuo rápido, uma válvula de escape rápido na conexão traseira. O tempo de ciclo soma avanço (curso ÷

velocidade), parada, recuo e espera, e a cadência é 60 dividido por ele.

EXEMPLO RESOLVIDO

A cadência de um dispositivo

Um cilindro de 200 mm de curso avança a 0,125 m/s, fica 0,4 s avançado, recua a 0,5 m/s, e espera 0,4 s pela próxima peça. Qual é o tempo de ciclo, e quantas peças faz por hora?

01 Avanço: 0,2 ÷ 0,125 = 1,6 s.

02 Recuo: 0,2 ÷ 0,5 = 0,4 s.

03 Ciclo: 1,6 + 0,4 + 0,4 + 0,4 = 2,8 s.

04 Cadência: 60 ÷ 2,8 = 21,4 ciclos por minuto, ou 1 286 por hora.

Resposta: 2,8 segundos, e cerca de 1 290 peças por hora. O avanço lento toma 57 % do ciclo. Se o processo só exige velocidade baixa nos últimos 30 mm, uma aproximação rápida, com redução no trecho final, encurta o avanço para cerca de 0,6 s, e a cadência sobe para 33 ciclos por minuto: 55 % a mais. Antes de regular tudo devagar, convém saber em que trecho a lentidão é necessária.

ERRO QUE CUSTA CARO

Regular tudo devagar

Estrangular o curso inteiro por causa de um trecho é o erro mais comum de regulagem: meça o tempo de ciclo antes e depois de cada ajuste. E, se a haste deve ficar um tempo avançada, ou fazer força antes de voltar, o fim de curso sozinho não serve: o sinal dele passa por um temporizador ou é trocado pelo de uma válvula de sequência (capítulo 11).

PARA LEVAR DESTE CAPÍTULO

1. No **comando direto**, a válvula do operador alimenta o próprio cilindro e o movimento acompanha o botão; em geral só se usa com cilindros de até 25 ou 32 mm, a pouca distância.
2. No **comando indireto**, o botão apenas pilota a válvula de potência montada junto ao cilindro, o que permite cilindros grandes, distância, vários pontos de comando e condições.
3. Com potência **monoestável**, o sinal precisa durar todo o tempo em que a haste deve ficar avançada; com **biestável**, basta um pulso, e a válvula memoriza a última ordem.
4. No retorno automático, um fim de curso 1S2 no fim do avanço pilota o recuo; no **ciclo contínuo**, 1S1 na posição recuada dá o avanço, alimentado pela chave com trava 1S3.
5. O ciclo contínuo funciona porque os dois sinais nunca existem juntos; a chave nunca pilota o avanço diretamente, e uma partida mantida apertada deixa a biestável presa no avanço.
6. As reguladoras de fluxo unidirecionais ficam junto às conexões do cilindro, estrangulando o escape: a da conexão dianteira regula o avanço, e a da traseira, o recuo.
7. O **tempo de ciclo** soma avanço (curso ÷ velocidade), parada, recuo e espera, e a **cadência**, em ciclos por minuto, é 60 dividido por ele.

PARA NÃO ESQUECER cadência = 60 ÷ (avanço + parada + recuo + espera)

13.5 Exercícios

Nível: ★ conceito · ★★ aplicação · ★★★ desafio

1 ★ O cilindro fica a 8 m dos postos de comando. Por que usar comando indireto?

a) Porque o comando direto é proibido
b) O tubo longo de potência deixaria tudo lento
c) Porque o botão não aguenta 6 bar

2 ★ A prensa avança pelo botão A ou pelo B, mas só com a proteção fechada. Qual é a condição?

a) A E B E proteção
b) A OU B OU proteção
c) (A OU B) E proteção

3 ★ A válvula de potência é monoestável, e o botão é de pulso. O cilindro:

a) Recua assim que o botão é solto
b) Completa o curso e fica avançado
c) Para no meio do curso ao soltar

4 ★★ Um cilindro de 300 mm de curso avança a 150 mm/s, permanece avançado por 1,0 s, recua a 600 mm/s e espera 0,5 s pela peça seguinte. Qual é a cadência, em ciclos por minuto e em peças por hora? Se a velocidade de avanço dobrar, qual é o ganho de produção?

5 ★★ **Leitura.** Um dispositivo de retorno automático tem o botão de partida 1S1 no piloto 14 e o fim de curso 1S2, tocado no fim do avanço, no piloto 12 de uma 5/2 biestável, 1V1. A válvula queimou e o almoxarifado só tinha uma 5/2 monoestável, de piloto 14 e mola. O técnico a instalou ligando 1S1 ao piloto 14 e deixou o tubo de 1S2 tampado. O que o operador vê quando dá um toque curto em 1S1? E quando mantém o botão apertado?

6 ★★★ **Projeto.** Uma prensa de montagem tem cilindro de 200 mm de curso. O avanço é regulado em 80 mm/s, porque a prensagem pede baixa velocidade, mas só nos últimos 20 mm. A haste fica 0,6 s avançada, recua a 400 mm/s e espera 0,9 s pela peça seguinte. A meta é de 1 200 peças por hora. A prensa atende? Reduzir a espera resolve? Proponha uma solução e confira a cadência com aproximação rápida a 300 mm/s nos primeiros 180 mm.

ANOTAÇÕES

FICHA DE BANCADA · CAPÍTULO 13

Montar e regular o ciclo contínuo com dois fins de curso

Objetivo. Montar o ciclo contínuo do capítulo 13, com a chave 1S3 e os fins de curso 1S1 e 1S2, regular as velocidades no escape e medir o tempo de ciclo e a cadência.

Nome _____ Turma _____ Data _____

MATERIAL

- ☐ 1 cilindro de dupla ação (1A1)
- ☐ 1 válvula 5/2 de duplo piloto (1V1)
- ☐ 2 reguladoras de fluxo unidirecionais, nas conexões traseira (1V2) e dianteira (1V3) de 1A1
- ☐ 2 válvulas 3/2 NF de rolete, fins de curso recuado (1S1) e avançado (1S2)
- ☐ 1 válvula 3/2 NF com trava, chave de ciclo contínuo (1S3)
- ☐ 1 unidade de conservação com regulador e manômetro (0Z1)
- ☐ Distribuidor de ar, tubos de 4 mm e de 6 mm
- ☐ 1 cronômetro

SEGURANÇA ANTES DE ABRIR O AR

- ☐ Trabalhe com no máximo 6 bar e comece os ensaios com 4 bar.
- ☐ Feche o ar e descarregue o circuito antes de mexer em qualquer conexão ou mudar um fim de curso de lugar.
- ☐ Use óculos de segurança, sobretudo ao regular as agulhas com o circuito pressurizado.
- ☐ Confira que cada tubo está travado na conexão rápida antes de abrir o ar.
- ☐ Com a chave 1S3 ligada a haste se move sozinha: mantenha as mãos fora do curso dela e dos roletes.

MONTAGEM E TESTE

1. Com o ar fechado, fixe 1A1 e rosqueie 1V2 na conexão traseira e 1V3 na dianteira, ambas para regular o escape.
2. Fixe 1S1 de modo que a haste recuada pressione o rolete, e 1S2 no ponto em que a haste o toca no fim do avanço.
3. Ligue a alimentação à via 1 de 1V1, a via 4 a 1V2 e a via 2 a 1V3, com tubo de 6 mm.
4. Com tubo de 4 mm, alimente 1S3, ligue a saída de 1S3 à via 1 de 1S1 e a saída de 1S1 ao piloto 14.
5. Alimente 1S2 e ligue a saída dele ao piloto 12.
6. Com 1S3 desligada, abra as agulhas de 1V2 e 1V3, regule 0Z1 em 4 bar e abra o ar: a haste deve ficar recuada.
7. Ligue 1S3, meça avanço, recuo e ciclos em 1 minuto; depois feche 1V3 e 1V2, uma de cada vez, repetindo as medidas.
8. Desligue 1S3 com a haste no meio do avanço e verifique que ela termina o ciclo e para recuada.

MEDIÇÕES

Situação	Tempo de avanço (s)	Tempo de recuo (s)	Ciclos em 1 min
Agulhas de 1V2 e 1V3 abertas			
1V3 fechada até avanço lento			
1V2 fechada até recuo lento			
Mesmas agulhas, com 6 bar			

O PROFESSOR PROVOCA UM DEFEITO

Com a chave 1S3 ligada, a haste avança até o fim do curso e fica parada avançada. O ciclo não se repete, e desligar a chave não faz a haste recuar. Qual é a causa provável, e como você confirma?

_____

_____

CONCLUSÕES

1. Por que a chave 1S3 alimenta 1S1, em vez de pilotar 14 diretamente?

_____

2. Qual reguladora mudou o tempo de avanço, e por quê?

_____

3. Calcule a cadência pelo tempo de ciclo medido e compare com a contagem de 1 minuto.

_____

CAPÍTULO 14 · CIRCUITOS E LÓGICA PNEUMÁTICA

14 Lógica, memória e tempo: o circuito que decide e espera

Uma prensa não deve avançar só porque alguém apertou um botão. Deve avançar se o botão for apertado, **e** a proteção estiver fechada, **e** a emergência não estiver acionada. Depois, precisa lembrar que foi ligada, mesmo com o botão solto, e esperar alguns segundos com a haste avançada antes de voltar. Decidir, lembrar e esperar: um circuito de ar faz as três coisas com válvulas comuns, desde que o projetista escreva a condição antes de desenhar e saiba de que depende o tempo de um temporizador pneumático.

AO FIM DESTE CAPÍTULO, VOCÊ VAI

- Realizar as funções SIM, NÃO, E e OU com válvulas pneumáticas, e ler tabelas-verdade.
- Traduzir uma condição de funcionamento em expressão lógica e em circuito.
- Construir memórias com válvula biestável e com autorretenção.
- Explicar e ajustar um temporizador pneumático, com retardo na ligação e no desligamento.
- Reconhecer sensores pneumáticos sem contato e contadores.

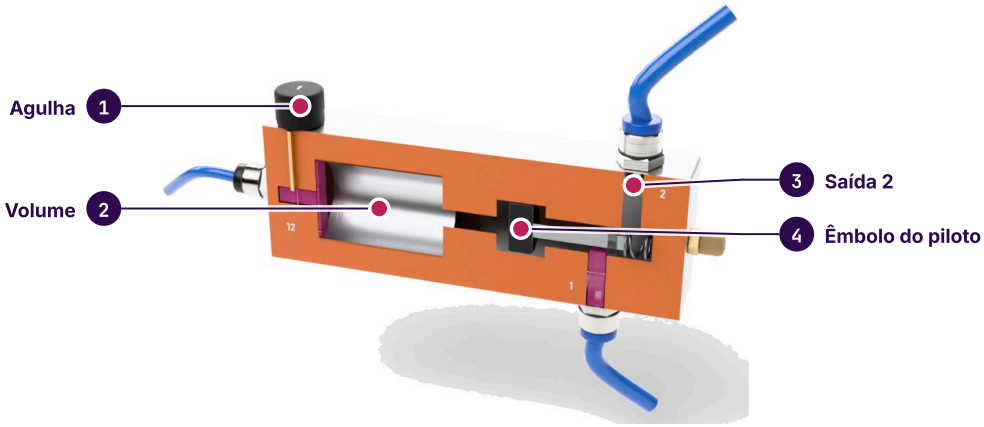


Figura 14.1 O temporizador pneumático, em corte. Modelo 3D da aula, em corte. No lado maior, o conjunto mede cerca de 20 cm.

1. **Agulha de ajuste do tempo.** Estrangula a entrada do sinal 12. Mais fechada, o volume enche mais devagar: o tempo aumenta.
2. **Volume (pequeno reservatório).** O ar do sinal enche este volume aos poucos. A pressão sobe devagar, conforme a curva de enchimento.
3. **Saída temporizada (via 2).** Só depois do tempo ajustado a via 1 passa à 2. Se a pressão do sinal cair, o tempo muda: por isso o sinal vem regulado.
4. **Êmbolo do piloto.** Quando a pressão no volume chega à de comutação, o êmbolo vence a mola e empurra o obturador.

em 3D e na sua mesa

14.1 SIM, NÃO, E e OU com válvulas

Em lógica pneumática, só interessa se um sinal existe (valor 1) ou não existe (valor 0). Considera-se presente um sinal com pressão acima da necessária para comutar um piloto, e ausente um sinal totalmente

descarregado. Com esses dois estados e quatro funções, escreve-se qualquer condição de comando.

Tabela 14.1

Função	Significado	Como se realiza com ar
SIM, ou identidade	A saída repete a entrada	Válvula 3/2 normalmente fechada, pilotada. Serve para regenerar e amplificar um sinal fraco
NÃO, ou negação	Há saída quando não há entrada	Válvula 3/2 normalmente aberta, pilotada
E, ou conjunção	Há saída só se todas as entradas existirem	Válvula de simultaneidade. Ou válvulas 3/2 em série
OU, ou disjunção	Há saída se qualquer entrada existir	Válvula alternadora
NÃO-E e NÃO-OU	A negação das duas anteriores	A função, seguida de uma válvula normalmente aberta

Fonte: funções lógicas básicas e a sua realização pneumática.

A negação serve para muito: uma 3/2 normalmente aberta, pilotada pelo sinal B e alimentada pelo sinal A, realiza "A e não B", o **bloqueio**: com A como partida e B como emergência, a partida passa, desde que a emergência não esteja acionada.

O método: primeiro se escreve em palavras o que deve existir para que a saída exista; depois cada palavra vira um componente. Para "o cilindro avança se o botão B1 ou o B2 for apertado, e a proteção P estiver fechada, e a emergência E não estiver acionada", a expressão é **S = (B1 ou B2) e P e não E**: uma alternadora para o OU, uma ligação em série para cada E (alimentar os botões pela saída da válvula da proteção faz o E sem componente extra) e uma válvula normalmente aberta, acionada pela emergência, para o NÃO. Por fim, confere-se a tabela-verdade, sobretudo nas combinações que **não** devem dar saída.

CASE REAL · WASHINGTON, DE 1959 A MEADOS DA DÉCADA DE 1970

A lógica sem peças móveis

No fim da década de 1950, os controles de mísseis e de aeronaves dependiam de componentes sensíveis a vibração, temperatura e radiação. Em um laboratório de pesquisa do exército americano, em Washington, Billy Horton propôs em 1959 um amplificador em que um jato de fluido era desviado por dois jatos laterais muito mais fracos. Raymond Warren e Romald Bowles, no mesmo laboratório, aproveitaram a tendência de um jato a aderir a uma parede próxima: entre duas paredes divergentes, ele adere a uma e fica, até um pulso de controle jogá-lo para a outra. Era uma memória biestável sem nenhuma peça móvel.

Os resultados foram divulgados em 1960, e a tecnologia ganhou um nome: fluídica. Com a mesma geometria obtinham-se E, OU, NÃO, osciladores e contadores, moldados em uma placa como um labirinto de canais. Mas os elementos consomem ar o tempo todo, trabalham com pressões muito baixas e exigem ar extremamente limpo, e os circuitos integrados eletrônicos caíram de preço mais depressa do que qualquer tecnologia mecânica. Em meados da década de 1970, a fluídica havia saído do comando de máquinas.

A lição: a lógica não pertence a nenhuma tecnologia; o que decide qual fica é o custo de cada decisão. A lógica de válvulas sobreviveu porque trabalha com a pressão da rede e só gasta ar ao comutar, mas, acima de uma dezena de funções, o controlador eletrônico é mais barato e mais fácil de diagnosticar.

Fontes: Wikipedia (inglês), Fluidics (Harry Diamond Laboratories, 1959); Google Patents, US 3 024 805, Negative feedback fluid amplifier (pedidos de Horton, Bowles e Warren, 1959 e 1960)

14.2 Memória: biestável e autorretenção

Sinais de botões e de fins de curso são curtos; os movimentos que eles comandam duram mais, e é preciso um elemento que guarde a ordem. A **válvula biestável**, de duplo piloto e sem mola, é a memória mais usada: um pulso em um piloto a leva a uma posição, onde ela fica por atrito, e um pulso no outro a traz de volta. Guarda o estado mesmo sem ar, e, com os dois sinais presentes, vale o primeiro que chegou.

A **autorretenção** usa uma válvula monoestável e uma realimentação: a saída volta ao próprio piloto por uma alternadora e sustenta a válvula depois que o botão de ligar é solto. Na Figura 14.2, como o botão de desligar fica em série com o piloto, nenhum sinal chega enquanto ele está acionado, e **desligar vence**. Se ele estivesse só no ramo da realimentação, o botão de ligar teria um caminho próprio e ligar venceria. Na falta de ar, a saída some, a realimentação some e a mola devolve a válvula: ao voltar o ar, o circuito está desligado.

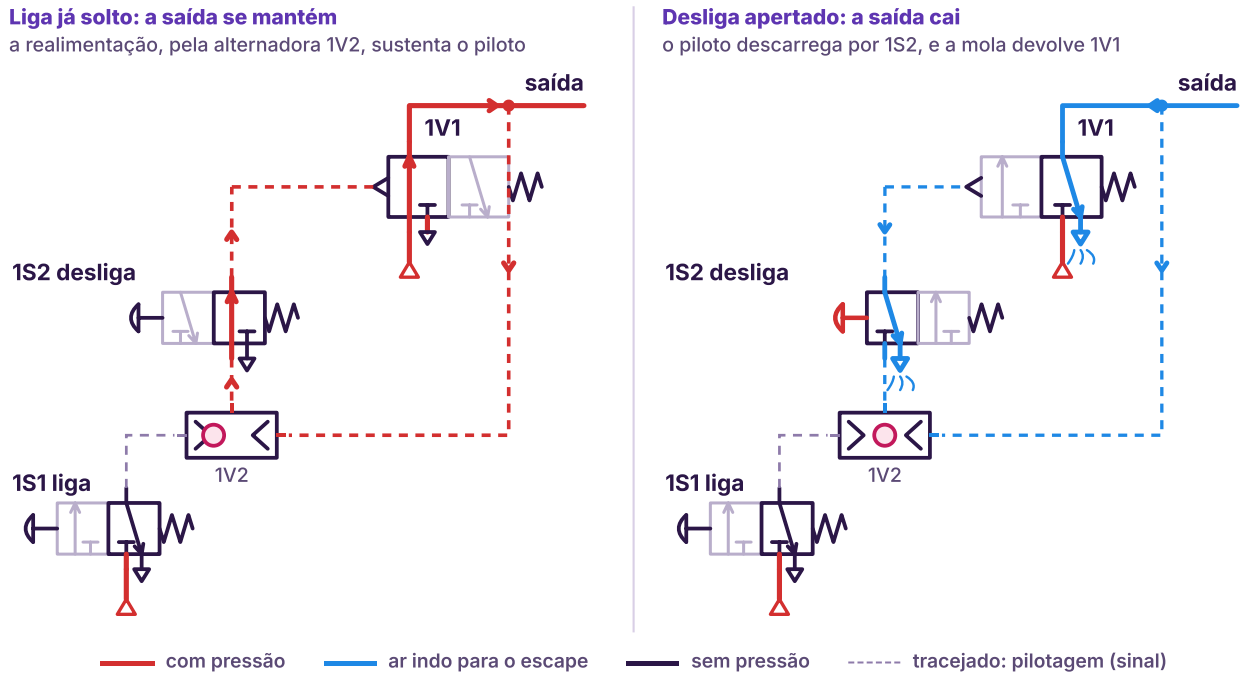


Figura 14.2 Autorretenção com desligar dominante, em duas situações. Depois de um toque em 1S1, a saída volta pela alternadora 1V2 e sustenta o próprio piloto. Apertar 1S2 corta esse caminho e descarrega o piloto, e a mola devolve 1V1. No QR, a figura no celular, situação por situação.

ERRO QUE CUSTA CARO

Memória sem pensar no religamento

Máquina que volta a se mover sozinha quando o ar retorna é um perigo. A biestável guarda a posição em que foi deixada e não serve como memória de partida e parada. Para isso, use autorretenção com desligar dominante.

14.3 O temporizador pneumático

O temporizador da Figura 14.1 reúne um estrangulamento, um pequeno reservatório e uma 3/2 pilotada. No **retardo na ligação**, o sinal chega e a saída só aparece depois do tempo ajustado; retirado o sinal, o reservatório se esvazia depressa pela retenção, e a saída some de imediato. Invertendo a retenção, obtém-se o **retardo no desligamento**, que prolonga um sinal curto. E, com uma 3/2 normalmente aberta, alimentada pelo próprio sinal, o temporizador vira **formador de pulso**: a saída existe desde que o sinal chega e é cortada depois do tempo, o que encurta um sinal longo.

O enchimento segue, de modo simplificado, $p(t) = p_s \cdot (1 - e^{-t/\tau})$, em que p_s é a pressão do sinal e τ, a constante de tempo, que cresce com o volume do reservatório e com o fechamento da agulha. A válvula comuta quando a pressão atinge p_c, a de comutação do piloto, e o retardo vale:

$$t = \tau \cdot \ln \frac{p_s}{p_s - p_c}$$

Tempo de retardo do temporizador pneumático (modelo simplificado).

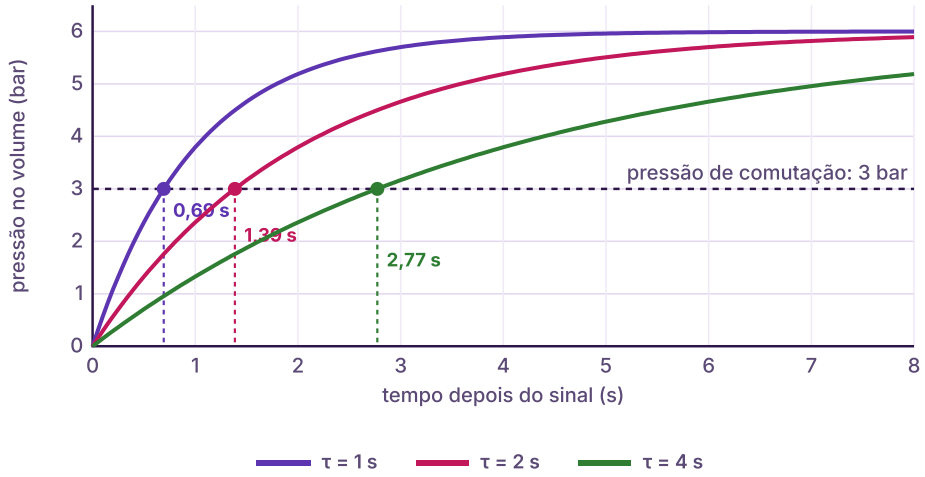


Figura 14.3 Pressão no volume do temporizador depois que chega o sinal de 6 bar, para três ajustes da agulha (constante de tempo τ). A válvula comuta quando a curva cruza 3 bar: como a comutação é na metade da pressão do sinal, o retardo é sempre cerca de 70 % de τ.

EXEMPLO RESOLVIDO

O efeito da pressão sobre o tempo

Um temporizador está ajustado para 4,2 s, com sinal de 6 bar e comutação em 3 bar. A pressão do sinal cai para 5 bar. Qual é o novo tempo?

01 Com 6 bar: $t = \tau \times \ln(6 \div 3) = 0{,}693 \times \tau$. Para 4,2 s, $\tau = 6{,}0$ s.

02 Com 5 bar: $t = 6{,}0 \times \ln(5 \div (5 - 3)) = 6{,}0 \times 0{,}916 = 5{,}5$ s.

Resposta: 5,5 segundos: 31 % a mais, por uma queda de 1 bar. Se a pressão caísse para 3,5 bar, o tempo passaria de 11 s. E, com 3 bar ou menos, a válvula nunca comutaria. É a razão para alimentar temporizadores, e todo o comando, com pressão regulada, independente das oscilações da rede. O modelo é simplificado, e a tendência é a observada na prática.

NA PRÁTICA

Cuidados com o temporizador

O volume interno dá até cerca de 30 s. A passagem da agulha é de décimos de milímetro: exige ar limpo e seco. Ajuste com cronômetro, na máquina, e registre o valor.

14.4 Sensores sem contato e contadores

Tabela 14.2 **Sensores pneumáticos sem contato**

Sensor	Como funciona	Onde se usa
Bocal de retropressão	Um objeto obstrui o jato fraco, e a pressão dentro do bocal sobe	Presença a frações de milímetro, batentes
Barreira de ar	Um emissor sopra para um receptor; a peça interrompe o jato	Passagem de peças, a centímetros
Sensor reflexivo	Um bocal anelar sopra, e o orifício central capta o ar refletido	Presença a alguns milímetros

Fonte: sensores pneumáticos que dispensam o contato mecânico de um rolete.

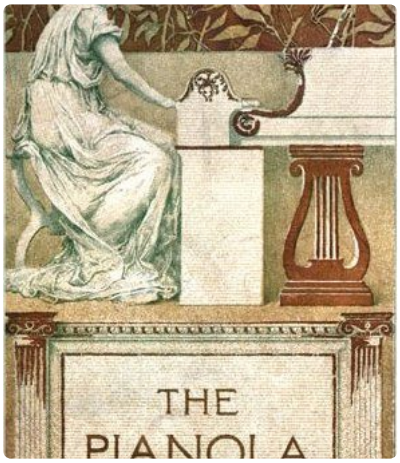
Os sensores de jato da Tabela 14.2 trabalham com 0,1 a 0,2 bar e entregam sinais de milésimos de bar, que nenhuma válvula comum percebe. Um **amplificador**, 3/2 com membrana grande no piloto, comuta com esse sinal e entrega a pressão normal da rede: é a função SIM com ganho. Sem contato nem faísca, funcionam em calor, poeira e áreas explosivas, mas gastam ar o tempo todo.

O **contador** com pré-seleção recebe um pulso por ciclo (o fim de curso avançado) e, atingido o número ajustado, emite um sinal. Esse sinal, levado à autorretenção de ciclo contínuo como segundo sinal de desligar, por uma alternadora, encerra o lote: o ciclo em andamento termina e a máquina para na posição inicial.

CASE REAL · DETROIT E NOVA YORK, DE 1895 A 1908

O piano que tocava com sopros

A versão do piano automático que definiu o mercado foi construída em 1895 por Edwin Votey, em Detroit, e lançada poucos anos depois por uma fabricante de Nova York com um nome que virou sinônimo do instrumento: pianola. Não havia eletricidade. Pedais moviam foles que criavam vácuo em um reservatório, e um rolo de papel perfurado passava sobre uma barra de latão com um furo para cada nota. Onde havia perfuração, o ar atmosférico entrava.



Aeolian Company (1898), via Wikimedia Commons · Domínio público

Esse ar, o que passa por um furo de menos de dois milímetros, era o sinal, fraco demais para mover um martelo. O mecanismo o amplificava em dois estágios: o ar levantava uma membrana de couro, que movia uma válvula do tamanho de um botão, que ligava ao vácuo um fole de alguns centímetros, e o fole empurrava a tecla. Quando o papel voltava a tapar o furo, uma pequena fuga calibrada desfazia o sinal. Em cada nota havia um sensor, um amplificador e um atuador. Em 1908, os fabricantes americanos padronizaram o rolo de 88 notas, e um rolo de qualquer editora passou a servir em qualquer piano.

A lição: a membrana com a válvula é a função SIM com ganho, que regenera um sinal sem força. E a fuga calibrada lembra que todo sinal precisa de um caminho para desaparecer: sem escape, a lógica trava.

Fontes: Pianola Institute, Edwin Votey, inventor of the Pianola (primeira pianola em Detroit, 1895); Wikipedia (inglês), Aeolian Company (marca Pianola usada a partir de janeiro de 1898, em Nova York)

PARA LEVAR DESTE CAPÍTULO

1. Em lógica pneumática, um sinal vale 1 quando tem pressão para comutar um piloto e 0 quando está totalmente descarregado; com SIM, NÃO, E e OU escreve-se qualquer condição de comando.
2. O método é escrever a condição em palavras, como **S = (B1 ou B2) e P e não E**, trocar cada palavra por um componente e conferir a **tabela-verdade**, sobretudo nas combinações sem saída.
3. A **válvula biestável** guarda a última ordem por atrito, mesmo sem ar, e com os dois sinais presentes vale o primeiro; por isso não serve como memória de partida e parada.
4. Na **autorretenção** com desligar dominante, a saída volta ao próprio piloto pela alternadora; na falta de ar, a mola devolve a válvula e a máquina não religa sozinha quando o ar volta.
5. O temporizador pneumático reúne estrangulamento, reservatório e 3/2 pilotada; o retardo vale $t = \tau \cdot \ln[ps \div (ps - pc)]$ e aumenta quando a pressão do sinal cai.
6. Com a retenção invertida, o temporizador dá **retardo no desligamento**, que prolonga um sinal curto; com uma 3/2 normalmente aberta, vira **formador de pulso**, que encurta um sinal longo.
7. Sensores de jato trabalham com 0,1 a 0,2 bar e precisam de um **amplificador**; o contador com pré-seleção encerra o lote levando o seu sinal à autorretenção como segundo desligar.

PARA NÃO ESQUECER $t = \tau \cdot \ln[ps \div (ps - pc)]$

14.5 Exercícios

Nível: ★ conceito · ★★ aplicação · ★★★ desafio

1 ★
A lâmpada de aviso deve acender com o sinal A presente e o sinal B ausente. Qual é a função?

a) A OU B
b) A E (NÃO B)
c) NÃO (A E B)

2 ★
Na autorretenção pneumática, o ar falta e depois volta. A máquina:

a) Não religa sozinha
b) Volta ao estado anterior
c) Dá um ciclo e para

3 ★
Sem mexer no ajuste, o sinal de entrada do temporizador cai de 6 para 5 bar. O retardo:

a) Diminui, porque há menos ar
b) Não muda, o ajuste é o mesmo
c) Aumenta

4 ★★
Um temporizador tem constante de tempo de 10 s, sinal de 6 bar e comutação em 3 bar. Qual é o retardo? E com o sinal a 4 bar?

5 ★★ **Complete a tabela.** A prensa avança com S = (B1 ou B2) e P e não E: botão B1 ou B2 apertado, proteção P fechada e emergência E solta. Complete a tabela-verdade (1 = sinal presente) e diga quais linhas mais importam no teste da máquina.

B1	B2	P	E	S
1	0	1	0	
0	1	1	0	
1	1	1	0	
1	0	0	0	
0	1	1	1	
0	0	1	0	

6 ★★★ **Projeto.** Um temporizador pneumático de retardo na ligação foi ajustado com cronômetro em 5,0 s, com o sinal tirado direto da rede a 6 bar; o piloto comuta com 3 bar. Ao longo do turno, a rede oscila entre 5,5 e 6,5 bar. Calcule a constante de tempo do ajuste, a faixa de retardo ao longo do turno e proponha uma alimentação que mantenha o tempo, com o novo valor da constante de tempo.

ANOTAÇÕES

FICHA DE BANCADA · CAPÍTULO 14

Montar a autorretenção com desligar dominante

Objetivo. Montar a autorretenção do capítulo 14, com a alternadora 1V2 na realimentação, e verificar que desligar vence e que a saída não volta sozinha depois de uma falta de ar.

Nome _____ Turma _____ Data _____

MATERIAL

- ☐ 1 válvula 3/2 NF pilotada, com retorno por mola (1V1)
- ☐ 1 válvula alternadora, função OU (1V2)
- ☐ 1 válvula 3/2 NF de botão, liga (1S1)
- ☐ 1 válvula 3/2 NA de botão, desliga (1S2)
- ☐ 1 cilindro de simples ação ligado à saída de 1V1, como indicador (1A1)
- ☐ 1 unidade de conservação com regulador e manômetro (0Z1)
- ☐ Distribuidor de ar e tubos de 4 mm e de 6 mm

SEGURANÇA ANTES DE ABRIR O AR

- ☐ Trabalhe com no máximo 6 bar; para esta prática, 4 bar bastam.
- ☐ Feche o ar e descarregue o circuito antes de soltar ou trocar qualquer tubo.
- ☐ Use óculos de segurança durante toda a prática.
- ☐ Confira que cada tubo está travado na conexão rápida antes de abrir o ar.
- ☐ No ensaio de falta de ar, use a válvula de entrada da bancada e mantenha as mãos fora do curso da haste de 1A1.

MONTAGEM E TESTE

1. Com o ar fechado, fixe 1V1, 1V2, 1S1, 1S2 e o cilindro 1A1 na bancada.
2. Alimente a via 1 de 1V1 e ligue a via 2 dela ao cilindro 1A1, com tubo de 6 mm.
3. Com tubo de 4 mm, ligue a saída de 1S1 a uma entrada de 1V2 e, com um T na saída de 1V1, a realimentação à outra entrada de 1V2.
4. Ligue a saída de 1V2 à via 1 de 1S2 e a saída 2 de 1S2 ao piloto 14 de 1V1; alimente a via 1 de 1S1.
5. Confira o circuito contra o diagrama, regule 0Z1 em 4 bar e abra o ar: a saída deve estar sem pressão e a haste recuada.
6. Faça os ensaios da tabela na ordem, anotando o estado da saída e da haste em cada um.
7. Com a saída ligada, feche o ar da bancada, espere a haste recuar e reabra o ar.

MEDIÇÕES

Ensaio	Saída de 1V1 (com ou sem ar)	Haste de 1A1
Toque em 1S1		
1S1 já solto		
Toque em 1S2		
1S1 e 1S2 apertados juntos		
Ar fechado e reaberto com a saída ligada		

O PROFESSOR PROVOCA UM DEFEITO

Os ensaios parecem normais, mas com 1S1 e 1S2 apertados juntos a saída liga e a haste de 1A1 avança, e ela se mantém avançada enquanto 1S1 estiver apertado. Qual é a causa provável, e como você confirma?

_____

_____

CONCLUSÕES

1. Por que, no ensaio com os dois botões apertados, a saída ficou desligada?

   _____

2. O que aconteceu quando o ar voltou, e por que isso é desejável numa máquina?

   _____

3. Que componente seria preciso para que a máquina parasse sozinha ao fim de um lote?

   _____

CAPÍTULO 15 · CIRCUITOS E LÓGICA PNEUMÁTICA

15 Sequências: notação, diagrama trajeto-passo e cadeia de sinais

Um dispositivo de furação tem dois cilindros: um prende a peça, o outro desce a furadeira. Dito assim, parece óbvio. Mas a furadeira sobe antes ou depois de a peça ser solta? E o que avisa o segundo cilindro de que pode descer? Antes de desenhar qualquer circuito, a ordem dos movimentos precisa estar escrita sem ambiguidade. Uma linha de texto, um diagrama com uma faixa por cilindro e uma tabela de sinais dizem o que dispara cada movimento, onde estão os conflitos e quanto dura o ciclo.

AO FIM DESTE CAPÍTULO, VOCÊ VAI

- Escrever uma sequência de movimentos na notação abreviada, com letras e sinais.
- Construir e ler o diagrama trajeto-passo de uma sequência.
- Identificar o sinal de fim de curso que dispara cada movimento.
- Distinguir diagramas trajeto-passo, trajeto-tempo e de comando, e calcular o tempo de ciclo.
- Descrever uma sequência como etapas e transições, em um diagrama funcional.



Figura 15.1 A sequência A+ B+ B− A−, na bancada. Modelo 3D da aula, em corte. No lado maior, o conjunto mede cerca de 46 cm.

1. **Fins de curso a0 e a1.** O came da haste A aperta a0 em repouso e a1 no fim do avanço. É o a1 que dá a ordem para B descer.
2. **A: fixação.** Avança e prende a peça contra o batente: é o **A+**. Só recua depois que a furação terminou: **A−**, o último movimento.
3. **B: avanço da furadeira.** Desce com a peça presa (**B+**) e sobe em seguida (**B−**).
4. **Fins de curso b0 e b1.** O came lateral de B aperta b0 em cima e b1 embaixo. O b1 manda B subir, e o b0 manda A recuar.
5. **A peça e o batente.** A ordem importa: A só solta a peça depois que a broca saiu dela (B− antes de A−).

em 3D e na sua mesa

15.1 A notação abreviada

Cada atuador recebe uma letra maiúscula (A, B, C), na ordem em que entra na sequência; **+** indica avanço e

– recuo, e os movimentos se escrevem da esquerda para a direita, na ordem em que ocorrem. Os fins de curso recebem a letra minúscula com índice 0 para a posição recuada e 1 para a avançada: o cilindro A tem a0 e a1. Movimentos simultâneos vão entre parênteses. Uma sequência é válida se cada atuador alterna (depois de A+, o próximo movimento de A só pode ser A−) e se, no fim do ciclo, todos voltaram à posição inicial, em geral recuados. Condições além do fim do movimento anterior são escritas junto: em A+ B+ t B− A−, t é uma temporização antes do recuo de B. A notação não diz velocidades, forças nem quanto dura cada movimento, só a ordem: separa o que acontece de como fazer.

Tabela 15.1 Sequências usuais e a sua leitura

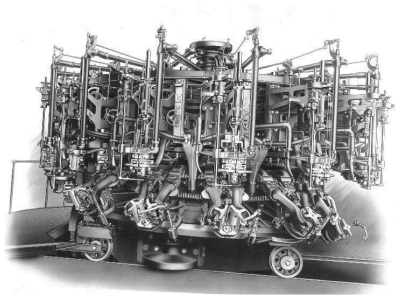
Sequência	Leitura	Exemplo de máquina
A+ B+ A− B−	O primeiro que avança é o primeiro que recua	Transferência: A empurra a peça a uma posição, B a empurra à seguinte
A+ B+ B− A−	O último que avança é o primeiro que recua	Prender, trabalhar, retirar a ferramenta, soltar
A+ B+ B− C+ C− A−	A prende, B trabalha, C trabalha, A solta	Furar e escarear com a peça presa
A+ (B+ C+) (B− C−) A−	B e C avançam e recuam juntos	Dois furos simultâneos em uma peça presa
A+ B+ B− B+ B− A−	B avança e recua duas vezes, com A avançado	Dois golpes de estampo com a peça presa

Fonte: sequências usuais, com dois e três atuadores.

CASE REAL · TOLEDO, OHIO, 1903

A garrafa decomposta em passos

Fazer uma garrafa exigia cinco pessoas e uma sequência decorada: um homem colhia vidro derretido na ponta de um tubo de ferro, outro o soprava dentro de um molde, que um menino abria e fechava, outro arrematava o gargalo, e outro menino levava a garrafa ao forno de recozimento. Um bom grupo fazia cerca de três mil por dia.



Digital Public Library of America, via Wikimedia Commons · Domínio público

Michael Owens, que havia começado nas vidrarias aos dez anos e passado por todas as funções, era gerente de uma fábrica em Toledo, no estado americano de Ohio. Em 1903, apresentou a máquina automática de garrafas, patenteada no ano seguinte. O passo difícil era retirar do forno a quantidade certa de vidro sem mãos: um molde mergulhava a boca no vidro derretido e uma bomba de vácuo o aspirava. Seguia uma sequência fixa: cortar o excesso, formar o gargalo com um pino, abrir o molde inicial, fechar o molde final, soprar com ar comprimido, abrir. Vários braços, montados em uma estrutura que girava continuamente e comandados por cames fixos, executavam a mesma sequência em passos diferentes; os primeiros modelos tinham seis braços, e os posteriores, dez e quinze. Uma máquina passou de milhares de garrafas por hora, com dois ou três operadores, e o emprego de crianças nas vidrarias caiu depressa.

A lição: Owens decompôs um ofício em passos sem ambiguidade, e só então mecanizou cada um, que é o que a notação faz em uma linha. Quando a sequência é longa demais para a cadência desejada, em vez de acelerar os passos, repete-se a sequência em paralelo.

Fontes: ASME, Landmark #86: Owens AR Bottle Machine (primeira máquina de garrafas totalmente automática, 1903, Toledo); Invention & Technology, landmark do Owens AR

15.2 O diagrama trajeto-passo

Desenha-se uma faixa por atuador, com duas linhas horizontais: 0, recuado, e 1, avançado. Linhas verticais igualmente espaçadas marcam os passos; há uma a mais que o número de movimentos, e a última coincide com a primeira do ciclo seguinte, com todos na posição inicial. O atuador que se move é uma linha inclinada; os outros, horizontais. Setas ligam o fim de cada movimento ao movimento que esse sinal dispara.

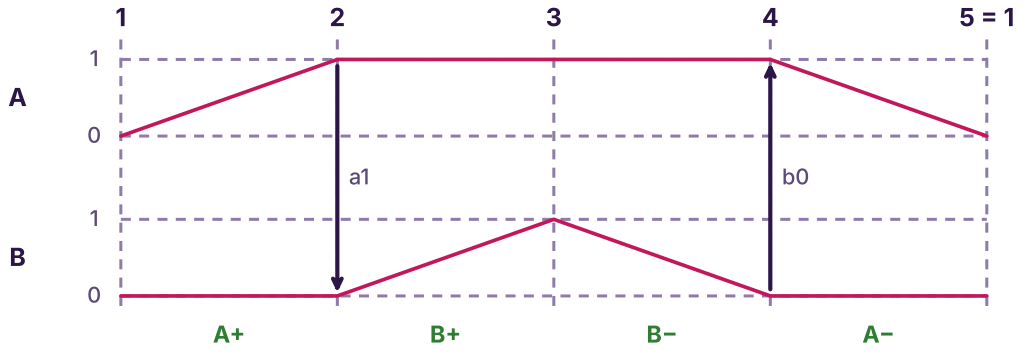


Figura 15.2 Diagrama trajeto-passo da sequência A+ B+ B− A−. As setas verticais indicam o sinal de fim de curso que dispara o movimento do outro atuador.

Em cada linha de passo, o diagrama mostra o estado da máquina; em cada intervalo, quem se move. Na Figura 15.2, A avança entre 1 e 2, toca a1, e esse sinal dispara B+; B recua entre 3 e 4, toca b0, e esse sinal dispara A−. A distância entre as linhas é sempre a mesma, quer o movimento leve meio segundo ou dez: o trajeto-passo mostra **a ordem, e não o tempo**. Quem lê diagramas reconhece a sequência pela forma: em A+ B+ B− A−, a faixa de B é um triângulo dentro do patamar de A.

15.3 A cadeia de sinais

Em uma sequência automática não há relógio dando ordens: o sinal que dispara um movimento é o fim de curso tocado no fim do movimento anterior. Se o anterior foi A+, o sinal é a1; se foi B−, é b0. O último movimento, ao terminar, libera a partida de um novo ciclo, e por isso a partida é condicionada ao fim de curso dele.

Tabela 15.2

Passo	Movimento	Disparado por	Ao terminar, aciona
1	A+	partida, com a0 acionado	a1
2	B+	a1	b1
3	B−	b1	b0
4	A−	b0	a0

Fonte: cadeia de sinais da sequência A+ B+ B− A−. A condição de a0 na partida garante que um novo ciclo só comece com a máquina na posição inicial.

NA PRÁTICA

Trajeto, tempo ou combinado

No **comando por trajeto**, se um cilindro emperra, o fim de curso não é tocado e a sequência para, em vez de causar uma colisão: é a forma mais segura. No **comando por tempo**, temporizadores dão os sinais, tenha o cilindro chegado ou não: dispensa os fins de curso, mas não confirma nada. O mais comum é o **combinado**: fins de curso para posições, temporizadores para tempos de processo, válvulas de sequência para forças.

ERRO QUE CUSTA CARO

O fim de curso não é um instante

Um fim de curso dá sinal durante todo o tempo em que o atuador está parado sobre ele, e não só no momento em que é tocado. Em A+ B+ B− A−, o a1 fica acionado das linhas 2 a 4. É essa duração, visível no **diagrama de comando** (uma faixa por sinal), que causa os conflitos dos próximos capítulos.

15.4 Trajeto-tempo e diagrama funcional

O **diagrama trajeto-tempo** usa as mesmas faixas com o eixo horizontal em segundos: movimentos rápidos ficam quase verticais, e os lentos, pouco inclinados. O tempo de ciclo é a soma dos tempos dos movimentos, das esperas de processo e dos atrasos de sinal e de comutação entre passos; em movimentos simultâneos, conta o mais demorado.

EXEMPLO RESOLVIDO

O tempo de ciclo de uma sequência

Na sequência A+ B+ B− A−, A+ leva 1,0 s, B+ 2,0 s, B− 0,5 s e A− 0,5 s. Cada passagem de um passo ao seguinte consome 0,1 s. Quais são o tempo de ciclo e a produção por hora?

01 Movimentos: 1,0 + 2,0 + 0,5 + 0,5 = 4,0 s.

02 Transições: 4 × 0,1 = 0,4 s.

03 Ciclo: 4,4 s; produção: 3 600 ÷ 4,4 = 818 ciclos por hora.

Resposta: cerca de 820 peças por hora. O passo B+ responde por 45 % do ciclo, e as transições por 9 %: em sequências rápidas, com muitos passos, os atrasos de sinal deixam de ser desprezíveis.

O **diagrama funcional** (GRAFCET, Figura 15.3) descreve o comando, e não as posições: cada ação ocorre enquanto a sua **etapa** está ativa, e cada **transição** só deixa passar adiante quando a sua condição é satisfeita (a1, tempo decorrido, pressão atingida). Vale para válvulas, relés ou um programa.

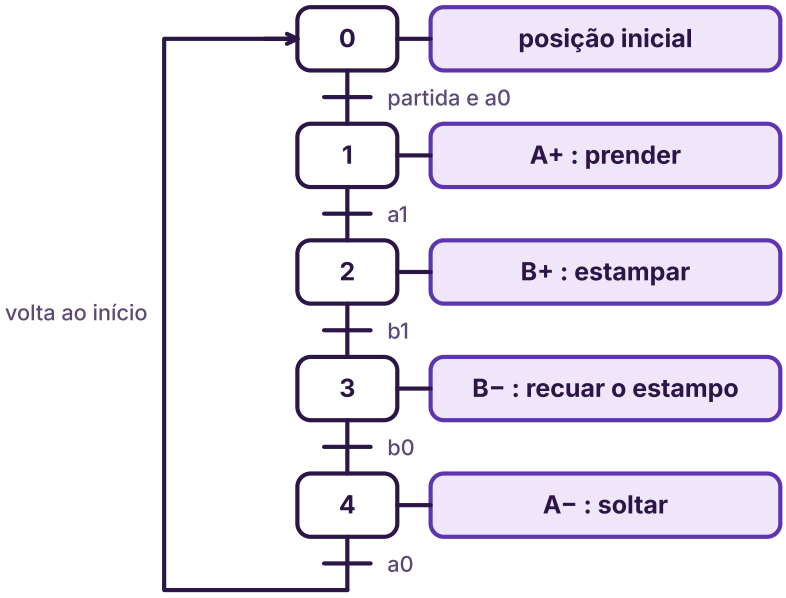


Figura 15.3 Diagrama funcional da sequência A+ B+ B− A−. Cada quadrado é uma etapa, com a sua ação. Cada traço é uma transição, com a sua condição.

CASE REAL · PARIS, DE 1975 A 1977

Uma linguagem para quem encomenda e quem constrói

Na década de 1970, os comandos por relés e por lógica pneumática conviviam com os primeiros controladores programáveis. Cada tecnologia tinha os seus esquemas, que mostravam como o comando era feito, e não o que ele devia fazer. O cliente descrevia a máquina em texto, o fabricante a traduzia em relés, e as ambiguidades só apareciam com a máquina pronta.

Na França, uma associação técnica do setor de automação e informática criou em 1975 uma comissão de professores, pesquisadores e engenheiros de grandes empresas automobilísticas, siderúrgicas e de equipamentos. Ela buscou a forma mais simples que um técnico de fábrica pudesse ler sem formação especial. O resultado, publicado em 1977, usava dois símbolos, a etapa e a transição, com regras precisas: uma transição só é transposta se a etapa anterior estiver ativa e a condição for verdadeira. A adoção foi rápida, em boa parte porque o método passou a ser ensinado nas escolas técnicas do país. Tornou-se norma francesa no início da década de 1980 e norma internacional em 1988; quando as linguagens de controladores foram padronizadas, na década seguinte, uma delas foi uma versão gráfica desse diagrama.

A lição: o GRAFCET nasceu de um problema de comunicação, e a sua regra resolve os conflitos de sinais: o b0 só dispara A− na etapa em que isso faz sentido. Guardar a etapa e filtrar os sinais por ela é o que fazem os métodos cascata e passo a passo.

Fontes: AFNOR, NF C03-190 (1982): Diagramme fonctionnel GRAFCET (origem no grupo da AFCET, relatório de 1977); IEC 60848:2013. GRAFCET specification language for sequential function charts. Genebra: IEC, 2013

PARA LEVAR DESTE CAPÍTULO

1. Na **notação abreviada**, cada atuador recebe uma letra maiúscula, **+** indica avanço e **−** recuo, e os fins de curso do cilindro A são a0 (recuado) e a1 (avançado).
2. Uma sequência é válida se cada atuador alterna avanço e recuo e todos voltam à posição inicial; movimentos simultâneos vão entre parênteses, como em A+ (B+ C+) (B− C−) A−.
3. No **diagrama trajeto-passo**, cada atuador tem uma faixa com as linhas 0 e 1, e as linhas de passo, igualmente espaçadas, mostram a ordem dos movimentos, e não o tempo.
4. Na **cadeia de sinais**, o fim de curso tocado no fim de um movimento dispara o seguinte, e a partida é condicionada ao fim de curso do último movimento do ciclo.
5. Um fim de curso dá sinal durante todo o tempo em que o atuador está parado sobre ele: em A+ B+ B− A−, o a1 fica acionado das linhas 2 a 4.
6. No **diagrama trajeto-tempo**, o eixo horizontal é em segundos; o tempo de ciclo soma movimentos, esperas e atrasos entre passos, e em movimentos simultâneos conta o mais demorado.
7. O **GRAFCET** descreve o comando por etapas e transições: cada ação ocorre enquanto a sua etapa está ativa, e a transição só passa quando a sua condição é satisfeita.

PARA NÃO ESQUECER ciclos por hora = 3 600 ÷ tempo de ciclo (s)

15.5 Exercícios

Nível: ★ conceito · ★★ aplicação · ★★★ desafio

1 ★ Prender (A), descer a furadeira (B), subir a furadeira e soltar a peça. Qual é a sequência?

a) A+ B− B+ A−
b) A+ B+ B− A−
c) A+ A− B+ B−

2 ★ Na sequência A+ B+ B− A−, que sinal dispara B+?

a) O fim de curso de B recuado
b) O botão de partida
c) O fim de curso de A avançado

3 ★ A sequência A+ B+ A+ B− é válida?

a) Não: A avança duas vezes sem recuar
b) Sim, se houver um temporizador
c) Sim, desde que B recue no fim

4 ★★ Para a sequência A+ B+ B− A− C+ C−, que sinal dispara cada movimento e qual é a condição de partida? Há algum fim de curso que já esteja acionado antes do momento em que deveria agir?

5 ★★ **Leitura.** O diagrama trajeto-passo de um dispositivo de furar e escarear tem sete linhas de passo. Na faixa de A, a linha sobe entre as linhas 1 e 2, fica no nível 1 até a linha 6 e desce entre 6 e 7. Na faixa de B, sobe entre 2 e 3 e desce entre 3 e 4. Na faixa de C, sobe entre 4 e 5 e desce entre 5 e 6. Escreva a sequência, a cadeia de sinais e a condição de partida, e diga entre que linhas o a1 fica acionado.

6 ★★★ **Projeto.** Uma peça presa por A recebe dois furos, feitos por B e C. A+ leva 0,6 s; B+ 1,8 s e C+ 1,2 s; B− 0,5 s e C− 0,7 s; A− 0,5 s. Cada passagem de um passo ao seguinte consome 0,1 s. A meta é de pelo menos 850 peças por hora. Compare a sequência A+ B+ B− C+ C− A− com A+ (B+ C+) (B− C−) A− e diga qual atende à meta e que condição dispara A− na segunda.

ANOTAÇÕES

FICHA DE BANCADA · CAPÍTULO 15

Montar a sequência A+ B+ A− B− e levantar o trajeto-tempo

Objetivo. Montar a sequência direta A+ B+ A− B− com dois cilindros, conferir a cadeia de sinais passo a passo e medir os tempos para desenhar o diagrama trajeto-tempo do ciclo.

Nome _____ Turma _____ Data _____

MATERIAL

- ☐ 2 cilindros de dupla ação (A e B)
- ☐ 2 válvulas 5/2 de duplo piloto, uma para cada cilindro
- ☐ 4 válvulas 3/2 NF de rolete, fins de curso a0, a1, b0 e b1
- ☐ 1 válvula 3/2 NF de botão, partida (S)
- ☐ 4 reguladoras de fluxo unidirecionais, uma em cada conexão dos cilindros
- ☐ 1 unidade de conservação com regulador e manômetro
- ☐ Distribuidor de ar e tubos de 4 mm e de 6 mm
- ☐ 1 cronômetro

SEGURANÇA ANTES DE ABRIR O AR

- ☐ Trabalhe com no máximo 6 bar e faça o primeiro ciclo com cerca de 4 bar.
- ☐ Feche o ar e descarregue o circuito antes de mexer em qualquer conexão ou mudar um fim de curso de lugar.
- ☐ Use óculos de segurança durante toda a prática.
- ☐ Confira que cada tubo está travado na conexão rápida antes de abrir o ar.
- ☐ Os dois cilindros se movem sem novo comando depois da partida: mãos fora do curso das hastes e dos roletes.

MONTAGEM E TESTE

1. Escreva a cadeia de sinais antes de montar: S com b0 dispara A+, a1 dispara B+, b1 dispara A−, a0 dispara B−.
2. Com o ar fechado, fixe os cilindros, as válvulas 5/2 e os quatro fins de curso; a0 e b0 ficam pressionados pelas hastes recuadas.
3. Ligue as válvulas aos cilindros pelas reguladoras, com tubo de 6 mm, e alimente as vias 1.
4. Com tubo de 4 mm, ligue a saída de S à via 1 de b0, b0 ao piloto de A+, b1 ao de A−, a1 ao de B+ e a0 ao de B−; alimente a0, a1 e b1.
5. Confira cada tubo contra a cadeia escrita, regule a pressão em 4 bar e abra o ar: os dois cilindros devem ficar recuados.
6. Dê um toque em S e acompanhe o ciclo passo a passo, conferindo que fim de curso dispara cada movimento.
7. Regule as velocidades, meça o tempo de cada movimento e repita o ciclo três vezes para tirar a média.

MEDIÇÕES

Movimento	Disparado por	Tempo médio (s)	Fim de curso acionado ao terminar
A+			
B+			
A−			
B−			

O PROFESSOR PROVOCA UM DEFEITO

Ao abrir o ar, antes de qualquer partida, o cilindro B avança sozinho e fica avançado. Depois disso, o botão S não faz nada. Qual é a causa provável, e como você confirma?

CONCLUSÕES

1. Entre que passos o a1 ficou acionado, e por que isso não travou a sequência?
2. Com os tempos medidos, desenhe o diagrama trajeto-tempo e calcule a produção por hora.
3. Por que o sinal de partida passa por b0?

CAPÍTULO 16 · MÉTODOS DE COMANDO, PROJETO E MANUTENÇÃO

16 Método intuitivo e sobreposição de sinais

A sequência é prender, estampar, recolher o estampo e soltar: A+ B+ B− A−. As ligações conferem com o diagrama. Dá-se a partida, e nada acontece; contornado esse primeiro bloqueio, A avança, B avança e a máquina para, com os dois cilindros avançados, em silêncio. Os manômetros mostram pressão, e as válvulas, testadas uma a uma, funcionam. Se alguém afastar com o dedo o rolete de a1, B recua e o ciclo termina; na partida seguinte, para de novo no mesmo passo. Nenhuma peça tem defeito. Este capítulo mostra por que isso acontece, como prever no papel e até onde vale remendar.

AO FIM DESTE CAPÍTULO, VOCÊ VAI

- Montar o circuito de uma sequência direta pelo método intuitivo.
- Explicar a sobreposição de sinais em uma válvula biestável.
- Prever, pela notação e pelo diagrama de comando, onde haverá sobreposição.
- Aplicar o rolete escamoteável e o formador de pulso, conhecendo os seus limites.
- Decidir quando o método intuitivo basta, e quando é preciso um método sistemático.

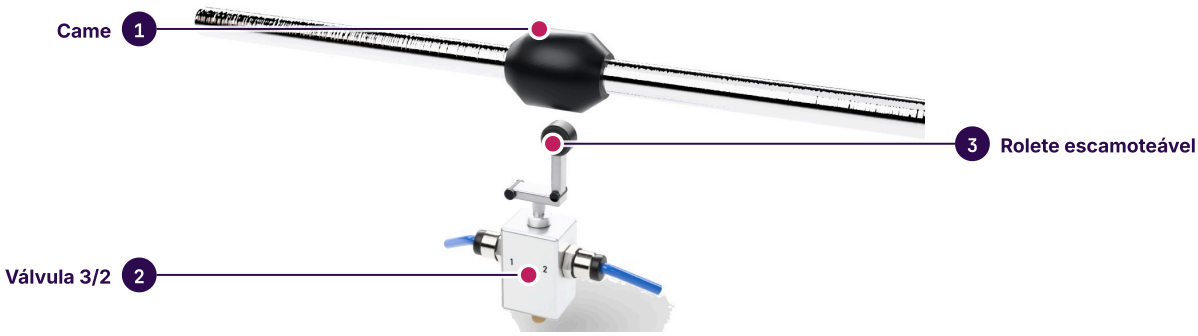


Figura 16.1 O rolete escamoteável, de perto. Modelo 3D da aula, em corte. No lado maior, o conjunto mede cerca de 32 cm.

1. **Came na haste.** Indo para a direita, o came empurra o rolete e dá um **pulso** curto. Voltando, o rolete dobra: nenhum sinal.
2. **Válvula 3/2 do fim de curso.** Recebe o pulso só enquanto o came passa. É o recurso que desfaz a sobreposição de sinais do método intuitivo.
3. **Rolete escamoteável.** O braço do rolete tem uma articulação. Num sentido, ele é rígido e aciona a válvula; no outro, **dobra** e deixa o came passar sem acionar.

em 3D e na sua mesa

16.1 O método intuitivo

O método intuitivo liga cada fim de curso diretamente ao piloto do movimento seguinte: uma válvula 5/2 de duplo piloto abaixo de cada cilindro (14 para o avanço, 12 para o recuo), os fins de curso de rolete na faixa de sinais, com os pressionados na posição inicial desenhados acionados, e cada sinal ligado ao seu piloto. Para **A+ B+ A− B−**, a1 vai ao piloto de B+, b1 ao de A−, a0 ao de B−, e b0, em série com o botão de partida, ao de A+. Depois, percorre-se o ciclo no papel, anotando em cada passo que sinais existem em cada piloto.

Passo 2: a1 tocado, B avança
A continua avançado: a sua válvula biestável guarda a última ordem, mesmo sem sinal

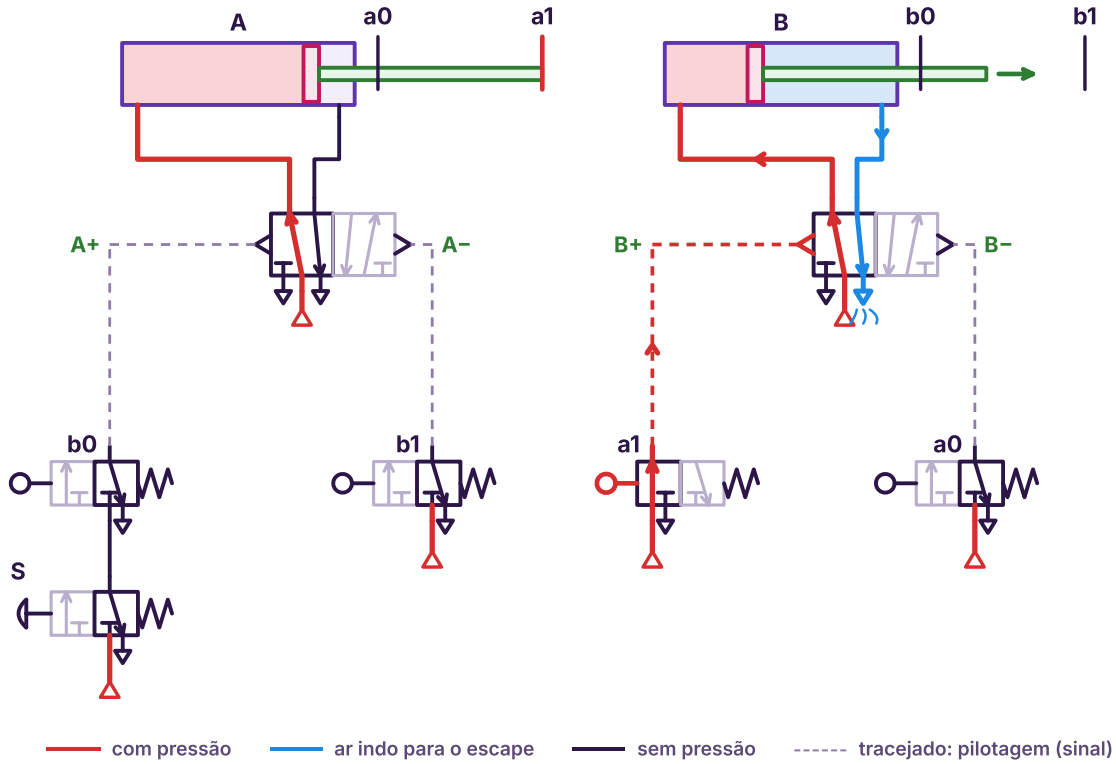


Figura 16.2 Circuito intuitivo da sequência A+ B+ A− B−, no passo 2. O fim de curso a1, tocado por A, pilota B+. A válvula de A é biestável: mantém A avançado sem sinal nenhum nos pilotos. No QR, a figura no celular.

O circuito funciona na primeira tentativa porque, em cada passo, quando o sinal chega a um piloto, o piloto oposto está livre. A válvula de B é pilotada por a1 e a0, os dois fins de curso do cilindro A, e um cilindro nunca está nas duas pontas ao mesmo tempo; o mesmo vale para a válvula de A, pilotada por b1 e b0. É a **sequência direta**, reconhecida na notação porque a ordem das letras da segunda metade repete a da primeira: A B, A B, ou A B C, A B C.

16.2 Por que A+ B+ B− A− trava

Na sequência indireta **A+ B+ B− A−**, a cadeia é: partida e a0 disparam A+, a1 dispara B+, b1 dispara B−, b0 dispara A−. A válvula de B passa a ser pilotada por fins de curso de cilindros diferentes. Na partida, o piloto de A− já tem sinal, porque b0 está pressionado: a válvula de A não comuta e a máquina nem parte. Supondo esse obstáculo removido, A avança e toca a1, B avança e toca b1, que pede B−; mas A continua parado sobre a1, e o piloto de B+ ainda tem sinal. A válvula de B fica com ar dos dois lados: a máquina para com os dois avançados.

Tabela 16.1

Sinal	Linha 1	Linha 2	Linha 3	Linha 4	Comanda
a0	1	0	0	0	partida de A+
a1	0	1	1	1	B+
b1	0	0	1	0	B−
b0	1	1	0	1	A−

Fonte: estado dos sinais na sequência A+ B+ B− A−. Na linha 3, a1 e b1 valem 1: os dois pilotos de B. Na linha 1, b0 vale 1 no momento da partida: piloto de A− contra o de A+.

A regra geral: há **sobreposição** quando, no instante em que um sinal chega a um piloto, o sinal que comandou o movimento anterior do mesmo cilindro ainda existe, porque o cilindro que pressiona aquele fim de curso não se moveu desde então. Na notação, o indício mais visível são letras iguais vizinhas (B+ B−), sem esquecer de fechar o ciclo: o último movimento, A−, é vizinho do primeiro, A+. Em sequências longas, a verificação segura é a tabela de sinais ou o diagrama de comando.

ERRO QUE CUSTA CARO

Procurar peça com defeito

Uma máquina que para sempre no **mesmo passo**, como a da abertura, não tem peça com defeito: trocar válvulas e cilindros não resolve. Verifique os dois pilotos da válvula que não comutou.

CASE REAL · ESTADOS UNIDOS, DA DÉCADA DE 1950 A 2011

O gatilho que ficava apertado



Sanbeg, via Wikimedia Commons · CC BY-SA 3.0

O pregador pneumático chegou aos canteiros de obras americanos na década de 1950. Desde cedo, teve dois sinais de disparo combinados em uma função E: o gatilho, sob o dedo, e uma trava de contato na ponta, que só libera o disparo quando pressionada contra a peça.

Havia duas formas de combiná-los. No **disparo por contato**, a ordem é livre: com o gatilho mantido apertado, cada toque da ponta numa superfície dispara um prego, três ou quatro por segundo. No **disparo sequencial**, primeiro a ponta contra a peça, depois o gatilho, e, para o prego seguinte, é preciso soltar o gatilho e repetir. O problema do disparo por contato é um sinal que permanece: a ferramenta recua ao disparar, salta e volta a tocar a madeira, e sai um segundo prego não pretendido. Estudos com aprendizes e carpinteiros nas décadas de 1990 e 2000 mostraram risco de ferimento cerca de duas vezes maior com o gatilho de contato, com diferença pequena de produtividade. Em 2011, os órgãos federais americanos de segurança e de pesquisa em saúde do trabalho publicaram um guia conjunto recomendando o gatilho sequencial pleno para a maior parte dos serviços.

A lição: o pregador de contato é uma sobreposição de sinais com consequência física: um sinal que deveria ser pulso é mantido e passa a valer para eventos que o operador não comandou. Em máquinas, a regra é a mesma: um novo ciclo só começa se o botão foi solto e apertado de novo.

Fontes: NIOSH e OSHA, Nail Gun Safety: A Guide for Construction Contractors, 2011 (NIOSH 2011-202): risco cerca de duas vezes maior com gatilho de contato; NIOSH Science Blog, The New ANSI Nail Gun Standard is a Lost Opportunity for Safety

16.3 Encurtar o sinal: gatilho e formador de pulso

Se o problema é um sinal que dura demais, a saída mais direta é fazê-lo durar pouco. O **rolete escamoteável** (Figura 16.1) é montado um pouco antes do fim do curso, de modo que o ressalto passe por ele e siga adiante: o sinal é curto, emitido só em um sentido, e já desapareceu quando o cilindro para. Em A+ B+ B− A−, basta trocar a1 e b0 por roletes escamoteáveis: quando b1 e a partida enviam os seus sinais, os pilotos opostos já estão livres. A duração do pulso depende do ressalto e da velocidade:

$$t_{pulso} = \frac{L}{v}$$

L: comprimento do trecho do ressalto que mantém o rolete pressionado; v: velocidade da haste ao passar por ele.

EXEMPLO RESOLVIDO

O pulso de um gatilho

Um rolete escamoteável é acionado por um trecho de 8 mm do ressalto. A haste passa por ele a 400 mm/s. A válvula de potência, com 2 m de tubo de pilotagem, precisa de cerca de 40 ms de sinal para comutar. O pulso é suficiente?

01 Duração: 8 ÷ 400 = 0,020 s, ou 20 ms.

02 Necessário: 40 ms.

Resposta: Insuficiente: 20 ms, para 40 necessários. A válvula comutaria de modo incerto, às vezes sim, às vezes não: o pior tipo de defeito. As saídas: reduzir a velocidade no fim do curso, para 200 mm/s ou menos, com o amortecimento ou a regulagem. Alongar o ressalto para 16 mm. Encurtar a linha de pilotagem. Ou trocar o gatilho por um formador de pulso, cujo tempo não depende da velocidade.

O gatilho tem limites sérios: o sinal é dado antes do fim do curso e **não confirma posição**, não pode servir de condição de segurança, volta a se sobrepor se o cilindro parar sobre o rolete e, montado ao contrário, não dá sinal nenhum. O **formador de pulso** mantém o fim de curso comum e passa o seu sinal por um temporizador normalmente aberto (capítulo 14), que o corta uma fração de segundo depois: o sinal nasce com o cilindro no fim e dura o mesmo em qualquer velocidade, ao custo de um temporizador por sinal que persiste.

16.4 Até onde vai o método intuitivo

Tabela 16.2 Quando usar o método intuitivo

Situação	Método intuitivo	Observação
Um cilindro, ou sequência direta com dois ou três cilindros	Adequado	Não há sobreposição; o circuito mais econômico
Sequência indireta com uma ou duas sobreposições, em dispositivo simples	Possível, com gatilho ou formador de pulso	Verificar velocidades e paradas no meio do ciclo
Três ou mais sobreposições, ou movimentos repetidos do mesmo cilindro	Desaconselhado	Método cascata ou passo a passo
Exigência de segurança ou confiabilidade, sequência longa	Desaconselhado	Gatilhos não confirmam posição; comando eletropneumático

Fonte: alcance do método intuitivo.

Há casos que nenhum encurtamento resolve. Em A+ B+ B− B+ B− A−, o b0 tocado na primeira vez deve comandar B+, e na segunda, A−: o sinal é idêntico, e o circuito precisa de memória para saber em que passo está. O terceiro recurso é **desligar o sinal na origem**: uma válvula de memória, comutada pelos próprios sinais da sequência, alimenta um grupo de fins de curso de cada vez, e um fim de curso sem ar na entrada não dá sinal. É a ideia do método cascata, assunto do próximo capítulo.

NA PRÁTICA

Parada no meio do ciclo

Com gatilhos, se o ar é cortado, ou uma emergência para os cilindros em posições intermediárias, os pulsos se perdem, e ao religar a sequência pode não continuar, ou continuar errada. Todo circuito de sequência precisa de um procedimento definido de retorno à posição inicial.

CASE REAL · DETROIT, 1920

A luz amarela de Detroit

Os primeiros sinais luminosos de trânsito, instalados em cidades americanas na década de 1910, tinham duas cores. Em Detroit, a cidade que mais depressa se enchia de automóveis, o policial encarregado da sinalização, William Potts, identificou o defeito: a troca era um instante sem duração. As ordens de parar para uns e de seguir para outros mudavam juntas, e havia alguns segundos em que os veículos de uma rua ainda cruzavam, legitimamente, enquanto os da outra já tinham permissão para entrar.

Em 1920, Potts montou, com componentes de sinalização ferroviária, um sinal com uma terceira luz, amarela, entre a vermelha e a verde, e o instalou em um cruzamento de grande movimento no centro da cidade. Foi, segundo os registros mais aceitos, o primeiro semáforo de três cores e quatro faces para tráfego de rua. A luz amarela não dava uma ordem nova: criava um intervalo, avisando que o verde estava terminando antes que o outro lado recebesse o seu. Os controladores atuais acrescentam um vermelho geral de um ou dois segundos e um circuito independente que, se dois verdes conflitantes aparecem juntos, desliga o controlador e põe o cruzamento em amarelo piscante.

A lição: a sobreposição não se resolveu com luzes mais rápidas, e sim com um estado intermediário, em que a primeira ordem é retirada antes de a segunda ser dada, como fazem o formador de pulso e os métodos sistemáticos. E, onde o conflito é perigoso, convém também detectar se ele ocorreu e levar a máquina a um estado seguro.

Fontes: The Henry Ford, First Tri-Color, Four-Directional Traffic Signal, 1920 (William Potts, Detroit); Wikipedia (inglês), William Potts (inventor)

PARA LEVAR DESTE CAPÍTULO

1. O **método intuitivo** liga cada fim de curso diretamente ao piloto do movimento seguinte, com uma válvula 5/2 de duplo piloto por cilindro, e é o circuito mais econômico quando não há sobreposição.
2. Na **sequência direta**, como A+ B+ A− B−, a segunda metade repete a ordem das letras da primeira, e cada válvula é pilotada pelos dois fins de curso de um só cilindro.
3. Há **sobreposição** quando um sinal chega a um piloto e o sinal oposto da mesma válvula ainda existe: em A+ B+ B− A−, a1 continua pilotando B+ quando b1 pede B−, e a máquina para.
4. O indício mais visível de sobreposição são letras iguais vizinhas, contando o fechamento do ciclo, mas a verificação segura é a **tabela de sinais** ou o diagrama de comando.
5. Uma máquina que para sempre no mesmo passo não tem peça com defeito: trocar válvulas não resolve, e o certo é verificar os dois pilotos da válvula que não comutou.
6. O **rolete escamoteável** dá um pulso curto (L ÷ v), num só sentido, que não confirma posição; o **formador de pulso**, com temporizador, dura o mesmo em qualquer velocidade.
7. Com três ou mais sobreposições, movimentos repetidos do mesmo cilindro ou exigência de confiabilidade, o método intuitivo dá lugar a um método sistemático: cascata, passo a passo ou comando eletropneumático.

PARA NÃO ESQUECER $t_{pulso} = L \div v$

16.5 Exercícios

Nível: ★ conceito · ★★ aplicação · ★★★ desafio

1 ★ Pelo método intuitivo, a sequência A+ B+ B− A− trava. Por quê?

a) O compressor não dá vazão para os dois
b) a1 ainda pilota B+ quando b1 pede B−
c) A válvula de A está grande demais

2 ★ A sequência A+ B+ A− B− montada pelo método intuitivo:

a) Trava em B−
b) Trava em A−
c) Funciona sem sobreposição

3 ★ O fornecedor quer pôr um temporizador “para dar um tempo”. Por que isso não resolve a trava?

a) Temporizadores pneumáticos não existem
b) O temporizador gasta ar demais
c) Atrasar não retira o sinal oposto

4 ★★ A sequência A+ B+ C+ C− B− A− será montada pelo método intuitivo, com fins de curso comuns. Escreva a cadeia de sinais, indique que sinais pilotam cada válvula e aponte todas as sobreposições. O método intuitivo serve?

5 ★★ **Diagnóstico.** Um dispositivo A+ B+ B− A− funciona há meses com a1 e b0 trocados por roletes escamoteáveis. O trecho do ressalto que mantém cada rolete pressionado tem 8 mm, e a válvula de B precisa de um sinal de pelo menos 30 ms para comutar. Depois de uma manutenção, a máquina passou a parar de vez em quando com A avançado e B recuado. Cronometrado, A passa agora pelo rolete a 400 mm/s; antes, passava a 150 mm/s. Qual é a causa provável, como confirmá-la e qual a velocidade máxima admissível?

6 ★★★ **Complete a tabela.** Uma célula de montagem fará A+ B+ A− C+ C− B− pelo método intuitivo, com fins de curso comuns e a partida em série com b0. Complete a tabela de sinais, diga quantas sobreposições há e se o método intuitivo ainda serve.

Válvula	Pilota o avanço	Pilota o recuo	Sobreposição no avanço?	Sobreposição no recuo?
A	partida e b0	b1		
B				
C				

ANOTAÇÕES

FICHA DE BANCADA · CAPÍTULO 16

Montar o comando intuitivo de A+ B+ A− B− e provocar a sobreposição

Objetivo. Montar pelo método intuitivo a sequência direta A+ B+ A− B−, conferir os sinais nos pilotos em cada passo e, religando para A+ B+ B− A−, observar a sobreposição que trava a máquina.

Nome _____ Turma _____ Data _____

MATERIAL

- ☐ 2 cilindros de dupla ação (A e B)
- ☐ 2 válvulas 5/2 de duplo piloto, uma por cilindro (pilotos 14 e 12)
- ☐ 4 fins de curso de rolete 3/2 NF (a0, a1, b0, b1)
- ☐ 1 botão 3/2 NF com retorno por mola (S)
- ☐ 1 unidade de conservação com registro de entrada e distribuidor
- ☐ 1 manômetro com conexão rápida e tubos de 4 e 6 mm

SEGURANÇA ANTES DE ABRIR O AR

- ☐ Regular a unidade de conservação em no máximo 6 bar; para a primeira partida, 4 bar bastam.
- ☐ Fechar o registro e despressurizar o circuito antes de soltar ou trocar qualquer tubo, inclusive ao religar para A+ B+ B− A−.
- ☐ Usar óculos de segurança durante toda a prática.
- ☐ Conferir que cada tubo está travado na conexão rápida antes de abrir o ar.
- ☐ Manter as mãos fora do curso das hastes e dos ressaltos: com o ar aberto, os fins de curso são acionados pelos ressaltos, nunca pelo dedo.

MONTAGEM E TESTE

1. Com o ar fechado, fixar os cilindros A e B e posicionar a0, a1, b0 e b1 nos extremos de cada curso, com os roletes tocados pelos ressaltos.
2. Ligar as válvulas de potência: saída 4 na câmara traseira, saída 2 na dianteira e alimentação 1 no distribuidor.
3. Ligar os sinais: S em série com b0 no piloto 14 de A (A+), a1 no 14 de B (B+), b1 no 12 de A (A−) e a0 no 12 de B (B−).
4. Alimentar pelo distribuidor a0, a1, b1 e o botão S, e conferir o circuito contra a figura do capítulo 16.
5. Abrir o ar devagar e conferir que A e B ficam recuados e que nenhum cilindro se move antes da partida.
6. Dar um toque em S e acompanhar o ciclo, anotando, passo a passo, que pilotos têm sinal; repetir com S mantido apertado.
7. Fechar o ar, despressurizar e religar para A+ B+ B− A−: S em série com a0 no 14 de A, a1 no 14 de B, b1 no 12 de B e b0 no 12 de A; abrir o ar e repetir o teste.

MEDIÇÕES

Situação	Movimentos que acontecem	Passo em que para	Pilotos com sinal na parada
A+ B+ A− B−, toque curto em S			
A+ B+ A− B−, S mantido apertado			
A+ B+ B− A−, toque em S			

O PROFESSOR PROVOCA UM DEFEITO

Ao abrir o ar, antes de qualquer partida, o cilindro B avança sozinho e fica avançado; depois disso, os toques em S não fazem A avançar, e a máquina não sai dessa posição. Qual é a causa provável, e como você confirma?

_____

_____

CONCLUSÕES

1. Por que A+ B+ A− B− funciona na primeira tentativa, e que fins de curso pilotam cada válvula?

_____

2. Em A+ B+ B− A−, em que passo a máquina parou, e que dois sinais estavam juntos na mesma válvula?

_____

1. Por que, com S mantido apertado, o ciclo se repete, e que regra de comando isso contraria?

ANOTAÇÕES

CAPÍTULO 17 · MÉTODOS DE COMANDO, PROJETO E MANUTENÇÃO

17 Método cascata: um grupo de movimentos de cada vez

Nas sequências indiretas, um fim de curso pressionado continua mandando sinal quando já não deveria, e o piloto oposto da mesma válvula não consegue comutar. Gatilhos e temporizadores resolvem casos simples, mas dependem de velocidade e de regulagem. O método cascata ataca a causa por outro lado: em vez de encurtar o sinal, tira o ar de quem não deve falar. Os fins de curso deixam de ser alimentados pela rede e passam a receber ar de **linhas**, uma por grupo de movimentos, e só uma linha tem pressão em cada instante. Um sinal sem ar não pilota nada.

AO FIM DESTE CAPÍTULO, VOCÊ VAI

- Dividir uma sequência em grupos, pela regra da não repetição de letras.
- Determinar o número de linhas e de válvulas de memória de uma cascata.
- Aplicar as regras de ligação dos fins de curso, dos pilotos e das memórias.
- Ler e simular um circuito cascata de dois grupos, e estender a três e quatro.
- Reconhecer os limites do método, e quando preferir o passo a passo.

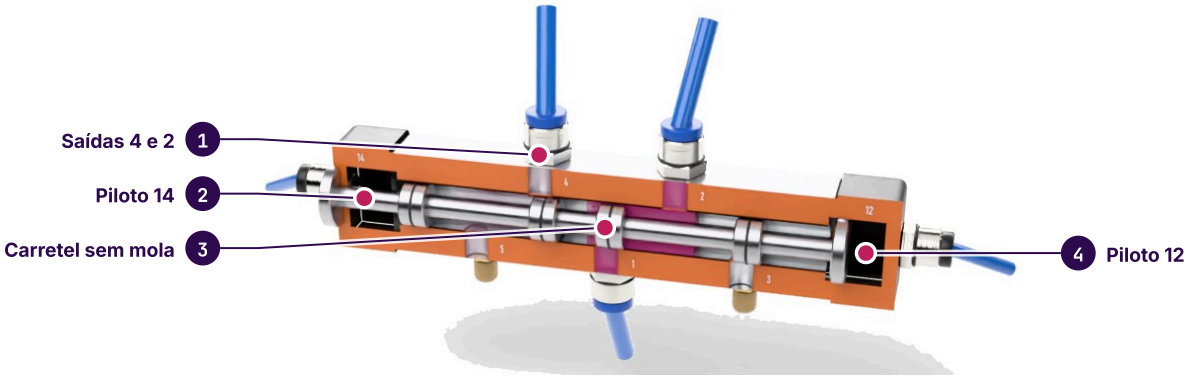


Figura 17.1 A memória da cascata: 5/2 de duplo piloto. Modelo 3D da aula, em corte. No lado maior, o conjunto mede cerca de 23 cm.

1. **Saídas 4 e 2.** Na cascata, as saídas da memória alimentam as **linhas** dos grupos: só uma tem ar de cada vez.
2. **Piloto 14.** Um pulso de ar aqui empurra o carretel para a direita: 1 passa à 4.
3. **Carretel sem mola.** Não há mola: o carretel fica onde o último pulso o deixou. É isso que faz a válvula **lembrar**: na cascata, é ela que dá ar a um grupo de cada vez.
4. **Piloto 12.** Um pulso aqui devolve o carretel: 1 passa à 2. É o outro lado da memória.

em 3D e na sua mesa

17.1 Dividir a sequência: nenhuma letra duas vezes no mesmo grupo

A sobreposição acontece quando os dois pilotos de uma mesma válvula recebem sinal juntos: o de avanço e o de recuo do mesmo cilindro. Se os dois movimentos de um cilindro ficam em **grupos diferentes**, os seus sinais vêm de linhas que nunca estão pressurizadas ao mesmo tempo. A divisão é mecânica: percorre-se a sequência da esquerda para a direita e **corta-se antes da repetição** de uma letra; os grupos são numerados

I, II, III. Se o último grupo não repete letras do primeiro, os dois se unem, porque a sequência é cíclica. São tantas linhas quanto grupos, e **memórias = grupos − 1**. Movimentos simultâneos entram no mesmo grupo, como um só.

Assim, A+ B+ B− A− dá A+ B+ | B− A− (dois grupos, uma memória), e A+ B+ C+ C− B− A− dá A+ B+ C+ | C− B− A−, com a mesma cascata: o número de memórias depende dos grupos, e não dos cilindros. Já A+ B+ B− B+ B− A−, com movimentos repetidos, pede quatro grupos.

17.2 De onde cada fim de curso recebe ar, e para onde manda o sinal

Feita a divisão, o circuito sai de cinco regras de ligação, aplicadas em ordem. Cada linha é uma saída da memória, a 5/2 de duplo piloto da Figura 17.1.

Tabela 17.1

Regra	O que se liga	A quê
1. Linhas	As saídas da cascata de memórias	Uma linha horizontal para cada grupo: I, II, III
2. Primeiro movimento de cada grupo	O piloto desse movimento	Diretamente à linha do grupo, sem fim de curso
3. Demais movimentos do grupo	O piloto de cada um	Ao fim de curso do movimento anterior, que é alimentado pela linha do grupo
4. Troca de grupo	O piloto da memória que ativa o grupo seguinte	Ao fim de curso do último movimento do grupo, alimentado pela linha do grupo que termina
5. Partida	O botão de partida	Em série com o fim de curso do último movimento do ciclo, alimentados pela linha do último grupo

Fonte: regras de ligação do método cascata. Na posição inicial, a linha pressurizada é a do último grupo.

Na sequência A+ B+ | B− A− (Figura 17.2), A+ sai direto da linha I, a1 pilota B+, e b1 comuta a memória para a linha II; ali, B− sai direto da linha, b0 pilota A−, e a0, com a partida, volta à linha I. No método intuitivo, a1 impedia o recuo de B, e b0 impedia a partida de A. Na cascata, a1 perde o ar antes de B− ser comandado, e b0 o perde no instante da partida: os mesmos fins de curso, pressionados nos mesmos momentos, só que sem ar.

Grupo I ativo: a1 tocado, B avança
só a linha I tem ar; b0, na linha II, não pode comandar A− antes da hora

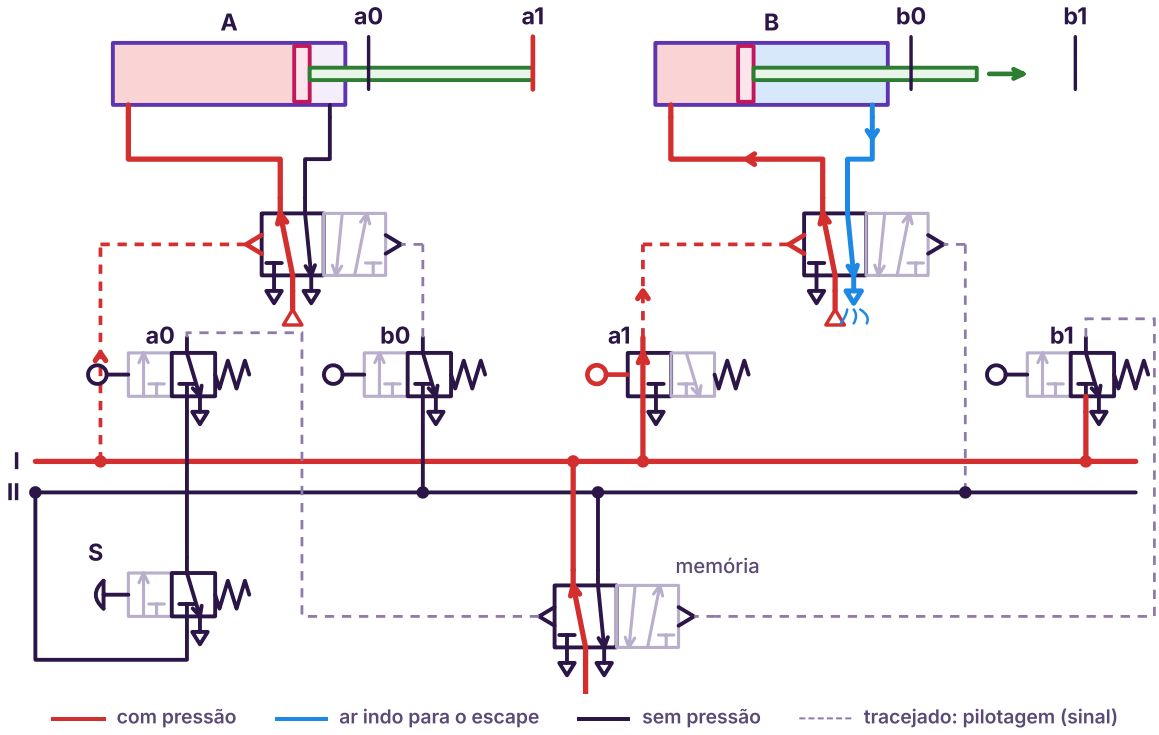


Figura 17.2 Circuito cascata da sequência A+ B+ B− A−, com dois grupos, durante o grupo I. A memória pressuriza só a linha I: o fim de curso b0, alimentado pela linha II, fica sem ar, e A− não pode acontecer fora de hora. No QR, a figura no celular.

CASE REAL · NORWICH, INGLATERRA, DE 1874 A 1878

As fichas de Tyer: uma autorização que não pode estar em dois lugares

Em uma ferrovia de via única, trens nos dois sentidos compartilham o mesmo trilho, e a regra é um trem de cada vez em cada trecho. Na Inglaterra da década de 1870, essa regra era cumprida, em muitas linhas, por telegramas entre os chefes de estação.

Em setembro de 1874, perto de Norwich, dois trens de passageiros foram despachados um contra o outro no mesmo trecho, por um desentendimento na troca de telegramas. Colidiram de frente, à noite, sob chuva. Morreram mais de vinte pessoas. O inquérito constatou que cada funcionário agira de modo defensável segundo o que entendera: o sistema dependia de mensagens que podiam se cruzar.

Em 1878, o engenheiro Edward Tyer patenteou a solução. Em cada ponta do trecho, um aparelho guardava fichas metálicas de autorização, e os dois aparelhos eram intertravados eletricamente: retirada uma ficha, nenhuma outra podia ser liberada, em nenhum deles, até que aquela fosse depositada. O princípio virou o padrão das ferrovias de via única no império britânico e durou mais de um século.

A lição: enquanto a garantia depende de sinais que podem coexistir, telegramas ou fins de curso, o conflito é possível. Na cascata, como nas fichas de Tyer, ativar uma linha exige desativar as outras, porque todas são saídas da mesma válvula biestável.

Fontes: Wikipedia (inglês), Thorpe rail accident (colisão em via única perto de Norwich, 10/09/1874); Wikipedia (inglês), Tyer's Electric Train Tablet (sistema patenteado por Edward Tyer em 1878)

17.3 Três e quatro grupos, limites e partida

Com três grupos, são duas memórias: uma saída da primeira é a linha I, e a outra alimenta a **entrada** da

segunda, cujas saídas são as linhas II e III. Com quatro, a segunda alimenta uma terceira, como degraus, e daí vem o nome do método. O ar percorre um único caminho e chega a uma única linha.

Limites. O ar da última linha atravessa todas as memórias em série: com mais de quatro grupos, o sinal chega fraco e lento. Alterar a sequência exige religar boa parte do circuito. Em troca, a cascata usa menos memórias que qualquer outro método e não depende de velocidades nem de tempos.

NA PRÁTICA

Partida e diagnóstico: a posição inicial não se garante sozinha

Com a máquina pronta, a linha pressurizada é a do **último grupo**. Na primeira pressurização, a memória pode estar na outra posição (válvulas biestáveis ficam onde foram deixadas), e a máquina parte sozinha: o circuito precisa de um sinal de reposição. No diagnóstico, um manômetro em cada linha mostra em que grupo a sequência parou.

ERRO QUE CUSTA CARO

Fim de curso ligado na rede, por hábito

Cada fim de curso recebe ar da linha do **seu grupo**. Ligado na rede, a sobreposição volta; em outra linha, há movimento fora de ordem.

CASE REAL · LA CHAUX-DE-FONDS, SUÍÇA, 1774

O escritor de Jaquet-Droz: um seletor que ativa um grupo de cames por vez

Pierre Jaquet-Droz, relojoeiro de La Chaux-de-Fonds, construiu com o filho e um colaborador, entre o fim da década de 1760 e 1774, três autômatos: uma musicista, um desenhista e um escritor. Os três funcionam até hoje, em um museu em Neuchâtel.



Gre regiment, via Wikimedia Commons · CC BY-SA 4.0 · origem

O escritor, do tamanho de uma criança de três anos, tem cerca de seis mil peças e nenhum motor além de uma mola, e escreve uma frase de até quarenta caracteres. A mão é movida por três alavancas, cada uma apoiada em um came: três cames, girando juntos uma volta, desenham uma letra.

Para o alfabeto, há uma pilha de cames em um eixo vertical, um conjunto de três para cada letra. O eixo sobe ou desce e põe diante das alavancas os cames da letra desejada. A altura é escolhida por um disco programador com quarenta posições, cada uma com uma peça de altura correspondente a uma letra. A cada caractere, o disco avança uma posição. Para mudar a frase, trocam-se as peças.

A lição: os mesmos atuadores fazem coisas diferentes conforme a etapa. Na cascata, a memória é o eixo que sobe e desce, as linhas I, II e III são as alturas, e os fins de curso são os cames: estão sempre lá, mas só agem quando o seu grupo está selecionado.

Fontes: Musée d'art et d'histoire de Neuchâtel, autômatos Jaquet-Droz (O escritor, 1774); Wikipedia (inglês), Jaquet-Droz automata

PARA LEVAR DESTE CAPÍTULO

1. O **método cascata** elimina a sobreposição tirando o ar dos fins de curso que não devem falar: cada grupo de movimentos tem a sua **linha**, e só uma linha tem pressão em cada instante.
2. Para dividir a sequência, percorre-se da esquerda para a direita e corta-se antes da repetição de uma letra; se o último grupo não repete letras do primeiro, os dois se unem.
3. O número de **memórias** é o de grupos menos um e depende dos grupos, não dos cilindros: A+ B+ B− A− e A+ B+ C+ C− B− A− usam a mesma cascata, de uma memória.
4. O primeiro movimento de cada grupo sai direto da linha; os demais saem do fim de curso do movimento anterior, alimentado pela linha do grupo; o último fim de curso do grupo comuta a memória.
5. A partida fica em série com o fim de curso do último movimento do ciclo, alimentados pela linha do último grupo, que é a linha pressurizada com a máquina pronta para partir.
6. Como as memórias ficam onde foram deixadas, o circuito precisa de um **sinal de reposição** na pressurização; no diagnóstico, um manômetro em cada linha mostra em que grupo a sequência parou.
7. Com mais de quatro grupos, o ar da última linha atravessa memórias demais em série e chega fraco e lento; em troca, a cascata usa menos memórias que qualquer outro método.

PARA NÃO ESQUECER memórias = grupos − 1

17.4 Exercícios

Nível: ★ conceito · ★★ aplicação · ★★★ desafio

1 ★ Como se divide a sequência A+ B+ C+ A− B− C− em grupos?

a) 3 grupos de dois movimentos
b) 2 grupos: A+ B+ C+ e A− B− C−
c) 6 grupos, um por movimento

2 ★ O fim de curso que encerra o último movimento de um grupo:

a) Troca de grupo, comutando a memória
b) Dispara direto o próximo cilindro
c) Desliga a alimentação da máquina

3 ★ Na partida, em que estado deve estar a cascata?

a) No primeiro grupo, já com ar
b) Na última linha, pronta para o botão
c) Com todas as linhas sem ar

4 ★★ Na sequência A+ B+ B− C+ C− A−, pelo método cascata, quantas válvulas tem o comando (potência, fins de curso, memórias e partida)? De que linha recebe ar o fim de curso c1, e o que ele comanda?

5 ★★ **Leitura.** Na cascata da sequência A+ B+ C+ | C− B− A−, a máquina parou. O manômetro da linha II indica 6 bar, e o da linha I, zero. Os cilindros A e B estão avançados, e C está recuado. Diga depois de que movimento a sequência parou, que fim de curso deveria comandar o movimento seguinte, de que linha ele recebe ar, se pode haver sobreposição na válvula de B e o que verificar primeiro.

6 ★★★ **Projeto.** Uma estação de prensagem fará A+ B+ B− A− C+ C−: A prende a peça, B prensa e recua, A solta, C empurra a peça para fora e recua. Pelo método cascata, divida a sequência em grupos, verificando se o primeiro e o último se unem. Quantas linhas e memórias terá o comando, e quantas válvulas no total (potência, fins de curso, memórias e partida)? Que fim de curso comanda cada troca de grupo, e onde entra o botão de partida?

ANOTAÇÕES

FICHA DE BANCADA · CAPÍTULO 17

Montar a cascata de A+ B+ B− A− e ler o grupo ativo nas linhas

Objetivo. Montar pelo método cascata a sequência A+ B+ B− A−, com as linhas I e II alimentadas pela memória, e comprovar pelos manômetros que só a linha do grupo ativo tem ar.

Nome _____ Turma _____ Data _____

MATERIAL

- ☐ 2 cilindros de dupla ação (A e B)
- ☐ 2 válvulas 5/2 de duplo piloto, de potência, uma por cilindro
- ☐ 1 válvula 5/2 de duplo piloto como memória (saída 4 na linha I, saída 2 na linha II)
- ☐ 4 fins de curso de rolete 3/2 NF (a0, a1, b0, b1)
- ☐ 1 botão 3/2 NF com retorno por mola (S)
- ☐ 2 manômetros com conexão rápida, um na linha I e outro na linha II
- ☐ 1 unidade de conservação com registro de entrada; tubos de 4 e 6 mm, tês e distribuidores para as linhas

SEGURANÇA ANTES DE ABRIR O AR

- ☐ Regular a unidade de conservação em no máximo 6 bar; 4 bar bastam para a prática.
- ☐ Fechar o registro e despressurizar o circuito antes de soltar ou trocar qualquer tubo.
- ☐ Usar óculos de segurança e conferir que todos os tubos estão travados antes de abrir o ar.
- ☐ Antes de abrir o ar, levar a memória à posição da linha II (reposição): sem isso, A pode avançar sozinho na pressurização.
- ☐ Manter as mãos fora do curso das hastes e dos ressaltos enquanto houver ar no circuito.

MONTAGEM E TESTE

1. Com o ar fechado, fixar A e B e posicionar a0, a1, b0 e b1 nos extremos dos cursos, tocados pelos ressaltos.
2. Ligar as válvulas de potência aos cilindros e à rede; ligar a memória à rede, com a saída 4 formando a linha I e a saída 2 a linha II, cada uma com o seu manômetro.
3. Grupo I (A+ B+): ligar a linha I direto ao piloto 14 de A; alimentar a1 pela linha I e levar o seu sinal ao piloto 14 de B; alimentar b1 pela linha I e levar o seu sinal ao piloto 12 da memória.
4. Grupo II (B− A−): ligar a linha II direto ao piloto 12 de B; alimentar b0 pela linha II e levar o seu sinal ao piloto 12 de A.
5. Partida: alimentar S pela linha II, ligar a sua saída à entrada de a0 e o sinal de a0 ao piloto 14 da memória.
6. Conferir que nenhum fim de curso está ligado na rede, dar a reposição da memória para a linha II e abrir o ar devagar.
7. Dar um toque em S, acompanhar o ciclo e anotar, em cada grupo, as pressões das duas linhas e a posição dos cilindros.

MEDIÇÕES

Situação	Linha I (bar)	Linha II (bar)	Posição de A e B
Ar aberto, antes da partida			
Depois do toque em S (grupo I)			
Depois de b1 acionado (grupo II)			
Fim do ciclo, máquina parada			

O PROFESSOR PROVOCA UM DEFEITO

Com o ar aberto e a máquina na posição inicial, um toque em S faz o manômetro da linha I subir e o da linha II cair, mas o cilindro A não avança, e nada mais acontece. Qual é a causa provável, e como você confirma?

_____

_____

CONCLUSÕES

1. Que linha tinha pressão antes da partida, e por quê?

_____

2. No método intuitivo, a1 e b0 travavam esta sequência. O que mudou para eles, se continuam pressionados nos mesmos momentos?

_____

1. O que aconteceria se a memória estivesse na posição da linha I ao abrir o ar?

ANOTAÇÕES

CAPÍTULO 18 · MÉTODOS DE COMANDO, PROJETO E MANUTENÇÃO

18 Método passo a passo: uma memória para cada passo

A cascata dá ar a um grupo de cada vez, mas tem limites: memórias em série, sinal lento acima de quatro grupos, e movimentos repetidos que multiplicam os grupos. O método passo a passo leva a mesma ideia ao extremo: cada movimento tem a sua **memória**, que só liga quando o passo anterior está ativo e o seu fim de curso confirma que o movimento terminou de verdade. Custa mais válvulas; em troca, os módulos são iguais, o projeto cabe numa tabela e a máquina mostra em que passo está.

AO FIM DESTE CAPÍTULO, VOCÊ VAI

- Descrever o módulo de um passo: memória, condição de ligar e de desligar.
- Montar a cadeia passo a passo de uma sequência, a partir da tabela de passos.
- Tratar movimentos repetidos, com funções OU nos pilotos e E nos fins de curso.
- Distinguir o passo a passo máximo do mínimo, e contar as memórias de cada um.
- Escolher entre os métodos intuitivo, cascata, passo a passo e eletropneumático.

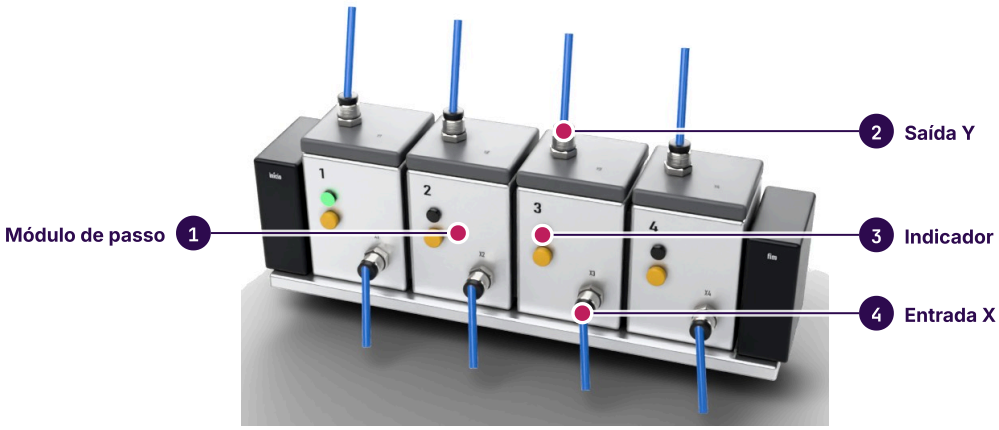


Figura 18.1 Os módulos de passo, em cadeia. Modelo 3D da aula, em corte. No lado maior, o conjunto mede cerca de 27 cm.

1. **Um módulo por passo.** Cada módulo é uma memória com duas condições: liga quando o passo anterior está ativo e o seu sinal X chega; desliga quando o seguinte liga.
2. **Saída Y: o movimento.** Com o passo ativo, a saída Y pilota a válvula de potência do movimento daquele passo.
3. **Indicador do passo ativo.** Mostra qual passo está ligado: na falha, diz onde a máquina parou. O botão laranja é o comando manual do passo.
4. **Entrada X: o fim de curso.** O sinal do fim de curso do movimento anterior entra aqui. Sem ele, o passo não avança.

em 3D e na sua mesa

18.1 O módulo: uma memória, uma condição para ligar e outra para desligar

Todo passo é o mesmo módulo, repetido (Figura 18.1). A **memória** é uma válvula 3/2 de duplo piloto, alimentada diretamente pela rede: ligada, a sua saída tem pressão; desligada, está em escape. Ela é **ligada** por

uma função E de dois sinais: a saída do passo anterior, que garante que a sequência está no ponto certo, e o fim de curso que confirma o término do movimento anterior. E é **desligada** pela saída do passo seguinte. A sua saída pilota o movimento deste passo, habilita o passo seguinte e desliga o anterior.

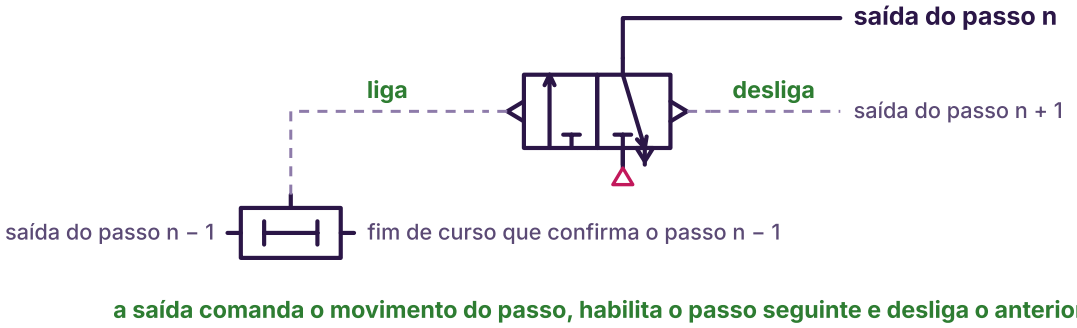


Figura 18.2 O módulo de um passo: uma válvula de memória 3/2 biestável, ligada por uma função E, e desligada pelo passo seguinte.

Na prática, a função E costuma ser a ligação em série: o fim de curso é alimentado pela saída do passo anterior, e não pela rede. **Não há sobreposição** porque o sinal que pilota um movimento é a saída de uma memória, desligada assim que o passo seguinte começa: nenhum sinal de comando dura mais que um passo.

18.2 Do primeiro ao último passo, e de volta ao primeiro

Os módulos ficam lado a lado, na ordem da sequência. Para A+ B+ B− A−, o projeto inteiro do comando é a Tabela 18.1.

Tabela 18.1

Passo	Ligado por	Comanda	Desligado por
1	memória 4, a0 e partida	A+	memória 2
2	memória 1 e a1	B+	memória 3
3	memória 2 e b1	B−	memória 4
4	memória 3 e b0	A−	memória 1

Fonte: tabela de passos da sequência A+ B+ B− A−. É o projeto inteiro do comando.

A cadeia é um **anel**: o último passo habilita o primeiro, e o primeiro desliga o último. Na posição inicial, a memória ligada é a do último passo, que, com o último fim de curso e a partida, liga o passo 1. Ao pressurizar a máquina, um sinal de **reposição** liga a última memória e desliga as outras. Qualquer condição extra (pressão atingida, peça presente, proteção fechada) entra como mais um sinal na função E do passo.

18.3 Movimentos repetidos, e o passo a passo mínimo

Na sequência A+ B+ B− B+ B− A−, de dois golpes, B avança e recua duas vezes. A tabela tem seis passos, com duas novidades. O piloto de B+ recebe a saída das memórias 2 e 4, unidas por uma **alternadora** (função OU), e o de B−, as das memórias 3 e 5. E o fim de curso b0 serve a dois passos: confirma o primeiro recuo e liga o passo 4; depois, confirma o segundo e liga o passo 6. Responde só a função E que a memória anterior habilita: o circuito sabe se o toque em b0 pede um novo golpe ou o fim do ciclo porque guarda em que passo está.

A versão com uma memória por passo é a **máxima**. Na **mínima**, divide-se a sequência em grupos pela regra da cascata e usa-se uma memória por grupo, com os movimentos do grupo encadeados pelos fins de

curso. Diferentemente da cascata, as memórias são válvulas 3/2 em paralelo, alimentadas pela rede: não há ar atravessando válvulas em série, nem limite prático de grupos. Para A+ B+ C+ C− B− A−: cascata, uma memória; mínimo, duas; máximo, seis.

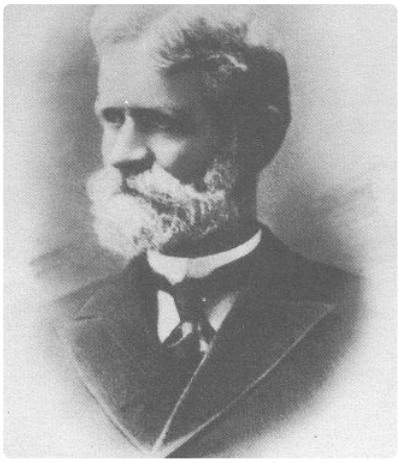
CASE REAL · KANSAS CITY E LA PORTE, DE 1889 A 1892

O seletor de Strowger: um pulso, um passo

Nas primeiras décadas do telefone, toda chamada era completada à mão por uma telefonista, que ligava as duas linhas com um cabo, em um painel. Almon Strowger, agente funerário em Kansas City, suspeitando de que as suas chamadas eram desviadas, dedicou-se a criar uma central que dispensasse a telefonista. Depositou o pedido de patente em 1889 e a obteve em 1891.

O dispositivo central era um seletor de passos: um braço de contato, movido por eletroímãs e catracas, avançava uma posição a cada pulso elétrico que o assinante enviava, a princípio por botões e, mais tarde, por um disco giratório. Para chamar o número 37, três pulsos faziam o seletor subir três níveis, e sete pulsos o faziam girar sete posições. Para centrais maiores, seletores iguais eram encadeados, um por dígito.

A primeira central comercial entrou em operação em 1892, em La Porte, Indiana, e as centrais passo a passo se espalharam pelo mundo; muitas continuaram em serviço até a década de 1990.



Autor desconhecido (antes de 1902), via Wikimedia Commons · Domínio público · origem

A lição: a posição do seletor é a memória do passo, e o mesmo pulso significa coisas diferentes conforme onde o seletor está, assim como o mesmo fim de curso b0 significa coisas diferentes conforme a memória ligada. E um defeito ficava visível, parado no passo em que falhou.

Fontes: Wikipedia (inglês), Almon Brown Strowger (seletor automático; central de La Porte, Indiana, 1892); Patente US 447 918, A. B. Strowger, Automatic telephone-exchange, 1891

18.4 Os quatro caminhos, e o passo a passo dentro de um controlador

Em eletropneumática, cada passo é um relé com autorretenção, ligado pelo relé anterior em série com o sensor e desligado pelo relé seguinte. Num controlador, cada passo é um bit de memória e cada condição, uma linha de programa: é o diagrama de etapas e transições do capítulo 15. Muda só o custo de cada passo: uma válvula com tubos, ou alguns caracteres de programa. Acima de três ou quatro cilindros, com sequência sujeita a mudanças, o caminho é o controlador; a pneumática pura fica para a máquina muito simples e para a área com risco de explosão ou sem eletricidade.

NA PRÁTICA

Os modos de operação saem quase de graça da cadeia

No **ciclo contínuo**, uma memória de marcha fica em paralelo com a partida. No **manual passo a passo**, o modo de ajuste, um botão de avanço entra na função E de todos os passos. Na **emergência**, define-se o que cada atuador deve fazer.

ERRO QUE CUSTA CARO

Memória ligada só pelo fim de curso

Sem o passo anterior na função E, o fim de curso liga o passo fora de hora.

CASE REAL · CHERNOBYL, ENTÃO UNIÃO SOVIÉTICA, 26 DE ABRIL DE 1986

Chernobyl: o ensaio que pulou as próprias condições

A usina queria provar que, se faltasse energia, a turbina, girando por inércia, alimentaria as bombas de refrigeração até os geradores a diesel assumirem. O ensaio foi tratado como coisa da parte não nuclear da usina, e o próprio programa previa desligar o resfriamento de emergência.

Adiado a pedido da rede elétrica, o ensaio acabou feito pelo turno da noite. A potência do reator caiu muito abaixo da prevista. Para recuperá-la, a equipe retirou barras de controle até a margem de reatividade ficar abaixo do mínimo exigido, de 15 barras. Sinais de proteção foram bloqueados para o ensaio não ser interrompido. Cada passo foi dado sem que a condição do passo anterior estivesse cumprida.

À 1h23, começou o ensaio. Segundos depois, foi acionado o desligamento de emergência. Pelo projeto do reator, a inserção das barras começou aumentando a reação na parte de baixo do núcleo. A potência disparou, e o reator 4 explodiu. O relatório revisto da agência internacional de energia atômica, de 1992, atribuiu o acidente a falhas de projeto combinadas com um ensaio fora das condições previstas.

A lição: um procedimento é uma sequência de passos, cada um com a sua condição. Desligar a condição para não interromper o ensaio equivale a jampear a memória: a sequência continua, mas deixou de ser segura.

Fontes: World Nuclear Association, Sequence of Events: Chernobyl Accident, Appendix 1 (ensaio tratado como parte não nuclear; programa previa desligar o resfriamento de emergência); IAEA, INSAG-7: The Chernobyl Accident: Updating of INSAG-1, Safety Series 75, 1992

PARA LEVAR DESTE CAPÍTULO

1. No **método passo a passo**, cada movimento tem a sua **memória**, uma válvula 3/2 de duplo piloto alimentada pela rede, que pilota o movimento do passo, habilita o seguinte e desliga o anterior.
2. Cada memória é ligada por uma **função E** entre a saída do passo anterior e o fim de curso que confirma o movimento anterior, e é desligada pela saída do passo seguinte.
3. Não há sobreposição porque nenhum sinal de comando dura mais que um passo: o fim de curso pode continuar pressionado, mas só serviu para ligar a memória seguinte.
4. A cadeia é um **anel**: na posição inicial, a memória ligada é a do último passo, e um sinal de reposição garante essa condição ao pressurizar a máquina.
5. Em movimentos repetidos, uma **alternadora** reúne as saídas das memórias que pedem o mesmo movimento, e um fim de curso serve a dois passos, pois o circuito guarda o passo atual.
6. O passo a passo máximo usa uma memória por passo, e o mínimo, uma por grupo, em paralelo: em A+ B+ C+ C− B− A−, cascata 1, mínimo 2, máximo 6.
7. Em eletropneumática, cada passo é um relé com autorretenção e, num controlador, um bit de memória; acima de três ou quatro cilindros, com sequência sujeita a mudanças, escolhe-se o controlador.

PARA NÃO ESQUECER liga o passo n: memória n − 1 E fim de curso; desliga: memória n + 1

18.5 Exercícios

Nível: ★ conceito · ★★ aplicação · ★★★ desafio

1 ★ O que liga a memória do passo 3?

a) A memória 2 ligada E o fim do movimento 2
b) Só o sinal do fim do movimento 2
c) O botão de partida, apertado de novo

2 ★ Qual é a grande vantagem do passo a passo sobre a cascata?

a) Usa sempre menos válvulas no total
b) Sinal rápido e passo ativo visível
c) Dispensa os fins de curso da máquina

3 ★ Em Chernobyl, o ensaio seguiu com a margem de reatividade abaixo do mínimo. No passo a passo, o equivalente seria:

a) Avançar sem a condição do passo cumprida
b) Usar uma memória a mais na cadeia
c) Ter um passo a menos na sequência

4 ★★ Em A+ B+ B− A−, pelo passo a passo máximo, o que liga a memória 3, o que ela comanda e o que a desliga? Por que a1 não atrapalha? E, para A+ B+ B− C+ C− D+ D− A− (quatro grupos), quantas memórias pedem a cascata, o mínimo e o máximo?

5 ★★ **Complete a tabela.** Complete a tabela de passos do método passo a passo máximo para a sequência A+ B+ C+ C− B− A−, no mesmo formato da Tabela 18.1. Depois, conte as válvulas do comando: três de potência, os fins de curso, as memórias e um botão de partida.

Passo	Ligado por	Comanda	Desligado por
1	memória 6, a0 e partida	A+	memória 2
2		B+	
3			memória 4
4	memória 3 e c1		
5		B−	
6			

6 ★★★ **Diagnóstico.** Uma prensa de dois golpes, A+ B+ B− B+ B− A−, montada pelo passo a passo máximo, recebeu manutenção, e no lugar da alternadora que une as saídas das memórias 2 e 4 ao piloto de B+ foi posto um tê comum. Agora, depois da partida, A avança e para; B não se move. A memória 2 comutou, mas o manômetro na sua saída indica quase zero, e há um sopro contínuo no escape da memória 4. Explique o que acontece, como confirmar e por que a alternadora é indispensável ali.

ANOTAÇÕES

FICHA DE BANCADA · CAPÍTULO 18

Montar o passo a passo de A+ B+ B− A− com quatro memórias

Objetivo. Montar pelo método passo a passo máximo a sequência A+ B+ B− A−, seguindo a Tabela 18.1, e acompanhar pelos indicadores qual memória está ligada em cada passo do ciclo.

Nome _____ Turma _____ Data _____

MATERIAL

- ☐ 2 cilindros de dupla ação (A e B)
- ☐ 2 válvulas 5/2 de duplo piloto, de potência, uma por cilindro
- ☐ 4 válvulas 3/2 de duplo piloto, como memórias 1 a 4
- ☐ 4 fins de curso de rolete 3/2 NF (a0, a1, b0, b1)
- ☐ 1 botão 3/2 NF com retorno por mola (partida)
- ☐ 4 indicadores pneumáticos ou manômetros, um na saída de cada memória
- ☐ 1 unidade de conservação com registro de entrada; tubos de 4 e 6 mm, tês e distribuidor

SEGURANÇA ANTES DE ABRIR O AR

- ☐ Regular a unidade de conservação em no máximo 6 bar; 4 bar bastam para a prática.
- ☐ Fechar o registro e despressurizar antes de soltar ou trocar qualquer tubo; conferir o manômetro em zero.
- ☐ Usar óculos de segurança e conferir que todos os tubos estão travados antes de abrir o ar.
- ☐ Dar a reposição antes de abrir o ar, deixando ligada só a memória 4: com uma memória qualquer ligada, um cilindro pode se mover na pressurização.
- ☐ Manter as mãos fora do curso das hastes e dos ressaltos enquanto houver ar no circuito.

MONTAGEM E TESTE

1. Com o ar fechado, fixar A e B, posicionar a0, a1, b0 e b1 e ligar à rede as quatro memórias e as duas válvulas de potência.
2. Ligar as saídas das memórias aos pilotos de potência: memória 1 no 14 de A (A+), memória 2 no 14 de B (B+), memória 3 no 12 de B (B−) e memória 4 no 12 de A (A−).
3. Ligar as funções E em série: a saída da memória 1 alimenta a1, cujo sinal liga a memória 2; a memória 2 alimenta b1, que liga a 3; a memória 3 alimenta b0, que liga a 4.
4. Fechar o anel: a saída da memória 4 alimenta a0, em série com a partida, e o sinal liga a memória 1.
5. Ligar os desligamentos (a memória 2 desliga a 1, a 3 desliga a 2, a 4 desliga a 3 e a 1 desliga a 4) e montar um indicador na saída de cada memória.
6. Dar a reposição, abrir o ar devagar e conferir que nada se move e que só o indicador da memória 4 mostra pressão.
7. Acionar a partida e anotar, a cada passo, a memória ligada, o movimento e os pilotos de potência com sinal.

MEDIÇÕES

Situação	Memória ligada	Movimento que acontece	Pilotos de potência com sinal
Ar aberto, após a reposição			
Partida acionada			
a1 acionado			
b1 acionado			
b0 acionado			

O PROFESSOR PROVOCA UM DEFEITO

Depois da partida, A avança e B avança, mas B não recua: a máquina para com os dois cilindros avançados, e os indicadores mostram duas memórias ligadas ao mesmo tempo, a 2 e a 3. Qual é a causa provável, e como você confirma?

_____

_____

CONCLUSÕES

1. Por que a1 continua pressionado durante B− e, no circuito correto, não atrapalha?

_____

1. Que memória fica ligada com a máquina parada na posição inicial, e para que serve a reposição?

2. Quantas válvulas tem este comando, e quantas teria a cascata da mesma sequência?

ANOTAÇÕES

CAPÍTULO 19 · MÉTODOS DE COMANDO, PROJETO E MANUTENÇÃO

19 Projeto e segurança: sem ar, na emergência e com a mão dentro

Uma máquina pneumática pode funcionar perfeitamente na bancada e, ainda assim, ser perigosa. A diferença está em três momentos que o projeto precisa prever: quando falta ar, quando alguém aperta a emergência e quando alguém põe a mão lá dentro. Para cada atuador, decide-se antes o que ele deve fazer sem ar, sem sinal e na emergência, e a válvula sai dessa decisão. Desligar o ar não é o mesmo que tirar a energia: o ar preso em um cilindro continua capaz de movê-lo. Este capítulo organiza o projeto em etapas e trata dos riscos próprios do ar comprimido.

AO FIM DESTE CAPÍTULO, VOCÊ VAI

- Organizar o projeto de um dispositivo pneumático em etapas, do levantamento à entrega.
- Definir o estado seguro de cada atuador em falta de ar, falta de sinal e emergência.
- Prever o isolamento, a descarga e o alívio da energia residual para manutenção.
- Aplicar os princípios de redução de risco e reconhecer componentes de segurança.
- Identificar os riscos próprios do ar comprimido: força, energia armazenada, jato e ruído.



Figura 19.1 O comando bimanual. Modelo 3D da aula, em corte. No lado maior, o conjunto mede cerca de 40 cm.

1. **Dois botões de palma, afastados.** Um para cada mão, longe um do outro e com colar de proteção: não dá para apertar os dois com uma mão, nem com o cotovelo.
2. **Saída para a válvula de potência.** O sinal só sai enquanto as duas mãos estão nos botões: as mãos ficam, por construção, fora da zona de perigo.
3. **Bloco bimanual.** Só libera a saída se os dois botões forem apertados **quase juntos** (em menos de 0,5 s) e mantidos. Uma mão só, ou uma de cada vez, não liga.
4. **Parada de emergência.** Cogumelo vermelho sobre fundo amarelo, no meio, ao alcance das duas mãos. Corta o comando e leva a máquina ao estado seguro.

em 3D e na sua mesa

19.1 Oito etapas, da tarefa à entrega

A ordem importa: cada etapa usa o resultado da anterior (Tabela 19.1). A primeira, o **levantamento da tarefa**, é a mais curta e a que mais erros evita. Antes de abrir um catálogo, responde-se por escrito: carga, curso,

tempos, ambiente, ar disponível no ponto, quem opera, abastece, limpa e ajusta, e **o que não pode acontecer**. Força muito alta ou posição intermediária precisa pedem hidráulica ou acionamento elétrico.

Tabela 19.1 **As etapas do projeto**

Etapa	O que se define	Capítulos
1. Tarefa	O que mover, com que força, curso, tempo, ambiente e cadência	1
2. Sequência	A ordem dos movimentos, as condições de cada passo, os tempos	15
3. Atuadores	Tipo, diâmetro pela força e pelo fator de carga, haste, amortecimento, consumo	7, 8 e 9
4. Falhas	O estado de cada atuador sem ar, sem sinal e em emergência; os riscos e as medidas	19
5. Comando	Válvulas de potência e auxiliares, método de comando, tecnologia	10, 11, 13, 14 e 16 a 18
6. Diagrama	Circuito na posição inicial, designações, lista de componentes	12
7. Montagem e teste	Tubos, conexões, identificação; teste de cada função em baixa pressão	5 e 6
8. Entrega	Ajustes registrados, documentação, instruções de operação e de manutenção	12 e 20

Fonte: etapas do projeto de um dispositivo pneumático, e onde cada uma foi tratada nesta disciplina.

19.2 Sem ar, sem sinal, em emergência: o estado seguro de cada atuador

Não existe válvula segura em geral. As três situações a prever são a **falta de ar** (a pressão cai, devagar ou de repente), **falta de sinal** (a energia elétrica cai, um condutor se rompe, um tubo de pilotagem se solta) e a **parada de emergência**. A resposta, para cada atuador, pode ser manter a posição e a força, recuar a uma posição segura, parar onde está ou ficar sem força.

Tabela 19.2 **Estado seguro dos atuadores mais comuns**

Atuador	Estado seguro mais comum	Como se obtém
Fixação de peça em usinagem	Manter presa, com força	Válvula biestável; retenção pilotada no cilindro; em casos críticos, fixação por mola, liberada pelo ar
Prensa, ferramenta que desce	Recuar, ou parar e ficar sem força	Válvula monoestável com repouso no recuo; descarga segura do ar
Carga suspensa, eixo vertical	Não cair	Retenção pilotada rosqueada no cilindro; trava mecânica da haste; nunca só a válvula
Porta, proteção móvel	Poder ser aberta à mão	Válvula 5/3 de centro em escape, ou alívio manual
Transferência horizontal	Parar	5/3 de centro fechado, ou recuar se o caminho estiver livre

Fonte: estado seguro típico de cada tipo de atuador. A decisão final depende da análise de cada máquina.

Emergência não é desligar tudo. Descarregar todo o ar de uma vez faz a carga suspensa cair e a fixação soltar a peça em rotação. Na parada de emergência, cada atuador vai ao seu estado seguro, e só então se retira a energia do que pode ser desenergizado. No **religamento**, nada deve se mover sem um comando novo e deliberado (a autorretenção da memória de partida, do capítulo 14), e a pressurização deve ser lenta, pela válvula de partida suave.

A energia que fica. Fechar o registro não deixa a máquina sem energia: sobra ar preso entre uma 5/3 de centro fechado e o cilindro, entre uma retenção pilotada e o cilindro, em reservatórios auxiliares e

tubulações, além de cargas suspensas e molas comprimidas em cilindros de simples ação.

NA PRÁTICA

Bloqueio antes de intervir

Parar a máquina na posição prevista para manutenção e apoiar ou travar as cargas suspensas. Fechar a válvula de bloqueio da entrada, que isola a rede e descarrega o circuito. Cada pessoa que intervém coloca o seu **cadeado e etiqueta**, e a chave fica com ela. Aliviar a energia residual nos pontos previstos e **verificar**: manômetros em zero, tentativa de partida sem efeito, hastes sem força. Ao terminar, retirar ferramentas, repor proteções e memórias, retirar os cadeados e pressurizar devagar.

CASE REAL · LAC-MÉGANTIC, CANADÁ, JULHO DE 2013

Lac-Mégantic: o trem que estava parado pelo ar

Na noite de 5 de julho de 2013, um trem de carga com setenta e dois vagões-tanque de petróleo foi estacionado em uma via principal em declive, a onze quilômetros de Lac-Mégantic, no Quebec. O único tripulante deixou uma locomotiva ligada, como era o procedimento, e foi para um hotel.



Aéro-Photo, Ministério da Segurança Pública do Quebec, via Wikimedia Commons · CC BY 4.0 · origem

Um trem parado é mantido pelos freios a ar, que dependem do compressor da locomotiva, e pelos freios manuais, que apertam as sapatas mecanicamente. A regra exige freios manuais suficientes para segurar o trem sozinhos, testados com os freios a ar soltos. Naquela noite, foram aplicados freios manuais em poucos veículos, e o teste foi feito com os freios a ar ainda aplicados, o que o invalidava.

A locomotiva que ficara ligada incendiou-se. Os bombeiros apagaram o fogo e desligaram o motor. Com o compressor parado, o ar dos freios foi vazando pelas folgas normais do sistema, e em cerca de uma hora o trem começou a descer. Chegou ao centro a mais de cem quilômetros por hora, numa curva projetada para dezesseis. Sessenta e três vagões descarrilaram, e o petróleo incendiou. Morreram quarenta e sete pessoas.

A lição: a pressão de um circuito isolado sempre acaba, porque toda vedação vaza. Carga suspensa se segura com meio mecânico: trava de haste, pino, calço, freio de mola. E verificar uma proteção com outra ainda atuando não verifica nada.

Fontes: Transportation Safety Board of Canada, Railway Investigation Report R13D0054 (Lac-Mégantic, 06/07/2013: 47 mortes; freios manuais insuficientes); Wikipedia (inglês), Lac-Mégantic rail disaster

19.3 Avaliar o risco e reduzi-lo na ordem certa

O tamanho de um risco sai de três perguntas: a **gravidade** do ferimento possível, a **exposição** (a pessoa está na zona de perigo raramente, ou a cada ciclo?) e a **possibilidade de evitar** (o movimento é lento e visível, ou rápido e inesperado?). Nos níveis mais altos de risco, as normas de segurança de máquinas, como a ISO 13849-1, pedem dois canais independentes e monitorados. A redução segue a hierarquia da NR-12 e da ISO 12100, e uma medida inferior não dispensa a tentativa da superior. No Brasil, a NR-12 trata das máquinas, e a NR-13, dos vasos de pressão, entre eles os reservatórios de ar.

Reduzir a força é a melhor proteção. Um cilindro de 40 mm a 6 bar faz 754 N; se a tarefa pede 80 N, um cilindro de 20 mm a 5 bar (157 N teóricos, com fator de carga 0,5) leva a força de um esmagamento para um aperto, sem depender de um regulador que alguém pode reabrir, e consome cerca de um quinto do ar. É a medida mais barata, e a única que não pode ser burlada.

Para funções de risco alto, válvulas comuns, que podem colar ou vazar sem aviso, dão lugar a **componentes de segurança**: válvula de descarga redundante e monitorada, bloco bimanual (Figura 19.1), travas e freios de haste certificados. E uma proteção que atrapalha o trabalho será burlada, com fita ou ímã: o projeto oferece um modo seguro de abastecer, limpar e ajustar.

Tabela 19.3

Ordem	Tipo de medida	Exemplos em pneumática
1ª	Eliminar ou reduzir o perigo no projeto	Menor força: cilindro menor, pressão reduzida. Menor velocidade. Folgas que não prendem a mão. Fixação por mola
2ª	Proteções e dispositivos de segurança	Proteção fixa. Proteção móvel com intertravamento. Comando bimanual. Cortina de luz. Válvula de descarga segura
3ª	Informação e procedimento	Sinalização, instruções, treinamento, equipamento de proteção individual

Fonte: hierarquia das medidas de redução de risco. A terceira nunca substitui as duas primeiras.

19.4 Os riscos do próprio ar: energia, jato, mangueira e ruído

A energia que o ar comprimido libera ao se expandir cresce com o volume e com a pressão, e é maior do que a intuição sugere: um reservatório de 500 litros a 10 bar manométricos guarda cerca de 1 320 kJ, o bastante para erguer 1 300 kg a cem metros. Se ele se rompe, por corrosão da água que ninguém drenou, essa energia sai em milésimos de segundo, com fragmentos de aço. Por isso o reservatório é tratado como **vaso de pressão**: projeto calculado, válvula de segurança, drenagem diária, inspeção periódica e nenhum reparo improvisado.

$$E = p \cdot V \cdot \ln \frac{p}{p_{atm}}$$

Energia que um volume V de ar comprimido, à pressão absoluta p, pode liberar ao se expandir até a pressão atmosférica, à temperatura constante. Com a pressão em pascals e o volume em metros cúbicos, o resultado sai em joules.

EXEMPLO RESOLVIDO

A energia de um reservatório

Um reservatório auxiliar de 50 litros, junto a uma máquina, trabalha a 7 bar. Que energia ele armazena? A que altura essa energia ergueria uma massa de 100 kg?

01 Pressão absoluta: 8 bar, ou 800 000 Pa. Volume: 0,05 m³.

02 Energia: 800 000 × 0,05 × ln(8) = 40 000 × 2,08 = 83 200 J.

03 Altura: 83 200 ÷ (100 × 9,81) = 85 m.

Resposta: Cerca de 83 kJ: o bastante para erguer 100 kg a 85 m. Esse reservatório continua cheio depois que o registro da máquina é fechado, a menos que o projeto preveja a sua descarga: é a energia residual, em número.

A mangueira solta chicoteia, com o jato servindo de motor. O jato na pele pode injetar ar no corpo por um ferimento: nunca se aponta ar para pessoas nem se limpa a roupa com ele, e os bicos de segurança limitam a pressão na ponta a cerca de 2 bar. Escapes livres e bicos de sopro passam de 90 dB, o que pede silenciadores e protetor auricular.

ERRO QUE CUSTA CARO

O cilindro travado é uma mola comprimida

Emperrado com pressão atrás do êmbolo e liberado por um toque, ele completa o curso com violência: nunca se destrava uma máquina pressurizada.

CASE REAL · MAR DO NORTE, NOVEMBRO DE 1983

Byford Dolphin: quatro passos na ordem, e nenhum conferido pela máquina

No mergulho de saturação, os mergulhadores vivem por semanas sob a pressão do fundo, em câmaras na superfície, ligadas por um túnel ao sino pressurizado que os leva ao trabalho: um vaso de pressão habitado.

Em 5 de novembro de 1983, numa plataforma no setor norueguês do Mar do Norte, quatro mergulhadores estavam nas câmaras, a cerca de 9 atmosferas, dois deles recém-chegados do fundo no sino. O desacoplamento tinha ordem obrigatória: fechar a porta do sino, fechar a porta da câmara, despressurizar o túnel e, por último, abrir a braçadeira que une o sino ao túnel, operada por fora. Naquele dia, a braçadeira foi aberta com o túnel sob pressão plena.

As câmaras passaram de nove atmosferas para uma em uma fração de segundo: os quatro mergulhadores morreram, e um dos ajudantes externos foi morto pelo sino, arremessado. O inquérito culpou o erro humano, conclusão contestada por anos: não havia intertravamento nem indicação do estado do túnel.

A lição: onde a ordem errada é grave, a máquina impede, e o estado de pressão fica visível onde a pessoa age. Atribuir um acidente a erro humano costuma encerrar a investigação um passo antes da causa.

Fontes: Wikipedia (inglês), Byford Dolphin (acidente de 05/11/1983, câmara a cerca de 9 atmosferas)

PARA LEVAR DESTE CAPÍTULO

1. O projeto segue oito etapas, da tarefa à entrega, e a primeira, o **levantamento da tarefa**, é respondida por escrito antes de abrir um catálogo, incluindo o que não pode acontecer.
2. Para cada atuador, decide-se o estado seguro na falta de ar, na falta de sinal e na **parada de emergência**, e a válvula sai dessa decisão: não existe válvula segura em geral.
3. Emergência não é desligar tudo: cada atuador vai ao seu estado seguro, e no religamento nada se move sem um comando novo, com pressurização lenta pela válvula de partida suave.
4. Fechar o registro não tira a energia: sobra ar preso em cilindros, retenções pilotadas e reservatórios, e carga suspensa se segura com meio mecânico, nunca só com a válvula.
5. A redução de risco segue a hierarquia da NR-12 e da ISO 12100 (eliminar no projeto, proteger, informar); **reduzir a força** é a medida mais barata e não pode ser burlada.
6. Lógica pneumática organiza o comando, mas não protege as mãos: funções de risco alto pedem **componentes de segurança**, como o bloco bimanual, a válvula de descarga redundante e as travas de haste certificadas.
7. A energia de um reservatório é p × V × ln(p ÷ patm), com pressão absoluta: 50 litros a 7 bar guardam cerca de 83 kJ, por isso ele é tratado como **vaso de pressão**.

PARA NÃO ESQUECER $E = p_{abs} \times V \times \ln(p_{abs} \div p_{atm})$

19.5 Exercícios

Nível: ★ conceito · ★★ aplicação · ★★★ desafio

1 ★ Um cilindro vertical segura uma carga, e falta ar. O que impede a carga de cair?

a) Uma válvula 5/2 monoestável
b) Válvula de bloqueio pilotada no cilindro
c) Um regulador de pressão no avanço

2 ★ Em Lac-Mégantic, por que os freios a ar do trem soltaram?

a) Os freios manuais estavam soltos de propósito
b) O maquinista soltou os freios a ar ao sair
c) O motor foi desligado e o ar dos freios escapou

3 ★ Um jato de ar comprimido atinge a pele de perto. O risco é:

a) Injetar ar no corpo e causar lesão grave
b) Nenhum, se a pressão estiver abaixo de 6 bar
c) Só uma sensação de frio no local do jato

4 ★★ Que energia (kJ) guarda um reservatório de 200 L a 9 bar manométricos? Use ln(10) = 2,30.

5 ★★ **Projeto.** Um cilindro de 50 mm, a 6 bar, empurra caixas para uma esteira, e a tarefa pede só 120 N. O operador trabalha ao lado do curso da haste. Com fator de carga 0,5, escolha entre cilindros de 20, 25 e 32 mm e pressões de 4 a 6 bar a combinação de menor força que ainda cumpre a tarefa. Compare a força teórica atual com a nova e estime a redução do consumo de ar por ciclo, com o mesmo curso.

6 ★★★ **Diagnóstico.** Na manutenção de uma prensa vertical, o técnico fechou o registro de entrada, e o manômetro da unidade de conservação foi a zero. A ferramenta estava parada no meio do curso, comandada por uma válvula 5/3 de centro fechado. Ao soltar o tubo da câmara dianteira do cilindro, a ferramenta desceu bruscamente cerca de 40 mm e só parou no calço que, por sorte, estava sobre a mesa. O que aconteceu, onde o procedimento falhou e o que o projeto deveria prever?

ANOTAÇÕES

FICHA DE BANCADA · CAPÍTULO 19

Montar o comando didático de duas mãos e ver por que ele não basta

Objetivo. Montar um comando didático de duas mãos com válvula de simultaneidade, verificar o estado seguro de 1A1 ao soltar um botão e comprovar por que ele não substitui o bloco bimanual de segurança.

Nome _____ Turma _____ Data _____

MATERIAL

- ☐ 1 cilindro de dupla ação (1A1)
- ☐ 1 válvula 5/2 de simples piloto com retorno por mola (1V1)
- ☐ 1 válvula de simultaneidade, função E (1V2)
- ☐ 2 botões 3/2 NF com retorno por mola, afastados no painel (1S1 e 1S2)
- ☐ 1 unidade de conservação com registro de entrada (0Z1)
- ☐ Distribuidor, tubos de 4 e 6 mm e 1 cronômetro

SEGURANÇA ANTES DE ABRIR O AR

- ☐ Regular 0Z1 em 4 bar, abaixo do limite de 6 bar da bancada.
- ☐ Fechar o registro e despressurizar antes de mexer em qualquer conexão; conferir o manômetro em zero e a haste sem força.
- ☐ Usar óculos de segurança e conferir que todos os tubos estão travados antes de abrir o ar.
- ☐ Manter as mãos e qualquer objeto fora do curso da haste de 1A1 durante todos os testes.
- ☐ Este circuito é didático: uma válvula E não protege as mãos, e numa prensa real a NR-12 exige bloco bimanual de segurança e parada de emergência definidos pela análise de risco.

MONTAGEM E TESTE

1. Com o ar fechado, fixar 1A1 e ligar 1V1: saída 2 na câmara dianteira, saída 4 na traseira e alimentação 1 no distribuidor, de modo que, em repouso, 1A1 fique recuado.
2. Montar 1S1 e 1S2 afastados no painel, a uma distância que impeça acionar os dois com uma só mão, e alimentá-los pelo distribuidor.
3. Ligar a saída de 1S1 a uma entrada de 1V2 e a saída de 1S2 à outra; ligar a saída de 1V2 ao piloto 14 de 1V1.
4. Conferir o circuito contra o diagrama e abrir o ar devagar: 1A1 deve permanecer recuado.
5. Testar cada forma de acionamento da tabela, cronometrando o atraso entre os dois botões, e anotar o que 1A1 faz.
6. Fechar o registro, despressurizar e conferir que a haste ficou sem força antes de desmontar.

MEDIÇÕES

Forma de acionar	1A1 avança?	Ao soltar um dos botões, 1A1 faz o quê?
Só 1S1		
Só 1S2		
1S1 e 1S2 juntos		
1S1 apertado; 1S2 apertado 3 s depois		
1S1 mantido; 1S2 solto e apertado de novo		

O PROFESSOR PROVOCA UM DEFEITO

Depois de o professor mexer no painel, 1A1 avança com um só botão, qualquer que seja, e recua ao soltá-lo; com os dois botões apertados, o comportamento parece normal. Qual é a causa provável, e como você confirma?

_____

_____

CONCLUSÕES

1. Que estado seguro este circuito dá a 1A1 quando um botão é solto, e que válvula decide isso?

_____

1. Que duas linhas da tabela mostram por que uma válvula E não é um comando bimanual de segurança?

2. Que medida de projeto, anterior a qualquer lógica de botões, reduziria o risco deste dispositivo, e por que ela não pode ser burlada?

ANOTAÇÕES

CAPÍTULO 20 · MÉTODOS DE COMANDO, PROJETO E MANUTENÇÃO

20 Manutenção, diagnóstico e eficiência energética

A disciplina termina na rotina do técnico. Uma máquina pneumática bem projetada ainda precisa de três cuidados para continuar boa: manter o ar limpo, porque a maior parte dos defeitos nasce na qualidade do ar; achar o defeito na ordem certa, em vez de trocar peças até a máquina voltar; e parar de pagar pelo ar que não trabalha. Em ar comprimido, a energia é o maior custo, e vazamento, pressão em excesso e uso inadequado são dinheiro soprado para fora. O capítulo fecha com uma visão de conjunto do caminho do ar, do compressor à ponta da haste.

AO FIM DESTE CAPÍTULO, VOCÊ VAI

- Organizar a manutenção preventiva de um sistema pneumático, por frequência.
- Diagnosticar falhas com método: ar, sinal, válvula e atuador, em ordem.
- Identificar onde a energia do ar comprimido é perdida, e as medidas de maior retorno.
- Calcular a economia de reduzir pressão, vazamentos e usos inadequados.
- Relacionar os conteúdos da disciplina em uma visão de conjunto.

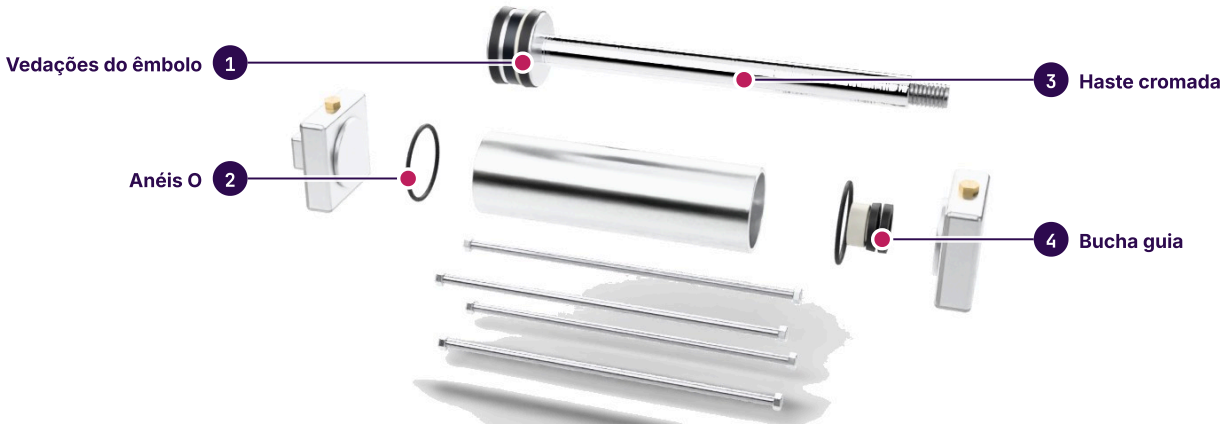


Figura 20.1 O cilindro desmontado, peça por peça. Modelo 3D da aula, em corte. No lado maior, o conjunto mede cerca de 38 cm.

1. **Vedações de lábio do êmbolo.** As peças de desgaste: com ar sujo ou seco demais, são as primeiras a vazar. O sintoma é o cilindro que perde força ou anda devagar.
2. **Anéis O da camisa.** Vedam a camisa nos cabeçotes. Troca-se tudo junto: kit de vedações completo, nunca peça por peça.
3. **Haste cromada.** Inspecione riscos e amassados: uma haste riscada destrói a vedação nova em poucos dias.
4. **Bucha guia, vedação e raspador.** O raspador limpa a haste a cada recuo; a bucha guia segura a carga lateral. Vêm no kit de reparo, com os anéis O.

em 3D e na sua mesa

20.1 Rotinas de manutenção, por frequência

A maior parte das falhas de válvulas e cilindros tem a mesma origem: **ar de má qualidade**. A água lava a graxa das vedações e enferruja o aço; o óleo degradado do compressor forma uma goma que cola os

carretéis; as partículas riscam as superfícies de vedação e entopem pilotos. Trocar a válvula colada resolve por algumas semanas. Resolver o ar resolve a máquina. Por isso a manutenção começa no filtro e no dreno: pouco trabalho, feito sempre.

Tabela 20.1 Rotinas de manutenção preventiva

Frequência	O que fazer	O que evita
Diária	Drenar reservatórios, filtros e pontos baixos sem dreno automático. Conferir a pressão e ouvir o sistema	Água nas válvulas e nos cilindros. Corrosão dos reservatórios
Semanal e mensal	Conferir drenos automáticos e indicadores dos filtros. Inspecionar mangueiras, conexões e fixações. Limpar silenciadores	Dreno travado. Mangueira rompida. Cilindro lento por escape entupido
Semestral	Trocar elementos filtrantes pela queda de pressão ou pelo prazo. Pesquisar vazamentos com detector	Queda de pressão na entrada das máquinas. Perda crescente de ar
Anual e legal	Revisar a central, testar válvulas de segurança, verificar o ponto de orvalho. Inspeção dos reservatórios como vasos de pressão	Ar úmido na rede. Falha de proteção. Ruptura por corrosão

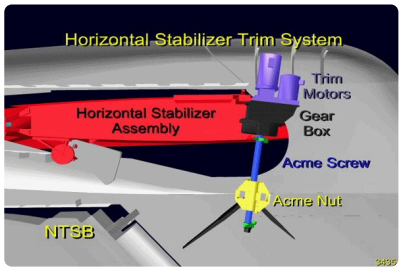
Fonte: rotinas de manutenção preventiva de um sistema pneumático. Os prazos se ajustam às horas de operação e à qualidade do ar.

Componentes atuais saem de fábrica com graxa para toda a vida e trabalham com ar sem óleo; mas, como visto no capítulo 6, se um componente foi lubrificado por névoa uma vez, a lubrificação precisa continuar. Na troca, vale o **kit completo** da Figura 20.1. Cilindros são especificados em quilômetros de curso, e válvulas, em milhões de ciclos: um cilindro de 150 mm de curso, a 40 ciclos por minuto e 4 000 horas por ano, percorre 2 × 0,15 × 40 × 60 × 4 000 = 2 880 km por ano; com vida de vedações de 5 000 km (cerca de 21 meses), a troca se programa a cada 18 meses. Isso supõe ar limpo e carga alinhada: vazamento pela haste aos seis meses indica carga lateral, e é ela que precisa ser corrigida.

CASE REAL · COSTA DA CALIFÓRNIA, JANEIRO DE 2000

Alaska 261: a graxa que foi sendo espaçada

Em 31 de janeiro de 2000, um jato de passageiros de dois motores, em voo do México para os Estados Unidos, perdeu o controle e caiu no oceano, ao largo da Califórnia. Morreram as 88 pessoas a bordo.



NTSB, via Wikimedia Commons · Domínio público (governo dos EUA) · origem

A investigação recuperou do fundo do mar o conjunto de compensação do estabilizador horizontal: um fuso de aço, de rosca trapezoidal, que atravessa uma porca de liga de bronze, mais macia, o elemento de sacrifício. Os filetes da rosca da porca haviam sido arrancados, e não havia graxa eficaz na região de trabalho.

O órgão investigador concluiu que a causa provável foi o desgaste excessivo da porca, por lubrificação insuficiente, e apontou como fatores contribuintes a extensão dos intervalos de lubrificação e de verificação da folga. Ao longo dos anos, os dois intervalos haviam sido ampliados várias vezes, com aprovação da autoridade fiscalizadora: cada ampliação parecia razoável, porque a frota voava sem problemas. O acesso ao ponto de lubrificação era difícil, e o tempo registrado para a tarefa era, muitas vezes, inferior ao necessário. O projeto não tinha um segundo caminho de carga: a falha de uma única porca bastava.

A lição: o sistema tolera, e a tolerância é lida como prova de que a tarefa era desnecessária, como o dreno que não é aberto e o filtro que não é trocado. Um intervalo só se amplia com medição do desgaste, e não com a ausência de falhas.

Fontes: NTSB, Aircraft Accident Report AAR-02/01: Alaska Airlines voo 261, 31/01/2000 (desgaste da porca do fuso por lubrificação insuficiente); Wikipedia (inglês), Alaska Airlines Flight 261

20.2 Achar o defeito em ordem: ar, sinal, válvula, atuador

Trocar peças até a máquina voltar é caro e não ensina nada. Primeiro, **ouvir o operador**: o que a máquina deixou de fazer, desde quando e o que mudou antes, porque a maioria das falhas segue uma intervenção (tubos trocados, sensor fora de posição, reguladora de fluxo deixada fechada). Depois, identificar o passo em que a máquina parou e localizar no diagrama o atuador, a sua válvula e os sinais que a comandam. Então, **verificar em ordem**: há pressão na máquina? O sinal chega ao piloto? A válvula comuta, e há pressão na saída? O atuador recebe ar, e o ar da outra câmara consegue sair? Por fim, a causa da causa: a válvula colou, por quê? Sem essa pergunta, o defeito volta.

Tabela 20.2 Sintomas e causas prováveis

Sintoma	Causas prováveis, na ordem em que convém verificar
O cilindro não se move	Sem pressão. Sem sinal no piloto. Sinal oposto ainda presente. Válvula colada. Escape obstruído. Carga travada
O cilindro não tem força	Pressão baixa. Vazamento pelo êmbolo. Contrapressão no escape. Diâmetro insuficiente para a carga atual
A sequência para sempre no mesmo passo	Fim de curso desregulado ou não acionado. Sobreposição de sinais. Memória fora de posição
A válvula sopra ar pelo escape	Vedação interna gasta, ou vedação do êmbolo gasta: o ar atravessa o cilindro e sai pela válvula

Fonte: sintomas e causas a verificar. A primeira suspeita é sempre a mais simples e a mais barata de conferir.

NA PRÁTICA

Êmbolo ou válvula? E os instrumentos do diagnóstico

Com o cilindro parado em um extremo, solta-se o tubo da câmara que deveria estar sem pressão. Se sai ar continuamente por ele, o ar está atravessando o **êmbolo**. Se não sai, e o escape da válvula continua soprando, o vazamento é da **válvula**. Os instrumentos são simples: manômetro com conexão rápida, indicadores nas linhas de sinal, o acionamento manual auxiliar das válvulas (que separa o problema pneumático do de comando) e detector ultrassônico de vazamentos.

20.3 Para onde vai a energia, e as medidas que mais devolvem

Ao longo da vida de um compressor industrial, a eletricidade responde, tipicamente, por 70 a 80 % do custo total; a máquina, por 10 a 20 %. Quase toda essa energia vira calor na compressão, outra parte se perde na rede, em queda de pressão e em vazamentos, e a fração que chega ao trabalho útil fica em torno de 10 %. As maiores economias exigem medir e fechar o que está aberto, e não equipamento novo. A vazão medida com a fábrica parada é, inteira, vazamento.

Tabela 20.3 **As medidas de eficiência de maior retorno**

Medida	Economia típica	O que exige
Eliminar vazamentos	De 10 a 30 % do ar produzido, onde nunca houve programa	Pesquisa periódica com detector, etiquetas e reparo
Reduzir a pressão da rede	Cerca de 6 a 7 % da energia por bar	Descobrir qual consumidor exige a pressão atual e atendê-lo localmente
Eliminar usos inadequados	Variável: às vezes, o maior item	Trocar sopros abertos, resfriamento e agitação por ar, e ejetores contínuos

Fonte: medidas de eficiência em sistemas de ar comprimido. Os percentuais são ordens de grandeza e dependem de cada instalação.

A rede costuma trabalhar com a pressão exigida pelo consumidor mais exigente, muitas vezes um só, e todos os outros desperdiçam o excedente, porque vazamentos e sopros não regulados consomem ar em proporção à pressão absoluta. Entre os usos inadequados, o campeão é o sopro por tubo aberto: um tubo de 6 mm, a 6 bar, consome mais de 1 500 litros por minuto, e um bico projetado faz o mesmo efeito com metade ou um terço do ar.

EXEMPLO RESOLVIDO

O que vale um bar

Uma fábrica tem 75 kW de compressores em carga, 6 000 horas por ano, com a rede a 7,5 bar. A tarifa é de R$ 0,70 por kWh. Descobre-se que, atendendo uma única máquina com um amplificador de pressão local, a rede pode trabalhar a 6,5 bar. Quanto se economiza por ano, só na energia de compressão?

01 Consumo atual: 75 × 6 000 = 450 000 kWh, ou R$ 315 000 por ano.

02 Redução de 1 bar: cerca de 7 %.

03 Economia: 450 000 × 0,07 = 31 500 kWh, ou R$ 22 000 por ano.

Resposta: Cerca de R$ 22 mil por ano, sem contar a queda de 12 % no ar perdido em vazamentos e sopros, que pode dobrar esse valor. O investimento é um amplificador de pressão para uma máquina. O retorno costuma ser de poucos meses. A dificuldade nunca é técnica: é descobrir quem, na fábrica, pediu a pressão alta, e por quê.

ERRO QUE CUSTA CARO

Subir a pressão para compensar

Quando uma máquina perde força por um ramal estrangulado, um filtro saturado ou um vazamento, subir a pressão da rede a faz voltar, e faz **todas as outras** gastarem mais. O certo é corrigir a queda de pressão e manter a rede no mínimo necessário.

CASE REAL · ESTADOS UNIDOS, DE 1997 A 2001

O ar comprimido que não era de ninguém

Na segunda metade da década de 1990, o órgão federal de energia dos Estados Unidos, com fabricantes e associações da indústria, criou um programa voluntário para os sistemas de ar comprimido. Um dos seus produtos foi um levantamento nacional, publicado em 2001.

Os sistemas de ar comprimido respondiam por algo da ordem de 10 % da eletricidade da indústria do país. O estudo estimou o potencial de economia, com medidas de retorno em até três anos, entre 15 e 20 % do consumo desses sistemas; em instalações individuais, auditorias encontraram 30 % e mais. As maiores parcelas não vinham de compressores novos, mas de corrigir vazamentos e usos inadequados, ajustar o controle e reduzir a pressão.

A constatação que explicava as outras: a grande maioria das fábricas não media a vazão de ar, não sabia o custo do seu metro cúbico e não tinha um responsável pelo sistema. Os compressores eram da manutenção; a rede, da engenharia; os pontos de uso, da produção; a conta, do financeiro. O desperdício não era de ninguém.

A lição: a eficiência em ar comprimido é questão de gestão: faltam a medição e o dono. Ataca-se primeiro a demanda, depois a geração.

Fontes: U.S. Department of Energy, Assessment of the Market for Compressed Air Efficiency Services, 2001; U.S. Department of Energy e Compressed Air Challenge, Improving Compressed Air System Performance: A Sourcebook for Industry, 2003

20.4 Do compressor à ponta da haste: o fecho da disciplina

O caminho do ar resume a disciplina: geração, tratamento, distribuição, preparação local, comando e atuação, e, sobre tudo isso, projeto, segurança e manutenção. Algumas ideias atravessam todos os trechos. Toda força pneumática é pressão vezes área. O ar é compressível, o que o torna seguro contra sobrecarga, impreciso e perigoso quando armazenado. A água sempre vem junto, e queda de pressão é energia perdida. O repouso da válvula é o comportamento na falha. Cada passo confirma o anterior, em válvulas, em relés, em programa e em procedimentos.

A pneumática pura é a base do que vem depois: o comando eletropneumático, com os mesmos atuadores e válvulas e um controlador; a hidráulica, com os mesmos símbolos e um fluido incompressível a pressões vinte ou trinta vezes maiores; e a automação, sob o mesmo método de etapas e transições.

PARA LEVAR DESTE CAPÍTULO

1. A maior parte das falhas de válvulas e cilindros nasce no **ar de má qualidade**; por isso a manutenção começa no filtro e no dreno, com drenagem diária.
2. Cilindros têm vida especificada em **quilômetros de curso**: 150 mm a 40 ciclos por minuto, em 4 000 horas por ano, somam 2 880 km por ano, e por isso se programa a troca.
3. O defeito se procura em ordem, **ar, sinal, válvula, atuador**, depois de ouvir o operador sobre o que mudou, e a busca só termina na causa da causa, para que ele não volte.
4. Para separar êmbolo de válvula, solta-se o tubo da câmara que deveria estar sem pressão: sopro contínuo indica êmbolo gasto; sem sopro, e com o escape soprando, é a válvula.
5. A eletricidade é 70 a 80 % do custo de vida de um compressor, só cerca de 10 % da energia vira trabalho útil, e a vazão com a fábrica parada é toda **vazamento**.
6. As medidas de maior retorno são eliminar vazamentos (10 a 30 % do ar), reduzir a pressão da rede (6 a 7 % da energia por bar) e trocar sopros abertos por bicos.
7. Subir a pressão da rede para compensar uma máquina com queda de pressão faz todas as outras gastarem mais: corrige-se a queda e mantém-se a rede no mínimo necessário.

PARA NÃO ESQUECER percurso anual = 2 × curso × ciclos por minuto × 60 × horas por ano

20.5 Exercícios

Nível: ★ conceito · ★★ aplicação · ★★★ desafio

1 ★ Em que ordem se procura um defeito numa máquina pneumática?

a) Atuador, válvula, sinal, ar
b) Ar, sinal, válvula, atuador
c) Válvula, atuador, ar, sinal

2 ★ O cilindro B não recua; ao apertar o botão manual da válvula dele, ele recua. Onde está o defeito?

a) No próprio cilindro B
b) No compressor da sala
c) No sinal que pilota a válvula

3 ★ No voo de janeiro de 2000, na costa da Califórnia, por que o fuso do estabilizador falhou?

a) O fuso era de material errado
b) Faltou ar comprimido no sistema
c) A porca se desgastou sem graxa suficiente

4 ★★ Num domingo, com a fábrica parada e a rede pressurizada, o medidor de vazão na saída da central indica 2,5 m³/min. A central gasta cerca de 7 kW por m³/min, a fábrica opera 6 000 horas por ano e a tarifa é de R$ 0,70 por kWh. Quanto custam os vazamentos por ano? Quanto se economiza se um programa de pesquisa e reparo os reduzir a 1 m³/min?

5 ★★ **Diagnóstico.** Uma prensa pneumática ficou lenta e fraca no avanço, e o operador conta que piorou aos poucos nas últimas duas semanas, desde que o responsável pela drenagem diária saiu de férias. O manômetro da rede, antes da máquina, marca 6,5 bar. O da saída do regulador marca 6 bar com o cilindro parado, mas cai para 3,8 bar durante o avanço. Qual é a causa provável, como confirmá-la e o que não se deve fazer?

6 ★★★ **Projeto.** Uma linha de embalagem tem 4 sopros por tubo aberto de 6 mm, a 6 bar, cada um consumindo 1 500 L/min, ligados 50 % do tempo durante 4 000 horas por ano. A central gasta cerca de 7 kW por m³/min, e a tarifa é de R$ 0,70 por kWh. Bicos de sopro projetados, que fazem o mesmo efeito com um terço do ar, custam R$ 300 cada. Quanto custa hoje o ar dos sopros, quanto se economiza por ano e em quanto tempo a troca se paga?

ANOTAÇÕES

Gabarito comentado

As respostas dos exercícios de cada capítulo, com o raciocínio. Confira depois de tentar: o erro que você corrige sozinho é o que não se repete.

Capítulo 1 · O ar comprimido como energia: usos, vantagens e limites

1 c) 100 ÷ 14,5 ≈ 6,9 bar.

2 b) Força alta e rigidez: hidráulica.

3 c) 0,5 × 60 × 8 000 × 0,11 × 0,80 = R$ 21 120.

4 **Cerca de 1 870 N.** Conversão: 87 × 0,0689 = 6,0 bar. Área do êmbolo: π × 6,3² ÷ 4 = 31,2 cm². Força: 6,0 × 31,2 × 10 = 1 870 N (cerca de 190 kgf). Usa-se a pressão manométrica, porque a atmosfera age dos dois lados do êmbolo.

5 **Cerca de 4 bar chegam ao cilindro.** Área do êmbolo: π × 5² ÷ 4 = 19,6 cm². Pressão que explica a força medida: 790 ÷ (19,6 × 10) = 4,0 bar, e não os 6 bar do projeto. Com 7 bar na sala, faltam 3 bar entre a rede e o cilindro: o regulador da máquina ajustado abaixo do valor de projeto, ou uma perda no caminho (filtro entupido, mangueira fina ou engate estreito). Para confirmar, instala-se um manômetro na entrada do cilindro e lê-se a pressão com o dispositivo em uso; depois, sobe-se pelo caminho do ar até achar o ponto onde a pressão cai.

6 **Cilindro de 100 mm.** Força teórica necessária: 2 500 ÷ 0,9 = 2 778 N. Área mínima: 2 778 ÷ (5 × 10) = 55,6 cm², ou diâmetro de cerca de 84 mm. O de 80 mm (50,3 cm²) dá 5 × 50,3 × 10 = 2 515 N teóricos e 2 263 N úteis: não atende. O de 100 mm (78,5 cm²) dá 3 925 N teóricos e cerca de 3 530 N úteis, com folga. Com 6 bar, o de 80 mm daria 6 × 50,3 × 10 × 0,9 = 2 716 N, mas a rede não garante 6 bar nesse ponto, e subir a pressão da fábrica custa energia o ano inteiro.

Capítulo 2 · Propriedades do ar: pressão, volume, temperatura e água

1 b) 200 × 9 bar absolutos = 1 800 L.

2 c) 6 × 330 ÷ 300 = 6,6 bar.

3 c) Abaixo do ponto de orvalho, o vapor vira líquido.

4 **0,143 m³ e cerca de 17 g de água.** Boyle: V2 = 1 × 1 ÷ 7 = 0,143 m³. Vapor aspirado: 0,70 × 30,4 = 21,3 g. Nos 143 litros, a 30 °C, cabem 0,143 × 30,4 = 4,3 g. Condensam 21,3 − 4,3 = 17 g: quatro quintos da água que entrou.

5 Ar livre = volume × pressão absoluta ÷ 1 bar. **A**: 7 + 1 = 8 bar absolutos; 500 × 8 = 4 000 L. **B**: 11 − 1 = 10 bar no manômetro; 300 × 11 = 3 300 L. **C**: 6 + 1 = 7 bar absolutos; 1 000 × 7 = 7 000 L. **D**: 9 + 1 = 10 bar absolutos; volume = 2 000 ÷ 10 = 200 L. O erro comum é multiplicar pela pressão do manômetro: no reservatório C, isso daria 6 000 L, um sétimo a menos do que o tanque realmente guarda.

6 **Só cerca de 0,3 bar é vazamento.** Em absoluta: 8,0 + 1 = 9,0 bar; temperaturas de 318 K e 293 K. Só pelo resfriamento, a volume constante: 9,0 × 293 ÷ 318 = 8,29 bar absolutos, ou 7,3 bar no manômetro. O resfriamento explica 0,7 bar da queda; restam 0,3 bar, ou 500 × 0,3 = 150 litros de ar livre em 12 horas, um vazamento pequeno. Para confirmar, repete-se o teste com o tanque já na temperatura do ambiente: anota-se a pressão, espera-se algumas horas na mesma temperatura e lê-se de novo. Espuma de sabão no dreno e nas conexões localiza o ponto.

Capítulo 3 · Compressores: tipos, potência, regulação e a sala

1 b) É o padrão da indústria nessa faixa.

2 a) Cerca de 6 a 7 % por bar, além de aumentar os vazamentos.

3 b) Gira em vazio, gastando energia sem entregar ar.

4 **Cerca de R$ 122 400 por ano.** Potência: 6 × 6,8 = 40,8 kW. Energia: 40,8 × 4 000 = 163 200 kWh. Custo: 163 200 × 0,75 = R$ 122 400. Cada bar a menos poupa 6 a 7 % da energia: cerca de R$ 7 300 a R$ 8 600 por ano.

5 **Cerca de 3,6 m³/min de consumo médio e R$ 21 mil por ano em alívio.** Fração em carga: 3 600 ÷ 6 000 = 0,6; consumo médio: 6 × 0,6 = 3,6 m³/min. Em alívio: 37 × 0,30 = 11,1 kW durante 2 400 h, ou 26 640 kWh; a R$ 0,80, são R$ 21 312 por ano gastos sem entregar um litro de ar. Os números indicam uma máquina grande para a demanda, ou uma demanda muito variável: 40 % do tempo em alívio. As saídas são um compressor de velocidade variável, que acompanha o consumo, ou uma máquina menor; antes de tudo, vale medir os vazamentos, que entram nesses 3,6 m³/min.

6 **A opção B economiza cerca de R$ 26 mil por ano.** Opção A: potência em carga 6,5 × 10 = 65 kW; fração em carga 7 ÷ 10 = 0,7. Potência média: 65 × 0,7 + 65 × 0,30 × 0,3 = 45,5 + 5,85 = 51,35 kW. Opção B: base 6,5 × 5 = 32,5 kW; o de velocidade variável entrega em média 7 − 5 = 2 m³/min, ou 2 × 6,7 = 13,4 kW. Total: 45,9 kW. Diferença: 5,45 kW × 6 000 h = 32 700 kWh, ou R$ 26 160 por ano. Além disso, com duas máquinas, a falha de uma não para a fábrica inteira.

Capítulo 4 · Tratamento do ar: resfriamento, secagem e filtragem

1 b) Os três números são as classes de partículas, água e óleo.

2 a) Ponto de orvalho abaixo da menor temperatura da instalação.

3 b) Purga fixa não acompanha a carga: só o controle por ponto de orvalho reduz.

4 **1,5 m³/min e cerca de R$ 47 mil por ano.** Purga: 10 × 0,15 = 1,5 m³/min. Potência para produzir esse ar: 1,5 × 6,5 = 9,75 kW. Energia: 9,75 × 6 000 = 58 500 kWh. Custo: 58 500 × 0,80 = R$ 46 800. É o preço de um ponto de orvalho de −40 °C, e a razão de usar esse secador só onde é indispensável, com a purga controlada pela umidade real.

5 **O purgador do próprio secador está travado fechado.** O secador esfria o ar e condensa a água corretamente, por isso o indicador mostra 3 °C; mas a água condensada não sai do separador interno, acumula e é arrastada pelo ar para a rede. O tubo de dreno seco é a pista. Para confirmar, aciona-se o botão de teste do purgador do secador: se não sai condensado, desmonta-se e limpa-se o filtro de entrada dele, quase sempre entupido por sujeira e óleo. Vale também conferir se a válvula de desvio do secador ficou aberta depois de alguma manutenção.

6 **Tratar só o ramal da cabine.** Na saída da sala, os três filtros somam 0,3 bar de perda para todo o ar, e o compressor precisa subir esse valor: 0,3 × 6,5 % = 1,95 % da energia, ou 65 × 0,0195 × 5 000 × 0,80 = R$ 5 070 por ano, valor que cresce à medida que os elementos saturam. Os filtros também teriam de ser dimensionados para 10 m³/min. Junto à cabine, para 1,2 m³/min, a mesma sequência custa muito menos e não afeta o resto da rede. Ordem: pré-filtro, coalescente e carvão ativado, do mais grosso para o mais fino, com dreno no pré-filtro e no coalescente; a água já está na classe 4, que o secador por refrigeração garante.

Capítulo 5 · Rede de ar comprimido: traçado, tubos, perda e vazamentos

1 a) Tubo de ar exige material de ruptura dúctil, feito para ar comprimido.

2 b) Queda ∝ 1/d⁵: um degrau de diâmetro muda muito a perda.

3 c) As maiores perdas costumam estar nos últimos metros.

4 **2,5 m³/min e 300 000 m³ por ano.** Fração do tempo em carga: 2 ÷ (2 + 6) = 0,25. Vazamento: 10 × 0,25 = 2,5 m³/min, um quarto da capacidade. Por ano: 2,5 × 60 × 2 000 = 300 000 m³. A cerca de 0,11 kWh por m³, são 33 000 kWh gastos com a fábrica parada, sem produzir nada.

5 **Caso 1: 0,76 bar. Caso 2: cerca de 1,36 bar. Caso 3: cerca de 0,012 bar.** Dobrar o comprimento dobra a perda: 0,38 × 2 = 0,76 bar. Dobrar a vazão multiplica por 2 elevado a 1,85, que é 3,6: 0,38 × 3,6 = 1,36 bar. Dobrar o diâmetro divide por 2 elevado a 5, que é 32: 0,38 ÷ 32 = 0,012 bar. Só o caso 3 atende o limite de 0,1 bar. A tabela mostra por que o diâmetro é a decisão mais importante da rede: um degrau de bitola compensa com folga o dobro da vazão.

6 **Linha de 50 mm.** L = 130 m; p = 8 bar absolutos. Hoje: Q = 4 000 ÷ 60 = 66,7 L/s, e com 25 mm a perda é 450 × 66,7^1,85 × 130 ÷ (25^5 × 8) ≈ 1,77 bar, quase 18 vezes o admissível. Para 5 m³/min (83,3 L/s): 32 mm dá cerca de 0,78 bar; 40 mm, cerca de 0,26 bar; 50 mm, cerca de 0,084 bar, a única abaixo de 0,1 bar. Velocidade a 50 mm: 5 ÷ 8 = 0,625 m³/min de ar comprimido, ou 0,0104 m³/s, em 0,00196 m² dá 5,3 m/s, dentro do limite de 6 a 10 m/s.

Capítulo 6 · Unidade de conservação: filtro, regulador e lubrificador

1 c) O filtro de máquina é a última barreira, não o tratamento do ar.

2 b) Sem consumo e sem alívio, o ar preso não tem por onde sair.

3 c) Quem começa a lubrificar precisa continuar.

4 **Cerca de 5,1 bar, com 13 % menos ar.** Força teórica necessária: 450 ÷ 0,7 = 643 N. Área do êmbolo: π × 4² ÷ 4 = 12,57 cm². Pressão: 643 ÷ (12,57 × 10) = 5,1 bar. Consumo relativo: (5,1 + 1) ÷ (6 + 1) = 0,87, ou seja, cerca de 13 % menos ar do que a 6 bar.

5 A unidade foi montada **ao contrário**, contra o sentido do ar. Com o fluxo invertido, o ar não gira no copo nem passa pela zona calma antes do elemento: a água não é separada e segue para a máquina, e por isso o copo continua vazio. O regulador também deixa de regular, porque a rede passa a agir pelo lado da saída, e a manopla perde o efeito. Confirma-se olhando a seta de fluxo gravada no corpo, que tem de apontar da rede para a máquina. Para corrigir, fecha-se a válvula de fechamento, descarrega-se o ar e remonta-se a unidade na vertical, com o copo para baixo e a seta no sentido do ar.

6 Na de 3/8: queda de 1 bar × (2 000 ÷ 2 500)² = 0,64 bar, e 6 − 0,64 = **5,36 bar** no pico. Na de 1/2: (2 000 ÷ 4 500)² = 0,20 bar, e **5,80 bar**. Com 6 bar de ajuste, as duas atendem, e a folga de 1 bar entre a rede e o ajuste é a que o regulador pede. Com o ajuste em 5,5 bar, a de 3/8 entrega 5,5 − 0,64 = 4,86 bar no pico, abaixo do mínimo; a de 1/2 entrega 5,30 bar e serve. A economia é de (5,5 + 1) ÷ (6 + 1) = 0,93, ou cerca de 7 % menos ar, todos os dias: a unidade maior se paga pela pressão que permite baixar.

Capítulo 7 · Cilindros pneumáticos: construção, tipos e montagem

1 b) A mola faz o movimento de segurança.

2 a) A energia precisa ficar abaixo do que o cilindro absorve.

3 b) Mesmas cotas de montagem, de qualquer fabricante.

4 **Cerca de 2 880 km por ano, e uns três anos e meio.** Cada ciclo percorre 0,4 m (avanço e recuo). Por ano: 0,4 × 30 × 60 × 16 × 250 = 2 880 000 m, ou 2 880 km. 10 000 ÷ 2 880 = 3,5 anos: são 7,2 milhões de ciclos por ano, ou mais de 50 milhões de cursos no total.

5 Com E = ½ × m × v²: linha 1, ½ × 10 × 0,64 = **3,2 J**, basta (4 J). Linha 2, ½ × 20 × 0,81 = **8,1 J**, não basta (7 J): reduz-se a velocidade, passa-se ao cilindro de 63 mm ou usa-se amortecedor hidráulico externo. Linha 3, ½ × 25 × 0,81 = **10,1 J**, basta (12 J). Linha 4, ½ × 25 × 1,0 = **12,5 J**, não basta. Entre as linhas 3 e 4, a velocidade subiu só 11 % e a energia subiu 23 %, porque cresce com o quadrado: um regulador de fluxo aberto um pouco mais pode passar o cilindro do limite. As capacidades reais são as do catálogo.

6 A causa é **carga lateral** criada pela fixação. A flange prende o corpo rígido, mas a ponta da haste é obrigada a seguir o arco da alavanca: a cada ciclo, a haste é forçada de lado, e a bucha e as vedações se gastam de um lado só, como mostram o desgaste unilateral e a faixa brilhante. Confirma-se soltando a haste da alavanca e movendo a alavanca à mão: a ponta sai da linha do eixo do cilindro ao longo do curso. A solução é trocar a fixação por articulação traseira ou munhão, que deixam o corpo oscilar, com olhal de rótula na ponta, além de substituir a bucha e conferir se a haste ficou riscada; trocar só as vedações não resolve.

Capítulo 8 · Dimensionamento de cilindros: força, flambagem e consumo

1 b) 754 N teóricos × 0,85 = 641 N: sobra pouco, mas sobra.

2 b) Euler: Fk ∝ 1/Lk². Comprimento dobrado, um quarto da força.

3 a) A média paga a energia; o pico escolhe a válvula.

4 **Cerca de 32,3 L/min.** Áreas (Tabela 8.1): 8,04 + 6,91 = 14,95 cm². Por ciclo: 14,95 × 8 cm × (5 + 1) bar ÷ 1 000 = 0,718 L de ar livre. Por minuto: 0,718 × 45 = 32,3 L/min. Com 10 a 30 % para tubos e volumes mortos, de 36 a 42 L/min.

5 Linha 1: 1 200 ÷ 0,85 = **1 412 N**; o de 50 mm (1 178 N) não basta, e fica o de **63 mm** (1 870 N). Linha 2: 40 × 9,81 = 392 N; 392 ÷ 0,7 = **561 N**; o de 32 mm faz só 483 N, e fica o de **40 mm** (754 N). Linha 3: 150 × 9,81 × 0,35 = 515 N; 515 ÷ 0,5 = **1 030 N**: cilindro de **50 mm** (1 178 N), com fator real de 515 ÷ 1 178 = 0,44. Linha 4: 900 ÷ 0,6 = **1 500 N**, comparados com a força de recuo, pela área de recuo: o de 50 mm puxa 990 N e não serve; o de **63 mm** puxa 1 682 N e serve.

6 Com articulação traseira e carga articulada e guiada, L_k = 2 × 700 = 1 400 mm. Força crítica: π² × 210 000 × 7 854 ÷ 1 400² = **8 305 N**; admissível, 8 305 ÷ 5 = 1 661 N, menor que os 1 870 N: **não aguenta**. Para admitir 1 870 N, a força crítica tem de ser 9 350 N, e L_k = √(π² × 210 000 × 7 854 ÷ 9 350) = 1 320 mm, ou curso de cerca de **660 mm**. Alternativas: fixação rígida com carga articulada e guiada (L_k = 0,7 × 700 = 490 mm, admissível de cerca de 13 560 N); haste reforçada de 25 mm (I = 19 175 mm⁴, admissível de cerca de 4 060 N); ou trabalhar em tração.

Capítulo 9 · Atuadores especiais: giro, garras, vácuo e motores

1 **c)** O carro corre ao longo do próprio tubo.

2 **b)** Na vertical, a força útil é a de atrito da ventosa na chapa.

3 **b)** Motor a ar aceita travamento e sobrecarga.

4 **352 N.** Diferença de pressão de 0,7 bar = 7 N/cm²; 7 × 50,3 = 352 N, o peso de 36 kg em teoria. Na horizontal, com segurança 2: 352 ÷ (9,81 × 2) = **18 kg**. Em pé, a força necessária é m × g × 4 ÷ 0,5, então m = 352 × 0,5 ÷ (9,81 × 4) = **4,5 kg**. Com aceleração, menos ainda.

5 A ventosa que ficou fora da chapa está **descoberta**: aspira ar da atmosfera sem parar, e, como as quatro estão ligadas ao mesmo ejetor, o vácuo cai em todas. A força de cada ventosa é proporcional à diferença de pressão, e a 15 % de vácuo ela vale um quinto da que havia a 75 %: a chapa escorrega. Confirma-se vedando a ventosa descoberta (com um disco ou fechando a sua linha) e observando o vacuômetro voltar aos 75 %. A correção é reposicionar as ventosas para o novo formato ou instalar válvula de bloqueio em cada ventosa, de modo que uma descoberta não derrube as outras.

6 Com o torque caindo em linha reta, $n = n_{livre} \times (1 - M \div M_{partida})$. Motor A: 3 000 × (1 − 2 ÷ 4) = **1 500 rpm**, 50 % da livre, no ponto de potência máxima: 2 × 1 500 ÷ 9,55 = 314 W. Motor B: 2 400 × (1 − 2 ÷ 6) = 1 600 rpm, 67 % da livre, fora da faixa de 40 a 60 %: gira folgado, longe dos seus 377 W de máximo, e gasta ar à toa. Escolhe-se o **motor A**. Consumo: cerca de 1 m³/min por quilowatt no eixo, ou 0,31 m³/min, uns **310 L/min** de ar livre. No compressor, de 6 a 7 vezes a potência do eixo: de 1,9 a 2,2 kW para entregar 0,31 kW.

Capítulo 10 · Válvulas direcionais: vias, posições e acionamentos

1 **c)** Uma câmara: pressão, utilização e escape.

2 **c)** Sinal fraco, válvula pequena, ar da linha faz a força.

3 **a)** É uma memória: muda só com o sinal oposto.

4 **Cerca de 1 180 L/min** (984 × 1,2). A 0,4 m/s, o cilindro pede 50,3 cm² × 40 cm/s × 7 ÷ 1 000 = 14,1 L/s, ou 845 L/min; com 30 % de folga, 1 100 L/min: a válvula serve, com pouca margem. A 0,5 m/s, o pico vai a 17,6 L/s, ou 1 056 L/min, e, com a folga, a 1 370 L/min: a válvula não serve, e é preciso uma de Cv maior.

5 (a) Em repouso, 1 alimenta 2, que vai à câmara traseira, e 4 descarrega por 5: a haste **avança sozinha** assim que o ar é aberto, sem nenhum comando. (b) Energizada, 1 passa a alimentar 4 e a câmara traseira descarrega por 3: a haste **recua**. (c) Sem energia, a mola devolve a válvula ao repouso e a haste **avança** de novo, sem ordem do operador. (d) Com 1 bar, abaixo da pressão mínima de pilotagem, o piloto não comuta, a válvula fica em repouso e a haste continua avançada, com pouca força. A ligação está invertida: para o cilindro ficar recuado em repouso, a via 2 deve ir à câmara dianteira.

6 Vazão de pico: 400 ÷ 0,5 = 80 cm/s; 19,6 × 80 × 7 ÷ 1 000 = 11,0 L/s, ou **659 L/min**; com 30 % de folga, 857 L/min. A de Cv 0,6 passa 984 × 0,6 = 590 L/min e não serve; a de **Cv 1,0** passa 984 L/min e serve. Função: **5/3 de centro fechado**, que prende o ar nas duas câmaras e para a porta. A 5/2 monoestável levaria a porta a um extremo, e a 5/3 de centro em escape deixaria a carga vertical descer. Como o centro fechado não segura com exatidão (o ar é compressível e qualquer vazamento deixa o êmbolo escorregar), acrescentam-se retenções pilotadas junto ao cilindro ou um cilindro com trava de haste.

Capítulo 11 · Válvulas de fluxo, de bloqueio e de pressão

1 **b)** O ar preso do escape funciona como colchão.

2 **b)** Qualquer um dos sinais passa adiante.

3 **b)** Abre ou fecha um contato numa pressão ajustada.

4 **4,0 bar.** p = 1 250 ÷ (31,2 × 10) = 4,0 bar. Com a rede a 6 bar, a força ainda sobe até 1 870 N depois da comutação, e há folga também para baixo, porque o cilindro se desloca com cerca de 1,5 bar na câmara. Com 50 mm, o ajuste seria 1 250 ÷ 196 = **6,4 bar**, acima do que a rede oferece: a válvula nunca comutaria.

5 Causa provável: as reguladoras novas são da versão **para entrada**, e não para escape. Com a entrada estrangulada, a câmara que empurra enche devagar, a pressão vence o atrito de partida, o êmbolo salta, a pressão cai e ele para: é o movimento aos trancos. Para confirmar, leia o símbolo gravado no corpo de cada cotovelo. Um teste rápido: feche um pouco a agulha da conexão dianteira. Se ela for de escape, muda a velocidade de **avanço** (é por ali que sai o ar do avanço); se a mudança aparecer no recuo, as peças estrangulam a entrada. A solução é instalar reguladoras de escape nas duas conexões.

6 **Transferência:** 16,5 × 8 = 132 cm³/s, ou 7,9 L/min de ar comprimido; a 6 bar, são 7,9 × 7 = 55 L/min de ar livre. Então d² = 55 ÷ (6,7 × 7) = 55 ÷ 46,9 = 1,17, e d ≈ **1,1 mm**. **Furação:** 16,5 × 1,5 = 24,8 cm³/s, ou 1,49 L/min; × 7 = 10,4 L/min. d² = 10,4 ÷ 46,9 = 0,22, e d ≈ **0,47 mm**. Uma passagem de menos de meio milímetro, em que um décimo de milímetro muda muito a vazão, e uma velocidade abaixo da faixa de 20 a 30 mm/s: a regulagem pneumática fica instável. Para a furação, o avanço lento e uniforme pede um freio hidráulico em paralelo. Na transferência, escolha uma reguladora pequena, adequada ao cilindro.

Capítulo 12 · Simbologia e diagramas pneumáticos

1 a) 1.0 é o atuador; 1.1, a sua válvula de potência.

2 c) Símbolo nos sinais, traço de referência na haste.

3 a) A modificação só existe, para o próximo, se estiver no diagrama.

4 **21 componentes.** Cada dupla ação: 1 + 1 + 2 + 2 = 6; vezes 2, 12. Simples ação: 1 + 1 + 1 + 1 = 4. Alimentação e botões: 5. Circuito 3: cilindro 3A1, válvula 3V1, reguladora 3V2, fim de curso 3S1. Alimentação: unidade de conservação 0Z1, válvula de corte 0V1 e partida suave 0V2 (válvulas recebem a letra V).

5 2.0 → **2A1**, o atuador. 2.1 → **2V1**, a válvula de potência. 2.2 → **2S1**, botão de partida: final par, influi no avanço. 2.3 → **2S2**, fim de curso de recuo: final ímpar, influi no recuo. 2.01 → **2V2**, reguladora de fluxo, entre a válvula e o atuador. 0.1 → **0Z1**, unidade de conservação, na alimentação (circuito 0). Se o cilindro não recua sozinho, os suspeitos são os elementos de final ímpar do circuito 2: o fim de curso 2.3 (2S2), o seu alinhamento com a haste e o tubo que leva o sinal dele ao piloto de recuo de 2.1. A regra dos pares e ímpares não vale mais nos códigos atuais: lá, quem diz o papel é o diagrama.

6 Causa provável: os tubos de potência das vias **2 e 4** de 2V1 foram ligados trocados, na válvula ou no cilindro. Na posição inicial, 2V1 liga 1 a 2, e a via 2 agora alimenta a câmara traseira: a haste avança ao abrir o ar. O toque em 2S1 pilota 14, 2V1 liga 1 a 4, que agora vai à câmara dianteira, e a haste recua. Recuada, ela não toca 2S2, e 2V1 já está na posição de 14: novos toques em 2S1 não mudam nada. Para confirmar, feche e despressurize o circuito e compare as etiquetas nas duas pontas dos tubos ligados às vias 2 e 4 com o diagrama. É o caso típico de montagem conferida contra o desenho, mas não testada função por função.

Ficha **Defeito provocado na bancada:** Os tubos dos pilotos foram trocados: 1S1 pilota 12, posição em que 1V1 já está, e 1S2 ficou no 14. Confirma-se comparando as etiquetas dos tubos nos pilotos 14 e 12 com o diagrama.

Capítulo 13 · Circuitos básicos: comando direto, indireto e ciclo automático

1 b) No indireto, o tubo longo leva só o sinal; a potência fica junto ao cilindro.

2 c) Um OU entre os botões, e um E com a proteção.

3 a) Monoestável: sem sinal, a mola volta a válvula.

4 **15,0 ciclos por minuto, 900 peças por hora.** Avanço: 300 ÷ 150 = 2,0 s. Parada: 1,0 s. Recuo: 300 ÷ 600 = 0,5 s. Espera: 0,5 s. Ciclo: 4,0 s, e 60 ÷ 4,0 = 15,0 ciclos por minuto. O avanço toma metade do ciclo. Com avanço a 300 mm/s, ele cai para 1,0 s, o ciclo para 3,0 s e a cadência sobe para 20 ciclos por minuto: um terço a mais de produção, se o processo admitir.

5 Com a monoestável, o sinal precisa durar: **toque curto**, a haste começa a avançar e, assim que o botão é solto, a mola devolve 1V1 e a haste recua de onde estiver, sem completar o curso. **Botão mantido**, a haste avança até o fim e fica avançada enquanto ele estiver apertado; 1S2 é tocado, mas o seu sinal não vai a lugar nenhum. Ao soltar, a haste recua. O dispositivo virou um comando indireto monoestável, e o retorno automático deixou de existir. A troca só é equivalente com uma 5/2 biestável de duplo piloto.

6 Hoje: avanço 200 ÷ 80 = 2,5 s; recuo 200 ÷ 400 = 0,5 s; ciclo 2,5 + 0,6 + 0,5 + 0,9 = 4,5 s, ou 3 600 ÷ 4,5 = **800 peças por hora**. A meta pede ciclo de 3,0 s. Mesmo com espera zero, o ciclo seria 3,6 s, ou 1 000 por hora: não basta. O tempo está no avanço lento, regulado para o curso inteiro por causa de um trecho. Com aproximação rápida: 180 ÷ 300 = 0,6 s, mais 20 ÷ 80 = 0,25 s, avanço de 0,85 s. Ciclo: 0,85 + 0,6 + 0,5 + 0,9 = 2,85 s, ou 3 600 ÷ 2,85 = **1 263 peças por hora**, acima da meta. Meça o tempo de ciclo antes e depois do ajuste.

Ficha **Defeito provocado na bancada:** O fim de curso 1S2 foi deslocado além do fim do curso, e a haste não alcança o rolete: o piloto 12 nunca recebe sinal. Confirma-se, com o ar fechado, vendo a folga entre a haste avançada e o rolete.

Capítulo 14 · Lógica, memória e tempo: o circuito que decide e espera

1 b) Um E com a negação de B.

2 a) Por isso a autorretenção é preferida onde religar sozinho é perigoso.

3 c) 5 × ln(5 ÷ 2) = 4,6 s, contra 3,5 s.

4 **6,9 s e 13,9 s.** Com 6 bar: t = 10 × ln(6 ÷ 3) = 10 × 0,693 = 6,9 s. Quando a pressão de comutação é metade da do sinal, o retardo é sempre cerca de 70 % da constante de tempo. Com 4 bar: t = 10 × ln(4 ÷ 1) = 10 × 1,386 = 13,9 s, o dobro, sem ninguém mexer na agulha. Por isso o comando se alimenta com pressão regulada.

5 De cima para baixo: **1, 1, 1, 0, 0, 0**. As três primeiras linhas têm pelo menos um botão, a proteção fechada e a emergência solta: há saída. Na quarta, a proteção está aberta, e o E com P bloqueia. Na quinta, a emergência está acionada, e a válvula normalmente aberta do NÃO corta o sinal, mesmo com botão e proteção. Na sexta, nenhum botão foi apertado. No teste da máquina, as linhas que mais importam são as que **não** devem dar saída (quarta e quinta): um erro nelas faz a prensa descer com a proteção aberta ou com a emergência acionada.

6 Ajuste: τ = 5,0 ÷ ln(6 ÷ 3) = 5,0 ÷ 0,693 = **7,2 s**. A 5,5 bar: t = 7,2 × ln(5,5 ÷ 2,5) = 7,2 × 0,788 = 5,7 s. A 6,5 bar: t = 7,2 × ln(6,5 ÷ 3,5) = 7,2 × 0,619 = 4,5 s. O retardo varia de **4,5 a 5,7 s** sem ninguém mexer na agulha. Proposta: alimentar o comando por um regulador próprio, ajustado abaixo do mínimo da rede, por exemplo em 5 bar. Com o sinal constante, o novo ajuste é τ = 5,0 ÷ ln(5 ÷ 2) = 5,0 ÷ 0,916 = **5,5 s**, e o tempo deixa de depender da rede. O ajuste final se faz com cronômetro, na máquina, e se registra.

Ficha **Defeito provocado na bancada:** 1S2 foi montado só no ramo da realimentação, entre a saída e 1V2, e não em série com o piloto: 1S1 tem caminho próprio e ligar vence. Confirma-se seguindo o tubo da saída de 1V2.

Capítulo 15 · Sequências: notação, diagrama trajeto-passo e cadeia de sinais

1 b) Mais para avançar, menos para recuar, na ordem dos movimentos.

2 c) Cada movimento começa com o fim do anterior.

3 a) Cada atuador alterna mais e menos.

4 **Cadeia: partida (com c0) → A+; a1 → B+; b1 → B−; b0 → A−; a0 → C+; c1 → C−.** O último movimento do ciclo é C−, que termina em c0: essa é a condição de partida. Seis movimentos, seis sinais, cada fim de curso usado uma vez. Mas a0, que dispara C+, já está acionado na posição inicial, antes da partida: sem outra condição, C avançaria assim que o ar fosse ligado. E b0, que dispara A−, também está acionado desde o início. Sinais que existem em mais de um momento do ciclo, com significados diferentes, são o problema que os métodos de projeto resolvem.

5 Sequência: **A+ B+ B− C+ C− A−** (A prende, B fura, C escareia, A solta). Cadeia: partida, com a0 acionado → A+; a1 → B+; b1 → B−; b0 → C+; c1 → C−; c0 → A−. A condição de partida é a0, porque o último movimento, A−, termina em a0. O a1 fica acionado **das linhas 2 a 6**, durante os quatro movimentos de B e C. A linha 7 coincide com a linha 1 do ciclo seguinte. Note que b0, que dispara C+, já está acionado na posição inicial, antes da partida: é um sinal que existe em mais de um momento do ciclo.

6 **Em série:** movimentos 0,6 + 1,8 + 0,5 + 1,2 + 0,7 + 0,5 = 5,3 s; seis transições, 0,6 s; ciclo de 5,9 s, ou 3 600 ÷ 5,9 = **610 peças por hora**: não atende. **Simultânea:** em cada passo conta o mais demorado: 0,6 + 1,8 + 0,7 + 0,5 = 3,6 s; quatro transições, 0,4 s; ciclo de 4,0 s, ou **900 peças por hora**: atende, com folga de 50 peças. B+ responde por 45 % do ciclo e é o próximo alvo. Na segunda sequência, B− e C− só começam com **b1 e c1** presentes, e A− só começa com **b0 e c0**: cada passo simultâneo termina com uma condição E dos dois fins de curso.

Ficha **Defeito provocado na bancada:** Os tubos de a0 e a1 foram trocados nos pilotos da válvula de B: a0, pressionado na posição inicial, pilota B+. Com b0 solto, S fica sem ar. Confirma-se seguindo os dois tubos até os fins de curso.

Capítulo 16 · Método intuitivo e sobreposição de sinais

1 b) Dois sinais opostos na mesma válvula: sobreposição.

2 c) Nenhum sinal fica preso quando chega o oposto.

3 c) Sobreposição se resolve encurtando ou cortando o sinal.

4 **Quatro sobreposições; o método intuitivo não serve.** Cadeia: partida e a0 → A+; a1 → B+; b1 → C+; c1 → C−; c0 → B−; b0 → A−. Válvula de A: partida contra b0. Na partida, B está recuado e b0 está pressionado: 1ª sobreposição. Válvula de B: a1 contra c0. Quando a1 pede B+, C está recuado sobre c0: 2ª. Quando c0 pede B−, A continua avançado sobre a1: 3ª. Válvula de C: b1 contra c1. Quando c1 pede C−, B continua avançado sobre b1: 4ª. A regra das letras vizinhas só aponta C+ C− e A− A+; as duas da válvula de B aparecem na tabela de sinais. Com três ou mais sobreposições, passa-se a um método sistemático (cascata ou passo a passo).

5 **Pulso de a1 curto demais.** A 400 mm/s, o pulso dura 8 ÷ 400 = 0,020 s = 20 ms, abaixo dos 30 ms que a válvula de B exige: às vezes ela não comuta, e B não avança. Antes, eram 8 ÷ 150 = 0,053 s = 53 ms, com folga. A causa provável é a reguladora de fluxo de A aberta na manutenção. Confirma-se cronometrando o curso e observando, com um manômetro ou indicador no piloto 14 da válvula de B, o pulso que chega. A velocidade máxima é 8 ÷ 0,030 = 267 mm/s; com folga de 30 %, cerca de 205 mm/s. Fecha-se a reguladora até ficar abaixo disso e registra-se o ajuste. Não adianta trocar a válvula.

6 Cadeia: partida e b0 → A+; a1 → B+; b1 → A−; a0 → C+; c1 → C−; c0 → B−. **A:** não, não (quando b1 pede A−, B está avançado e b0 está livre). **B:** a1 | c0 | sim: quando a1 pede B+, C está recuado sobre c0 | não: quando c0 pede B−, A já recuou e a1 está livre. **C:** a0 | c1 | não | sim: quando c1 pede C−, A continua recuado sobre a0. **Duas sobreposições.** As letras vizinhas só mostram a de C+ C−; a de B+ só aparece na tabela. Com duas sobreposições, o método intuitivo ainda é possível, com c0 e a0 trocados por roletes escamoteáveis acionados no recuo, ou com formadores de pulso, verificando velocidades e paradas no meio do ciclo. Com exigência de confiabilidade, a cascata é mais segura.

Ficha **Defeito provocado na bancada:** Os tubos de a0 e a1 foram trocados nos pilotos da válvula de B: a0, pressionado na posição inicial, pilota B+. Confirma-se seguindo os tubos ou com o manômetro no piloto 14 de B, que tem pressão com A recuado.

Capítulo 17 · Método cascata: um grupo de movimentos de cada vez

1 b) Nenhuma letra duas vezes no mesmo grupo.

2 a) O último sinal do grupo muda o grupo.

3 b) O ciclo termina na última linha, e é dela que parte o novo.

4 **12 válvulas.** A divisão é A+ B+ | B− C+ | C− A−: o último grupo tem A, como o primeiro, e os dois não se unem. São três grupos, três linhas e duas memórias. Soma: 3 de potência + 6 fins de curso + 2 memórias + 1 botão = 12. O fim de curso c1 encerra o último movimento do grupo II (C+): é alimentado pela linha II e comanda a troca para o grupo III, comutando a segunda memória. Pelo método passo a passo, com uma memória por passo, seriam 6 memórias e 16 válvulas.

5 **Parou depois de C−, no início do grupo II.** No grupo I, A+ saiu direto da linha I, a1 comandou B+, b1 comandou C+, e c1 comutou a memória para a linha II. Ali, C− saiu direto da linha, e C recuou. O movimento seguinte, B−, é comandado por c0, alimentado pela linha II. Não há sobreposição na válvula de B: o sinal de B+ vem de a1, alimentado pela linha I, que está sem ar. A verificação, em ordem: se o ressalto de C pressiona de fato o rolete de c0; se há pressão na entrada de c0 (tubo vindo da linha II); se o sinal chega ao piloto de B−; só então a válvula de B. Trocar a memória não faria sentido: a linha II pressurizada mostra que ela comutou.

6 **Dois grupos, uma memória, 11 válvulas.** A divisão direta dá A+ B+ | B− A− C+ | C−. O último grupo, C−, não repete letras do primeiro (A e B), e os dois se unem: grupo I = C− A+ B+; grupo II = B− A− C+. Duas linhas, uma memória: 3 de potência + 6 fins de curso + 1 memória + 1 botão = 11 válvulas, uma a menos que com três grupos. Grupo I: C− sai direto da linha I; c0, em série com a partida e alimentado pela linha I, comanda A+; a1 comanda B+; b1 troca para a linha II. Grupo II: B− sai direto da linha II; b0 comanda A−; a0 comanda C+; c1 troca para a linha I. Pronta a máquina, a linha I tem ar, e a partida espera em série com c0.

Ficha **Defeito provocado na bancada:** O fim de curso b0 foi alimentado pela rede, e não pela linha II: pressionado com B recuado, mantém sinal no piloto 12 de A. Confirma-se com o manômetro na entrada de b0, pressurizada mesmo com a linha II vazia.

Capítulo 18 · Método passo a passo: uma memória para cada passo

1 a) Passo anterior ativo E condição cumprida.

2 b) Cada memória mostra o passo em que a máquina está.

3 a) A condição de cada passo é o intertravamento: não se pula.

4 **Passo 3:** ligado pela memória 2 e por b1; comanda B−; é desligado pela memória 4. Ao ligar, a memória 3 desliga a 2, que mantinha o sinal em B+: o piloto oposto fica livre, e B recua. O sinal de a1 só serviu para ligar a memória 2, um passo atrás, e já não chega a nenhum piloto de potência. **Oito passos, quatro grupos:** cascata, 4 − 1 = 3 memórias, em série, no limite do método; mínimo, uma por grupo, 4, em paralelo; máximo, uma por passo, 8. Total de 15. Com quatro cilindros e oito fins de curso, o comando máximo passaria de vinte válvulas: é o tamanho em que um controlador pequeno passa a ser a escolha natural.

5 Passo 2: memória 1 e a1 | B+ | memória 3. Passo 3: memória 2 e b1 | C+ | memória 4. Passo 4: memória 3 e c1 | C− | memória 5. Passo 5: memória 4 e c0 | B− | memória 6. Passo 6: memória 5 e b0 | A− | memória 1. Cada passo é ligado pelo anterior junto com o fim de curso do movimento anterior, e desligado pelo seguinte; o anel se fecha porque a memória 6 habilita o passo 1, e a 1 desliga a 6. Válvulas: **3 de potência + 6 fins de curso + 6 memórias + 1 botão = 16.** Pela cascata, a mesma sequência pede uma só memória, e 11 válvulas: o passo a passo custa mais, em troca de módulos iguais e do passo ativo visível.

6 **O tê liga a saída da memória 2 à saída da memória 4, que está desligada e, portanto, em escape.** Uma memória 3/2 desligada tem a saída ligada ao escape: o ar que a memória 2 manda para o piloto de B+ sai pelo escape da memória 4, daí o sopro e a pressão quase nula. Sem pressão no piloto, B não avança, e a sequência para no passo 2. Confirma-se fechando o ar, despressurizando e conferindo o componente no ponto de união; com o ar aberto, o sopro no escape da memória 4 só existe enquanto a 2 está ligada. A alternadora (função OU) deixa passar o sinal que chega por uma entrada e fecha a outra, isolando a memória desligada. Com o tê, falhariam tanto o primeiro quanto o segundo golpe.

Ficha **Defeito provocado na bancada:** O fim de curso a1 foi alimentado pela rede, e não pela saída da memória 1: com A avançado, mantém ligada a memória 2. Confirma-se com o manômetro na entrada de a1, que tem pressão com a memória 1 desligada.

Capítulo 19 · Projeto e segurança: sem ar, na emergência e com a mão dentro

1 b) A válvula de bloqueio prende o ar nas câmaras na falta de pilotagem.

2 c) Freio que depende de ar mantido não é estado seguro.

3 a) Nunca apontar ar comprimido para o corpo, nem para limpar a roupa.

4 **Cerca de 460 kJ.** Pressão absoluta: 9 + 1 = 10 bar = 1 000 000 Pa. Volume: 0,2 m³. E = 1 000 000 × 0,2 × ln(10) = 200 000 × 2,30 = 460 000 J. É a energia para erguer uma tonelada a 47 m, mais de cinco vezes a do reservatório de 50 L do exemplo, e continua lá depois que o compressor é desligado e o registro da rede é fechado: antes de qualquer serviço, o reservatório precisa ser descarregado.

5 Força teórica necessária: 120 ÷ 0,5 = 240 N. Áreas: 20 mm, 3,14 cm²; 25 mm, 4,91 cm²; 32 mm, 8,04 cm². A 20 mm, nem 6 bar bastam (3,14 × 60 = 188 N). **A escolha é 25 mm a 5 bar: 4,91 × 50 = 245 N.** A 32 mm, mesmo a 4 bar dariam 322 N, mais força que o necessário. Hoje: 19,63 cm² × 60 N/cm² = 1 178 N, quase cinco vezes mais. O consumo por ciclo segue área × pressão absoluta: (4,91 × 6) ÷ (19,63 × 7) = 29,5 ÷ 137,4 = 0,21, cerca de um quinto. A força menor vem do diâmetro, que ninguém reabre como um regulador; a pressão de 5 bar deve ficar travada e registrada.

6 **A 5/3 de centro fechado prendeu ar nas duas câmaras.** O manômetro da unidade de conservação mede só a entrada: fechado o registro, ele vai a zero, mas o cilindro continua carregado. A câmara dianteira, sob pressão, sustentava a ferramenta; solto o tubo, essa sustentação desapareceu, e o peso, somado ao ar preso na câmara traseira, fez a ferramenta descer. É a energia residual. O procedimento de bloqueio falhou em duas etapas: a carga suspensa não foi apoiada ou travada antes da intervenção, e o alívio da energia residual não foi verificado (manômetros nas câmaras em zero, hastes sem força). O projeto deveria prever pontos de descarga das câmaras com manômetro, a posição de manutenção definida e uma trava mecânica da haste ou um calço obrigatório.

Ficha **Defeito provocado na bancada:** A válvula de simultaneidade 1V2 foi trocada por uma alternadora, função OU, de aparência parecida. Confirma-se lendo o símbolo gravado no corpo e testando a válvula com sinal em uma só entrada.

Capítulo 20 · Manutenção, diagnóstico e eficiência energética

1 b) Do mais simples e comum para o mais trabalhoso.

2 c) Se o manual funciona, o problema é o sinal que deveria chegar à válvula.

3 c) Intervalos de lubrificação alongados demais.

4 **Cerca de R$ 73 500 por ano, dos quais R$ 44 100 podem ser economizados.** Com a fábrica parada, toda a vazão medida é vazamento. Potência gasta com ele: 2,5 × 7 = 17,5 kW. Energia anual: 17,5 × 6 000 = 105 000 kWh; em reais, 105 000 × 0,70 = R$ 73 500. Reduzido a 1 m³/min, deixam de ser gastos 1,5 × 7 = 10,5 kW, ou 10,5 × 6 000 × 0,70 = R$ 44 100 por ano. A conta considera só as horas de operação: se a rede fica pressurizada fora delas, o desperdício é maior. E nenhum equipamento novo foi comprado: bastou medir e consertar.

5 **Filtro da unidade de conservação saturado, provavelmente com água acumulada.** Parado, sem vazão, não há queda de pressão, e o regulador mostra 6 bar; no avanço, a vazão atravessa o elemento entupido e a pressão cai para 3,8 bar, ou 63 % de 6 bar: a força cai na mesma proporção, e o enchimento lento deixa o avanço lento. Confirma-se medindo a pressão antes e depois do filtro durante o avanço, olhando o indicador do filtro e abrindo o dreno, que deve soltar água. Corrige-se drenando, trocando o elemento filtrante e restabelecendo a rotina diária. Não se deve subir a pressão da rede para compensar: a prensa voltaria, e todas as outras máquinas passariam a gastar mais.

6 **Custo atual de R$ 58 800 por ano; economia de R$ 39 200; retorno em pouco mais de 120 horas de operação.** Vazão com os quatro ligados: 4 × 1,5 = 6 m³/min; média, a 50 %: 3 m³/min. Potência: 3 × 7 = 21 kW. Energia: 21 × 4 000 = 84 000 kWh, ou 84 000 × 0,70 = R$ 58 800. Com bicos, o consumo cai a um terço, e economizam-se dois terços: R$ 39 200 por ano. Investimento: 4 × 300 = R$ 1 200. Retorno: 1 200 ÷ 39 200 = 0,031 ano, ou 0,031 × 4 000 = 122 horas. O passo seguinte é perguntar se o sopro precisa ficar ligado sem produto na frente: comandá-lo por um sensor reduziria ainda mais o consumo.

ANOTAÇÕES

Formulário

As fórmulas da disciplina, com as unidades e o capítulo onde cada uma é explicada, as conversões mais usadas e os símbolos dos diagramas. Pensado para ficar à mão na bancada e nas provas.

Pressão e força

Grandeza	Fórmula	Unidades e observação	Cap.
Pressão	$p = \frac{F}{A}$ $F = p \cdot A$	1 bar = 10 N/cm². Com p em bar e A em cm², F = 10 · p · A, em N	1
Pressão absoluta	$p_{abs} = p_{man} + 1$	bar; nas leis dos gases e nas contas de consumo	1
Força de avanço	$F_{av} = p \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}$	D: diâmetro do êmbolo	8
Força de recuo	$F_{rec} = p \cdot \frac{\pi \cdot (D^2 - d^2)}{4}$	d: diâmetro da haste	8
Força teórica necessária	$F_{teórica} = \frac{F_{carga}}{\eta}$	η, fator de carga: 0,7 lento, 0,5 a 0,6 normal, 0,3 a 0,5 rápido	8
Flambagem (Euler)	$F_k = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{L_k^2}$ $I = \frac{\pi \cdot d^4}{64}$ $F_{adm} = \frac{F_k}{S}$	E = 210 000 N/mm² (aço); S de 3,5 a 5	8
Força na válvula de sequência	$F = p_{ajuste} \cdot A$	pressão de comutação vezes a área do êmbolo	11

Gases, reservatório e consumo

Grandeza	Fórmula	Unidades e observação	Cap.
Lei de Boyle	$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$	temperatura constante, pressões absolutas	2
Lei geral dos gases	$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2}$	T em kelvin: °C + 273	2
Ar útil do reservatório	$V_{útil} = V_{res} \cdot \frac{p_{máx} - p_{mín}}{p_{atm}}$ $t = \frac{V_{útil}}{Q}$	volume de ar livre e tempo de autonomia	2
Consumo do cilindro	$V_{ciclo} = (A_{av} + A_{rec}) \cdot s \cdot (p + 1)$ $Q = V_{ciclo} \cdot n$	áreas em cm², curso em cm: ÷ 1 000 dá litros	8
Vazão por um orifício	$Q \approx 6{,}7 \cdot d^2 \cdot (p + 1)$	L/min de ar livre; d em mm, p em bar	11
Vazamento (ciclo de carga)	$Q_{vaz} = Q_{comp} \cdot \frac{t_{carga}}{t_{carga} + t_{alívio}}$	medido com a fábrica parada e a rede pressurizada	5

Energia, rede e tempo

Grandeza	Fórmula	Unidades e observação	Cap.
Potência do compressor	$P \approx e \cdot Q$	e de 5,5 a 7,5 kW por m³/min a 7 bar	3
Secador por refrigeração	$Q_{nominal} = \frac{Q_{real}}{f_{pressão} \cdot f_{entrada} \cdot f_{ambiente}}$	fatores de correção do catálogo	4
Queda de pressão no tubo	$\Delta p = \frac{450 \cdot Q^{1{,}85} \cdot L}{d^5 \cdot p}$	Q em L/s, L em m, d em mm, p absoluta em bar; Δp em bar	5

Tabela (continuação)

Grandeza	Fórmula	Unidades e observação	Cap.
Energia no amortecimento	$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$	J; m em kg, v em m/s	7
Energia no giro	$E = \frac{J \cdot \omega^2}{2}$ $\omega \approx \frac{2 \cdot \theta}{t}$	J em kg·m², θ em rad	9
Tempo de retardo	$t = \tau \cdot \ln \frac{p_s}{p_s - p_c}$	modelo simplificado do temporizador	14
Pulso do rolete escamoteável	$t_{pulso} = \frac{L}{v}$	L: trecho do ressalto; v: velocidade da haste	16
Energia guardada no ar	$E = p \cdot V \cdot \ln \frac{p}{p_{atm}}$	p absoluta em Pa, V em m³: E em J	19
Tempo de ciclo e cadência	$t_{ciclo} = t_{av} + t_{parada} + t_{rec} + t_{espera}$ $n = \frac{60}{t_{ciclo}}$	ciclos por minuto	13

Conversões

1 bar	100 000 Pa = 100 kPa = 0,1 MPa
1 bar	10 N/cm² ≈ 1,02 kgf/cm²
1 psi	6 895 Pa ≈ 0,069 bar
1 atm	101 325 Pa ≈ 1,013 bar
1 m³	1 000 L
1 L/s	60 L/min = 0,06 m³/min
1 kWh	3 600 000 J
0 °C	273 K
1 cfm	28,3 L/min

Símbolos dos diagramas (ISO 1219-1)


Fonte de pressão

Escape


Linha de trabalho e de pilotagem


Unidade de conservação


Cilindro de simples ação


Cilindro de dupla ação


Válvula 3/2 NF, botão e mola


Válvula 3/2 NA, rolete e mola


Válvula 5/2, duplo piloto


Válvula 5/3, centro fechado


Reguladora de fluxo unidirecional


Retenção


Alternadora (OU)


Simultaneidade (E)


Escape rápido


Acionamentos: botão, alavanca, pedal


Acionamentos: rolete, piloto, solenoide


Mola e trava (detente)

ANOTAÇÕES

Glossário

Os termos técnicos da disciplina, em ordem alfabética, com o sentido em que são usados neste material.

Amortecimento	Freio de ar no fim do curso do cilindro: um colar no êmbolo fecha a saída principal e o ar restante escapa por um parafuso regulável.
Ar livre	Volume de ar medido na pressão atmosférica. É a unidade em que se mede a capacidade do compressor e o consumo das máquinas (L/min ou m³/min de ar livre).
Atuador	Componente que transforma a energia do ar em movimento: cilindro (linear), atuador giratório ou motor pneumático (rotativo).
Bar	Unidade de pressão: 1 bar = 100 000 Pa = 100 kPa, aproximadamente a pressão atmosférica ao nível do mar.
Bimanual	Comando que só libera o movimento perigoso quando os dois botões são acionados quase ao mesmo tempo (até 0,5 s), mantendo as duas mãos fora da zona de risco.
Cascata	Método de projeto de comandos sequenciais que divide a sequência em grupos e alimenta só uma linha de ar por vez, eliminando os sinais bloqueantes.
Cilindro de dupla ação	Cilindro em que o ar faz os dois movimentos, avanço e recuo, por duas conexões.
Cilindro de simples ação	Cilindro em que o ar faz só um movimento; o retorno é feito por mola ou por força externa.
Comando direto	Circuito em que a válvula acionada pelo operador alimenta diretamente o cilindro.
Comando indireto	Circuito em que a válvula do operador só envia um sinal de pilotagem a uma válvula de potência, que alimenta o cilindro.
Compressor	Máquina que aspira ar atmosférico e o entrega em pressão maior. Pode ser de deslocamento (pistão, parafuso, palhetas) ou dinâmico (centrífugo).
Condensado	Água (com óleo e partículas) que se separa do ar comprimido quando ele esfria. Precisa ser drenada em todos os pontos baixos da rede.
Diagrama trajeto-passo	Gráfico que mostra a posição de cada atuador em cada passo da sequência; base para ler e projetar comandos sequenciais.
Dreno	Dispositivo que retira o condensado: manual, temporizado, de boia ou eletrônico por nível.
Escamoteável	Fim de curso com rolete articulado que só dá sinal ao ser atropelado em um sentido; usado para eliminar sinais bloqueantes.
Escape rápido	Válvula montada junto ao cilindro que descarrega o ar direto para a atmosfera, aumentando a velocidade de retorno.
Fator de carga	Razão entre a força exigida pela carga e a força teórica do cilindro; reserva força para acelerar e vencer a contrapressão.
Fim de curso	Válvula (ou sensor) acionada pelo próprio movimento da máquina, que informa ao comando que o atuador chegou a uma posição.
Flambagem	Curvatura súbita, de lado, de uma haste longa e fina sob compressão, com força bem menor que a resistência do aço.
Lubrificador	Elemento da unidade de conservação que dosa névoa de óleo no ar; dispensável em componentes lubrificados de fábrica.
Memória (válvula)	Válvula 5/2 de duplo piloto e sem mola: mantém a última posição comandada mesmo depois que o sinal desaparece.

Módulo de passo	Bloco lógico (memória mais E) que compõe uma cadeia em que cada passo só é ativado depois que o anterior foi confirmado.
Orvalho, ponto de	Temperatura em que a umidade do ar comprimido começa a condensar. Secadores são especificados pelo ponto de orvalho sob pressão.
Perda de carga	Queda de pressão do ar ao atravessar tubos, curvas, conexões e componentes.
Pilotagem	Acionamento de uma válvula por um sinal de ar (piloto), em vez de botão, rolete ou solenoide.
Pressão absoluta	Pressão medida a partir do vácuo total: pressão manométrica mais a atmosférica (cerca de 1 bar).
Pressão manométrica	Pressão indicada pelo manômetro, medida a partir da atmosférica.
Purgador	Dreno automático de condensado; o de boia abre a saída quando o nível de água sobe.
Regulador de pressão	Válvula que mantém a pressão de saída constante, abaixo da pressão da rede, independentemente das variações de entrada.
Reguladora de fluxo	Válvula de agulha com retenção que estrangula o ar em um sentido e o deixa livre no outro; controla a velocidade do atuador.
Reservatório	Vaso de pressão que acumula ar, amortece pulsações, separa condensado e reduz o número de partidas do compressor. Regido pela NR-13.
Retenção	Válvula que deixa o ar passar em um só sentido.
Secador	Equipamento que retira umidade do ar: por refrigeração (ponto de orvalho de cerca de +3 °C) ou por adsorção (até −40 °C ou menos).
Sinal bloqueante	Sinal de fim de curso que permanece ativo quando a válvula que ele pilota já precisa mudar de posição; trava a sequência.
Sobreposição de sinais	Situação em que os dois pilotos de uma válvula de memória recebem ar ao mesmo tempo.
Temporizador pneumático	Conjunto de reguladora de fluxo, volume e válvula 3/2: o sinal de saída aparece um tempo ajustável depois do sinal de entrada.
Unidade de conservação	Conjunto filtro, regulador (com manômetro) e, quando necessário, lubrificador, instalado na entrada de cada máquina.
Vazamento	Perda de ar por conexões, mangueiras, vedações e válvulas. Em fábricas sem programa de manutenção, chega a 20 % ou 30 % de todo o ar produzido.
Vazão	Volume de ar que passa por unidade de tempo; em pneumática, normalmente expressa em ar livre (L/min ou m^3/min).
Válvula direcional	Válvula que define por onde o ar passa. É identificada por vias e posições: 3/2, 5/2, 5/3.
Válvula E (simultaneidade)	Válvula de duas entradas que só dá saída quando as duas recebem ar.
Válvula OU (alternadora)	Válvula de duas entradas que dá saída quando qualquer uma delas recebe ar.

ANOTAÇÕES

Referências

Livros e manuais técnicos

BOLLMANN, A. **Fundamentos da automação industrial pneutrônica**. São Paulo: ABHP, 1997.

FIALHO, A. B. **Automação pneumática: projetos, dimensionamento e análise de circuitos**. São Paulo: Érica, 2003.

FESTO DIDACTIC. **Introdução a sistemas pneumáticos**. São Paulo: Festo Automação, 2000.

PARKER HANNIFIN. **Tecnologia pneumática industrial**. Apostila M1001 BR. Jacareí: Parker Training, 2001.

STEWART, H. L. **Pneumática e hidráulica**. 3. ed. São Paulo: Hemus, 2014.

BONACORSO, N. G.; NOLL, V. **Automação eletropneumática**. São Paulo: Érica, 1997.

ATLAS COPCO. **Compressed air manual**. 8. ed. Wilrijk: Atlas Copco Airpower, 2015.

Normas técnicas

ISO 1219-1:2012. **Fluid power systems and components: graphical symbols and circuit diagrams. Part 1: graphical symbols**.

ISO 1219-2:2012. **Fluid power systems and components: graphical symbols and circuit diagrams. Part 2: circuit diagrams**.

ISO 4414:2010. **Pneumatic fluid power: general rules and safety requirements for systems and their components**.

ISO 5599-3. **Pneumatic fluid power: five-port directional control valves. Part 3: code system for communication of valve functions**.

ISO 8573-1:2010. **Compressed air. Part 1: contaminants and purity classes**.

ISO 13849-1:2023. **Safety of machinery: safety-related parts of control systems. Part 1: general principles for design**.

ISO 15552:2018. **Pneumatic fluid power: cylinders with detachable mountings, 1 000 kPa (10 bar) series, bores from 32 mm to 320 mm**.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR-12: segurança no trabalho em máquinas e equipamentos**. Brasília: MTE, texto vigente.

BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR-13: caldeiras, vasos de pressão, tubulações e tanques metálicos de armazenamento**. Brasília: MTE, texto vigente.

Fontes dos casos reais, por capítulo

Capítulo 1. Britannica, Mount Cenis Tunnel (perfuratriz de ar comprimido de Sommeiller); Wikipedia (inglês), Fréjus Rail Tunnel: obras de agosto de 1857, abertura em 17/09/1871; Grace's Guide to British Industrial History, G. Sommeillier; Wikipedia (inglês), Paris compressed air network: Popp, 5 a 6 bar, mais de 900 km de rede, fim em 1994; SUDAC, Histoire de la Sudac (1877–1996).

Capítulo 2. Grace's Guide to British Industrial History, Jacques Triger e Triger Process (data de 1839 a 1841); Wikipedia (inglês), Jacques Triger; Lewis and Clark Trust, Girandoni Air Rifle (pesquisa sobre a arma da expedição, 1803 a 1806); NRA Family, Throwback Thursday: Lewis and Clark's Air Rifle.

Capítulo 3. Roots, Roots celebrates 170 years of blower and compressor innovation (rootsblower.com); Historical Marker Database, marcador de Connersville sobre o soprador Roots (1854); Google Patents, US 23267 (roda d'água, 15/03/1859, reemitida em 28/02/1860); ASCE, Hoosac Tunnel (marco histórico: perfuratriz Burleigh a ar comprimido e nitroglicerina); Structurae, Hoosac Tunnel.

Capítulo 4. Wikipedia (inglês), Mekarski system e Nantes tramway: bondes a ar comprimido em Nantes de 1879 a 1917; Grace's Guide to British Industrial History, L. Mekarski; Chemistry World, Skarstrom's separator (laboratório da Esso junto à refinaria de Bayway, em Linden); Compressed Air Best Practices, Heatless compressed air desiccant dryer calculation principles (origem do secador sem calor); Patente US 2 944 627, C. W. Skarstrom, concedida em 1960.

Capítulo 5. OSHA, Hazard Information Bulletin de 20/05/1988: uso de tubo de PVC em instalações aéreas de ar comprimido (casos no Texas); OSHA, Hazard Information Bulletin de 13/12/1990 (atualização sobre tubos termoplásticos); Grace's Guide to British Industrial History, Atmospheric Railway; Newton Abbot Town & GWR Museum, Atmospheric Railway (operação de setembro de 1847 a setembro de 1848; válvula de couro).

Capítulo 6. Lemelson-MIT, Jacques-Yves Cousteau and Emile Gagnan; Cousteau Society, Cousteau's Aqua Lung (primeiro mergulho em junho de 1943, perto de Bandol); Wikipedia (inglês), Aqua-Lung e Émile Gagnan (encontro em dezembro de 1942; regulador derivado de um redutor de gás para carros); Bimba (atual dona da marca), History: primeiro lubrificador de linha esboçado por Carl Norgren em 1925, para ferramentas a ar; Colorado Business Hall of Fame, Carl A. Norgren.

Capítulo 7. nycsubway.org, Beach Pneumatic Transit (túnel feito em 58 dias, aberto em 26/02/1870); Scientific American, The First Subway in New York City Was a Cylindrical Car Pushed by Air; A. E. Beach, The Pneumatic Tunnel Under Broadway, Scientific American, 05/03/1870, p. 154; Festo, History of Festo (fundação em 1925 como Fezer & Stoll; primeiros produtos pneumáticos em 1955); Deutsche Biographie, Stoll, Gottlieb.

Capítulo 8. ASME, Simon Ingersoll (biografia, patente básica da perfuratriz em 1871 e montagem em tripé); Google Patents, US 112254, Improvement in rock-drills, S. Ingersoll, 1871; National Mining Hall of Fame, John George Leyner (perfuratriz a ar de 1897 e versão com água); ASME, John George Leyner (broca oca com água e ar; proibição da perfuração a seco); Grace's Guide to British Industrial History, Pneumatic Despatch Co; Wikipedia (inglês), London Pneumatic Despatch Company: fundação em 1859, linha de Euston em 20/02/1863, fim em 1874.

Capítulo 9. Make:, Joseph McKibben and the air muscle (a filha, Karan, com poliomielite em 1952); Wikipedia (inglês), Pneumatic artificial muscles (origem do músculo de McKibben, 1957, no Rancho Los Amigos, em Downey); Virtual Dental Museum (Universidade do Pacífico), A dynamic decade: speeding up the handpiece (patente do Airotor em 1957); Stony Brook University Libraries, Borden Air Turbine High-Speed Handpiece; Spear Education, Facts and figures: the high-speed handpiece.

Capítulo 10. Britannica, verbete sobre George Westinghouse e o freio a ar (patente de 1869; lei de segurança ferroviária de 1893); American-Rails.com, Westinghouse air brake (válvula tríplice e freio automático, por volta de 1872); HowStuffWorks, Railroad expansion (adoção obrigatória a partir de 1893); Wikipedia (inglês), Barker lever e Charles S. Barker (patente francesa de 1839; órgão de Saint-Denis inaugurado em 21/09/1841); Britannica, Barker lever.

Capítulo 11. Google Patents, US 228776, Door-check, L. C. Norton, Boston, 15/06/1880; Allegion (LCN), LCN brand history (primeiro fecha-portas na Trinity Church de Boston); I Dig Hardware, The rector wanted it quiet; Wikipedia (inglês), August Schrader (válvula de 1891; patente de George Schrader em 1893); Schrader, Schrader history (schradertpms.com).

Capítulo 12. Industrial Monitor Direct, JIC Industrial Control Standards: historical reference vs NFPA 79 (normas JIC para máquinas-ferramenta com revisões em 1944, 1956 e 1967; fonte secundária); ISO 1219:1976, primeira edição da norma internacional de símbolos para sistemas hidráulicos e pneumáticos; CBC News, Sudbury General Hospital gas deaths, 1973 (inquérito de 23 mortes; ao menos 9 atribuídas à troca das linhas de gás); Time, Medicine: Breath of Death; Toronto Public Library, arquivo digital do Toronto Star (fotos do inquérito de 1974).

Capítulo 13. Wikipedia (inglês), London Underground 1920 Stock (primeiros carros projetados com portas a ar) e

London Underground Standard Stock (série de 1923); London Transport Museum, registro fotográfico 1998-70054 (posto do guarda num carro convertido para portas a ar, 1920 a 1923); Detroit Historical Society, Charles B. King (martelo pneumático premiado na Exposição de Chicago de 1893); Patente US 513 941, C. B. King, ferramenta pneumática, 30/01/1894.

Capítulo 14. Wikipedia (inglês), Fluidics (Harry Diamond Laboratories, 1959); Google Patents, US 3 024 805, Negative feedback fluid amplifier (pedidos de Horton, Bowles e Warren, 1959 e 1960); Pianola Institute, Edwin Votey, inventor of the Pianola (primeira pianola em Detroit, 1895); Wikipedia (inglês), Aeolian Company (marca Pianola usada a partir de janeiro de 1898, em Nova York).

Capítulo 15. ASME, Landmark #86: Owens AR Bottle Machine (primeira máquina de garrafas totalmente automática, 1903, Toledo); Invention & Technology, landmark do Owens AR; AFNOR, NF C03-190 (1982): Diagramme fonctionnel GRAFCET (origem no grupo da AFCET, relatório de 1977); IEC 60848:2013. GRAFCET specification language for sequential function charts. Genebra: IEC, 2013.

Capítulo 16. NIOSH e OSHA, Nail Gun Safety: A Guide for Construction Contractors, 2011 (NIOSH 2011-202): risco cerca de duas vezes maior com gatilho de contato; NIOSH Science Blog, The New ANSI Nail Gun Standard is a Lost Opportunity for Safety; The Henry Ford, First Tri-Color, Four-Directional Traffic Signal, 1920 (William Potts, Detroit); Wikipedia (inglês), William Potts (inventor).

Capítulo 17. Wikipedia (inglês), Thorpe rail accident (colisão em via única perto de Norwich, 10/09/1874); Wikipedia (inglês), Tyer's Electric Train Tablet (sistema patenteado por Edward Tyer em 1878); Musée d'art et d'histoire de Neuchâtel, autômatos Jaquet-Droz (O escritor, 1774); Wikipedia (inglês), Jaquet-Droz automata.

Capítulo 18. Wikipedia (inglês), Almon Brown Strowger (seletor automático; central de La Porte, Indiana, 1892); Patente US 447 918, A. B. Strowger, Automatic telephone-exchange, 1891; World Nuclear Association, Sequence of Events: Chernobyl Accident, Appendix 1 (ensaio tratado como parte não nuclear; programa previa desligar o resfriamento de emergência); IAEA, INSAG-7: The Chernobyl Accident: Updating of INSAG-1, Safety Series 75, 1992.

Capítulo 19. Transportation Safety Board of Canada, Railway Investigation Report R13D0054 (Lac-Mégantic, 06/07/2013: 47 mortes; freios manuais insuficientes); Wikipedia (inglês), Lac-Mégantic rail disaster; Wikipedia (inglês), Byford Dolphin (acidente de 05/11/1983, câmara a cerca de 9 atmosferas).

Capítulo 20. NTSB, Aircraft Accident Report AAR-02/01: Alaska Airlines voo 261, 31/01/2000 (desgaste da porca do fuso por lubrificação insuficiente); Wikipedia (inglês), Alaska Airlines Flight 261; U.S. Department of Energy, Assessment of the Market for Compressed Air Efficiency Services, 2001; U.S. Department of Energy e Compressed Air Challenge, Improving Compressed Air System Performance: A Sourcebook for Industry, 2003.

ANOTAÇÕES

Índice remissivo

Os termos técnicos e as páginas em que eles são explicados ou usados. A página em negrito é a do capítulo em que o termo é apresentado.

A

acionamento manual auxiliar **135**
alternadora **65**, 67, 81, 82
amortecimento pneumático regulável **42**
ar de má qualidade **133**, 137
autorretenção **87**, 89, 120, 121
aço carbono **30**, 32
alumínio modular **30**, 32
amplificador **88**, 91, 136
ar livre 10, **11**, 12, 17
acoplamento flutuante **42**
amortecedor hidráulico externo **42**, 53
anel 29, 30, **119**, 121
área de recuo **46**

B

biestável **60**, 63, 75, 78
bucha de guia **40**, 44
bloco bimanual 68, **125**, 128
bloqueio 30, 35, **88**

C

cadeado e etiqueta **127**
camisa **40**, 41, 133
carretel **58**, 61, 67, 110
chave com trava **82**, 84
cilindro tandem **53**
comando direto 60, 61, **80**, 81
comando por tempo **97**
compressor de parafuso **17**, 18
comprimento equivalente **31**, 32
contador **91**, 92
cadeia de sinais **95**, 97, 107
carga e alívio **19**, 21
carvão ativado **24**, 27, 36
ciclo contínuo **80**, 82, 91, 120
coalescente **26**, 27, 36
comando indireto **80**, 81
comando por trajeto **97**
compressor de pistão **18**, 21
condensado **11**, 13, 23, 24
cadência **80**, 84, 96, 126
carga lateral 40, 41, **133**, 134
centro fechado **59**, 60, 68, 126
cilindro sem haste 48, **53**, 56
coeficiente de atrito **46**
comando manual auxiliar **61**
componentes de segurança 82, **125**, 128
comprimento de flambagem **45**, 47
constante de tempo **90**, 92

D

descidas **29**, 32
detector ultrassônico **31**, 32, 135
diagrama de movimentos **75**
diagrama trajeto-tempo **98**, 99
dupla ação **40**, 41, 46, 50
desenho de disposição **75**
diafragma **35**, 36
diagrama funcional **95**, 98
dois estágios **13**, 15, 18, 91
deslocamento positivo **17**
diagrama de comando **98**, 102, 104
diagrama trajeto-passo **95**, 97
dreno 11, 15, **35**, 36

E

efeito Venturi **37**, 54
eletropneumática **6**, 9, 120, 121
escape rápido **65**, 67, 74, 80
estranguladora **65**
ejetor 36, **54**, 55
energia específica **8**
espaço morto **18**, 21
elemento filtrante **36**, 38
energia residual **125**, 127
estado seguro 106, **125**, 126

F

fator de carga 39, **45**, 46, 126
fim de curso 40, 68, **74**, 75
força teórica 9, 10, **45**, 46
função E 64, 67, **119**, 120
fator de uso **20**, 21
flambagem **45**, 47, 53
formador de pulso 82, **89**, 92, 102
filtro 17, 20, **35**, 36
força crítica **47**, 48
freio hidráulico **66**, 70

G

garra pneumática **54**
GRAFCET **98**, 99
grupos 73, **110**, 111, 118

H

hidráulica **6**, 8, 126, 137

I

ISO 1219 **72**, 74
ISO 8573-1 **24**, 27
ISO 15552 **42**, 43
ISO 5599 **59**, 60

K

kelvin **11**, 13
kit completo **134**

L

lei de Boyle **11**, 12, 48
linha de distribuição **29**, 32
linhas 25, 41, **110**, 111
levantamento da tarefa **125**, 129
linha de pilotagem **73**, 105
lista de componentes **75**, 77, 126
limitadora **68**
linha principal **29**, 31
lubrificador **35**, 37

M

manômetro 6, 7, **113**, 114
método intuitivo **102**, 105, 111, 116
momento de inércia 48, **53**, 56
músculo pneumático **53**
memória 38, 60, **110**, 111
método passo a passo **118**, 121
monoestável **58**, 60, 80, 81
método cascata 105, **110**, 111
modulação **19**
motor de palhetas **55**

N

normalmente aberta **59**, 88, 89
NR-12 68, 82, **127**, 129
normalmente fechada **59**, 63, 88
notação abreviada **95**, 99

P

parada de emergência 82, **125**, 126
perna de dreno **29**, 30
ponto de orvalho **13**, 14, 23, 24
potência específica **19**, 21, 28
pressão manométrica **6**, 7, 11, 45
purga **25**, 26
pascal **7**
pinhão e cremalheira **52**, 56
ponto de orvalho sob pressão **14**, 24, 25
pregador pneumático **104**
pressostato 19, **68**, 70
purgador **23**, 24
passo a passo mínimo **119**
pneumática **6**, 7, 14, 17
posição inicial 64, **72**, 74, 91
pressão absoluta **6**, 7, 11, 12
psi **7**, 9
PVC **30**, 32

Q

queda de pressão 23, 27, **134**, 135
quilômetros de curso **134**, 137

R

raspador **40**, 133
reguladora de fluxo unidirecional **65**, 67
registro de alterações **76**
relé com autorretenção **120**, 121
regulador 14, **35**, 36, 50
reposição 75, 77, **119**, 121

reservatório **7**, 9, 11, 12
retardo no desligamento **89**, 92
rotação livre **55**, 56
resfriador posterior 15, **23**, 24
retenção pilotada **68**, 69, 126
retardo na ligação **87**, 89
rolete escamoteável 62, **102**, 104

S

saturação **13**, 129
separador ciclônico **24**, 27
servopilotada **58**, 61
sinal de reposição **113**, 114, 119, 121
secador por adsorção **24**, 26
sequência direta 101, **102**, 103
simples ação **40**, 41, 48, 49
sobreposição **102**, 104, 110, 113
secador por refrigeração **24**, 26
sequência indireta **103**, 105
simultaneidade **20**, 21, 65, 67
sopro por tubo aberto **136**

T

tabela de ajustes **75**
tempo de ciclo **80**, 83, 95, 98
tabela de sinais 95, **104**, 106
transição **98**, 99
tabela-verdade **88**, 92

U

umidade relativa **14**, 16

V

válvula biestável 83, **87**, 89, 102
válvula de potência 59, **74**, 75, 80
vazamentos 20, 21, **29**, 31
vedações 10, 14, **40**, 41
válvula de fechamento **35**, 37
válvula de sequência **65**, 68, 84
vazão de pico 37, 38, **45**, 49
velocidade variável **19**, 20
válvula de partida suave **38**, 126, 129
vaso de pressão 14, 21, **128**, 129
vazão nominal 27, 37, **58**, 62
ventosa **52**, 54

Z

zona calma **36**, 38



Escola Técnica José César de Mesquita

Curso Técnico em Mecânica · Módulo 2 · Pneumática · Edição 2026/2

@escolatecnicamesquita