



Escola Politécnica da USP  
Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos

## **PMR 2481 - SISTEMAS FLUIDOMECÂNICOS**

### Apostila de Pneumática

*Prof. Dr. Emílio Carlos Nelli Silva*

:

São Paulo, 2011



## Índice

1.	Introdução .....	6
2.	Comportamento do Ar Comprimido.....	9
2.1	Pressão .....	9
2.2	Gás Ideal .....	11
2.3	Ar e Ar Comprimido.....	12
3.	Tecnologia de Acionamento Pneumático .....	18
4.	Características dos Sistemas Pneumáticos.....	20
5.	Produção, Preparação e Distribuição de Ar Comprimido.....	23
5.1	Qualidade do Ar Comprimido .....	23
5.2	Sistema de Produção e Preparação do Ar Comprimido.....	24
5.3	Compressores.....	26
5.3.1	Compressor de Êmbolo .....	27
5.3.2	Compressores Rotativos.....	29
5.3.3	Turbo-Compressores .....	31
5.4	Secagem do Ar Comprimido .....	32
5.4.1	Resfriamento .....	33
5.4.2	Adsorção.....	33
5.4.3	Absorção.....	34
5.4.4	Sobrepressão.....	35
5.5	Distribuição de Ar Comprimido .....	35
5.6	Tratamento do ar Comprimido .....	38
5.6.1	Filtro .....	39
5.6.2	Válvula Reguladora de Pressão .....	40
5.6.3	Lubrificador.....	41
6.	Atuadores Pneumáticos .....	42
6.1	Atuadores Lineares .....	43



6.1.1 Cilindro de Simples Ação .....	43
6.1.2 Cilindro de Dupla Ação.....	44
6.1.3 Cilindros de Membrana .....	44
6.1.4 Cilindro de Dupla Ação com Haste Passante.....	45
6.1.5 Cilindro Sem Haste .....	46
6.1.6 Cilindro de Múltiplas Posições .....	47
6.1.7 Cilindro Tandem .....	48
6.1.8 Cilindro de Percussão.....	49
6.1.9 Cilindro Telescópico .....	49
6.2 Atuadores Rotativos.....	50
6.3 Unidades Hidropneumáticas .....	51
6.4 Execução Prática de um Cilindro Pneumático.....	52
6.5 Amortecimento de Fim de Curso.....	54
6.6 Dimensionamento e Características de um Cilindro Pneumático.....	54
6.6.1 Exercícios .....	55
6.6.2 Flambagem nos cilindros .....	57
7. Outros Dispositivos Pneumáticos .....	59
7.1 Mesa Pneumática .....	59
7.2 Pinça Pneumática .....	59
8. Motores Pneumáticos.....	60
8.1 Motores Rotativos.....	62
8.1.1 Motor de Palhetas.....	62
8.1.2 Motor de Engrenagens e Motor Roots .....	62
8.2 Motores de Pistões .....	63
8.3 Motores de Turbina.....	64
9. Válvulas Pneumáticas .....	65
9.1 Válvulas Direcionais .....	67
9.1.1 Princípio de Funcionamento.....	67



9.1.2 Acionamento das Válvulas Direcionais .....	67
9.1.3 Execução Construtiva das Válvulas .....	68
9.1.4 Exaustão Cruzada.....	70
9.1.5 Tipos de Válvulas Direcionais .....	70
9.1.6 Especificação das Válvulas Direcionais.....	74
9.2 Válvulas de Bloqueio.....	75
9.2.1 Válvula de Retenção.....	75
9.2.2 Válvula Alternadora (“OU”) .....	75
9.2.3 Válvula de Duas Pressões (“E”).....	76
9.2.4 Válvula de Escape Rápido.....	76
9.3 Válvulas de Fluxo .....	77
9.3.1 Válvula Reguladora Unidirecional.....	78
9.3.2 Válvulas de Fechamento .....	79
9.4 Válvulas de Pressão .....	80
9.4.1 Válvula Regulador de Pressão.....	80
9.4.2 Válvula Limitadora de Pressão .....	80
9.4.3 Conversores pneumático-elétrico ou pressostatos.....	80
9.5 Regulagem dos compressores .....	81
9.5.1 Regulagem de marcha vazio .....	81
9.5.2 Regulagem de carga parcial .....	83
9.5.3 Regulagem intermitente .....	83
10. Temporizadores Pneumáticos .....	85
11. Amplificadores Pneumáticos .....	87
11.1 Amplificador de Pressão Monoestágio .....	87
11.2 Amplificador de Pressão de Duplo Estágio.....	88
12. Circuitos Pneumáticos .....	89
12.1 Seqüência de Movimento dos Pistões.....	92
12.2 Métodos de Projeto de Circuitos Pneumáticos .....	94
12.2.1 Método Intuitivo.....	94



12.2.2 Método Passo-a-Passo.....	99
13. Exemplos de Aplicação de Pneumática .....	104
14. Eletropneumática .....	108
15. Sensores Pneumáticos.....	114
15.1 Sensor de Reflexão .....	114
15.2 Barreira de ar .....	117
15.3 Sensores e interruptores pressostáticos.....	119
Bico pressostático.....	119
Interruptor pressostático .....	120
16. Bibliografia .....	121



## 1. Introdução

Como já comentado na apostila sobre motores elétricos, um sistema de automação industrial é constituído de três tipos de elementos:

- Sensores
- Controladores (comando e regulação)
- Atuadores (acionamento)

Cada um desses elementos pode ser implementado usando-se três tipos de energia:

- Pneumática
- Hidráulica
- Elétrica

A utilização de sensores e motores elétricos (já apresentado) abrange uma grande gama de aplicações, no entanto existem situações em que somente a energia hidráulica e pneumática oferecem uma solução mais eficiente e de baixo custo. Além disso, em algumas aplicações não é permitido a ocorrência de faíscas elétricas (pintura de automóvel, mina de carvão, fábrica de armamentos, etc..), não sendo interessante nesse caso utilizar motores elétricos, por exemplo.

Assim, atuadores hidráulicos são utilizados quando cargas da ordem de até centenas de toneladas estão envolvidas, como por exemplo em tratores, guindastes, ou quando se deseja uma alta precisão de posicionamento, como em máquinas de usinagem de precisão, micromanipuladores, etc..., que em geral não podem ser obtidos com motores e sistemas elétricos.

Atuadores pneumáticos são utilizados quando estão envolvidas cargas da ordem de até uma tonelada) onde se deseja movimentos de duas posições (início e fim) limitadas por batentes mecânicos, como em máquinas de fixação ou transporte de peças, ou quando se deseja altas rotações (milhares de r.p.m.), como no caso de fresaadoras pneumáticas, broca de dentista, etc...

Eventualmente encontraremos equipamentos em que ocorre uma combinação do uso das energias acima. Por exemplo, em sistemas eletropneumáticos temos atuadores



pneumáticos acionados por controladores elétricos ou eletrônicos, bem como, sensores elétricos ou pneumáticos. O mesmo ocorre em sistemas eletrohidráulicos.

Em equipamentos de automação industrial, em particular, nas máquinas SMD que inserem componentes eletrônicos em placas de circuito impresso, encontramos principalmente sistemas elétricos e pneumáticos. Nessa apostila será abordado o tópico sobre sistemas pneumáticos.

Pneumática é o ramo da engenharia que estuda a aplicação do ar comprimido para a tecnologia de acionamento e comando. Na verdade o uso do ar comprimido como fonte de energia pelo homem data de 2550 AC. Nessa época eram fabricados foles e órgãos que essencialmente geram sons baseado no escoamento do ar sob pressão em tubos com furos. O ar comprimido era produzido por uma bomba acionada manualmente. No século XIX, surgiram as primeiras máquinas pneumáticas complexas, as locomotivas e perfuratrizes (nas minas de carvão). Na verdade, essas máquinas utilizavam vapor superaquecido e não ar comprimido propriamente dito, no entanto os princípios envolvidos no funcionamento são idênticos. No entanto, foi no século XX, que a pneumática passou a ser aplicada na automação industrial e se desenvolveu ao ponto que é conhecida hoje.

Atualmente existem várias aplicações da pneumática no meio industrial e mesmo na nossa vida diária. Entre alguns exemplos de aplicações atuais de pneumática podemos citar:

- prensas pneumáticas;
- dispositivos de fixação de peças em máquinas ferramenta e esteiras;
- acionamento de portas de um ônibus urbano ou dos trens do metrô;
- sistemas automatizados para alimentação de peças;
- robôs industriais para aplicações que não exijam posicionamento preciso;
- freios de caminhão;
- parafusadeiras e lixadeiras;
- broca de dentista;
- pistola de pintura;
- correio pneumático.



A seguir são apresentados os conceitos de geração, preparação e distribuição de ar comprimido, atuadores e válvulas que compõem os sistemas pneumáticos, além de outros dispositivos.



## 2. Comportamento do Ar Comprimido

Para entender as características dos sistemas pneumáticos é necessário estudar o comportamento do ar. Para isso é apresentado inicialmente o conceito de gás ideal. No estudo do comportamento dos gases é de grande importância o conceito de pressão que será dado a seguir.

### 2.1 Pressão

Os gases são formados por moléculas em agitação (movimento) que produzem forças de pressão no recipiente em que o gás está contido. Indicações de pressão podem ter como referência o ponto zero absoluto (vácuo) ou a pressão atmosférica. Por isso fala-se em pressão absoluta e pressão relativa. A pressão atmosférica é produzida pela camada de ar que envolve a terra e depende da densidade e da altitude, portanto esta não tem um valor constante. A pressão atmosférica ao nível do mar vale 1,013 bar ( $=1,013 \cdot 10^3 \text{ N/m}^2 = 10^3 \text{ Pa}$ ).

A figura 2.1.1 indica o conceito de pressão relativa e absoluta.

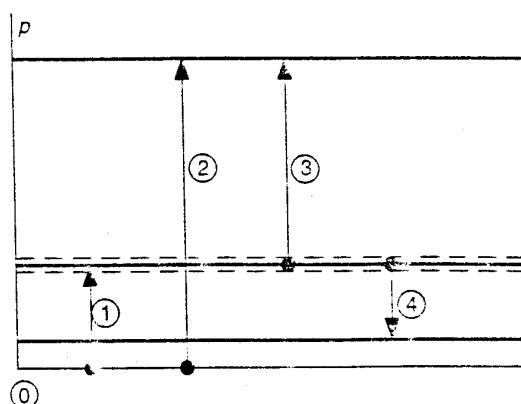


Figura 2.1.1 - Pressões relativa e absoluta.

Onde:

0 - zero absoluto da pressão;

1 - pressão atmosférica;



- 2 - pressão absoluta ( $p_a$ );
- 3 - pressão relativa positiva  $+p_e$ ;
- 4 - pressão relativa negativa  $-p_e$ ;

Por definição  $p_e = p_a - 1\text{bar}$ . Assim, usando o zero absoluto (vácuo) como ponto de referência, os dados de pressão se definem como pressão absoluta, enquanto que usando a pressão atmosférica como ponto de referência os dados de pressão se definem como pressão relativa. Note que a pressão relativa pode ser positiva ou negativa, mas a pressão absoluta é sempre positiva. A figura 2.1.2 indica as medições de pressão absoluta e relativa nos pontos 1 e 2.

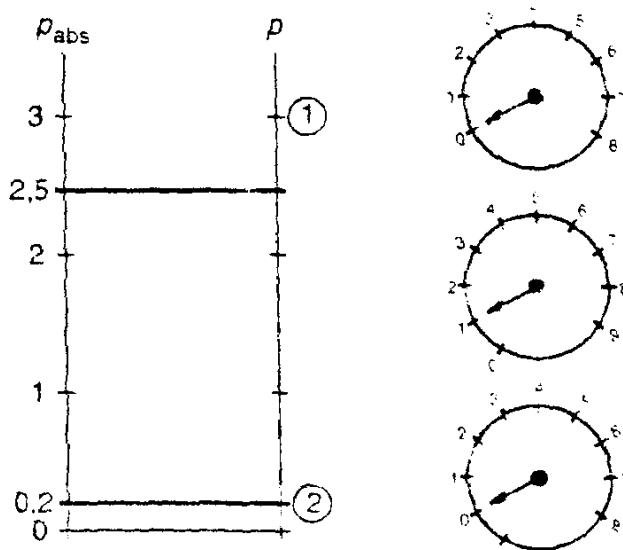


Figura 2.1.1 - Exemplo de medição de pressões absoluta e relativa.

Assim, no ponto 1 a pressão absoluta vale 2,5 bar e a relativa 1,5 bar, enquanto no ponto 2 a pressão absoluta vale 0,2 bar e a relativa vale -0,8 bar.

O valor da pressão é normalmente indicado com um manômetro. Existem três tipos de manômetro: manômetro de tubo de Bourdon (ver figura 2.1.3), diafragma ondulado, êmbolo com mola.

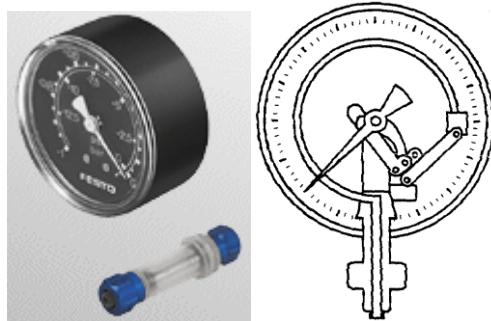


Figura 2.1.3 - Manômetro de tubo de Bourdon.

## 2.2 Gás Ideal

Os gases ocupam a totalidade do volume disponível e produzem forças de compressão devido ao movimento das moléculas que é produzido pelo efeito do calor. Numa mistura de gases, cada gás se comporta como se os outros não existissem. A pressão total da mistura é igual a soma das pressões individuais (pressão parcial) de cada gás.

O vapor é produzido pela evaporação de líquidos. Dependendo da temperatura pode haver evaporação até a pressão máxima de vapor, tratando-se nesse caso de vapor saturado. Os gases podem ser entendidos como vapores superaquecidos e obedecem aproximadamente às leis físicas dos gases. Já vapores saturados não obedecem às leis físicas dos gases. No estudo dos gases são comuns os termos gases ideais e gases reais. O gás real é como definido acima, um vapor superaquecido que apresenta uma certa temperatura de condensação (se torna líquido). Já o gás ideal não condensa no resfriamento até o ponto zero absoluto, consistindo num estado ideal (modelo) que facilita o equacionamento teórico do seu comportamento, mas não ocorre na prática. No entanto, visto que o ponto de condensação dos gases reais ocorre em baixas temperaturas e altas pressões, pode-se na pneumática a princípio, tratar o gás real com suficiente exatidão como gás ideal.



O estado de um gás é determinado por três grandezas físicas: pressão (P), volume (V) e temperatura (T). Essas três grandezas estão relacionadas pela equação geral de estado, descrita a seguir:

$$\frac{PV}{T} = \text{cte.} \quad (2.2.1)$$

onde a unidade da temperatura é Kelvin (K). Outra forma dessa equação, considerando uma massa de ar m, é:

$$PV = mRT \quad (2.2.2)$$

onde R é a constante do gás que é igual à 287 J/Kg.K para o ar. Assim, a densidade ( $\rho$ ) do gás é dada por:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{p}{RT} \quad (2.2.3)$$

Da equação (2.2.1) observa-se que se a temperatura for mantida constante (processo isotérmico) o produto pressão pelo volume é constante. Se a pressão for mantida constante, a razão entre volume e temperatura é mantida constante. Se o volume for mantido constante, a razão entre pressão e temperatura é mantida constante.

### 2.3 Ar e Ar Comprimido

O ar da atmosfera é uma mistura de gases composto de 78% de Nitrogênio, 21% de oxigênio e 1% de outros gases (ver figura 2.3.1).

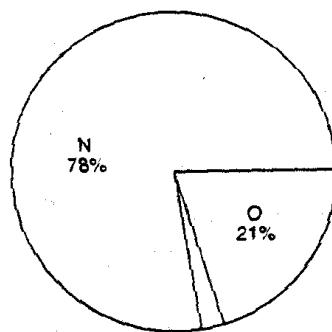


Figura 2.3.1 - Composição do ar.

O ar contém adicionalmente água em forma de vapor. A capacidade de absorção de vapor d'água no ar depende da temperatura, porém não da pressão. Se a capacidade



máxima de absorção for ultrapassada o vapor d'água condensa e precipita na forma de água condensada (neblina, pingos, etc.). A umidade máxima do ar ( $f_{\max}$ ) é o volume máximo de vapor d'água possível numa temperatura  $t$ . A umidade absoluta do ar ( $f$ ) é a quantidade de vapor d'água expressa em gramas efetivamente contida numa unidade de volume. A umidade relativa do ar ( $\varphi$ ) é também chamada de grau de saturação e é expressa por:

$$\varphi = \frac{f}{f_{\max}} 100\% \quad (2.3.1)$$

A tabela 2.3.1 indica o conteúdo máximo de água no ar saturado em cada temperatura.

Tabela 2.3.1 - Conteúdo de água no ar saturado em cada temperatura.

$t$ em °C	$f$ em g/m³
- 20	0,9
- 10	2,1
0	4,9
10	9,4
20	17,2
30	30
40	51
50	83
60	130
80	292
100	600

Como a umidade máxima varia com a temperatura é comum se expressar a umidade máxima pelo seu valor de temperatura correspondente que é chamado ponto de orvalho. O ponto de orvalho também pode ser definido como a temperatura à qual deve ser esfriado um gás para obter a condensação do vapor d'água.

O ar comprimido é o ar atmosférico condensado, que possui energia de pressão armazenada e portanto está em condição de realizar trabalho. Durante a compressão se produz calor. Quando o ar comprimido se expande, ocorre um resfriamento. Vejamos alguns exercícios que envolvem os conceitos fornecidos até aqui.



### Exercício 2.3.1

O reservatório de ar comprimido de um compressor tem um volume de  $10 \text{ m}^3$  como mostrado na figura 2.3.2. O reservatório se encontra preenchido com ar comprimido com uma pressão relativa igual à 7 bar e uma temperatura de  $20^\circ\text{C}$ .

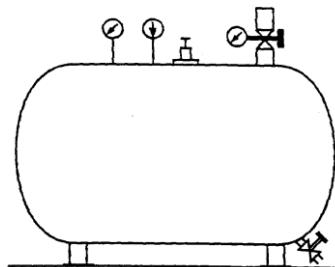


Figura 2.3.2 - reservatório de um compressor.

1. Qual a quantidade de ar, considerando o estado normalizado (1 bar,  $20^\circ\text{C}$ ) que contém o reservatório e qual a quantidade máxima utilizável?
2. Que pressão se forma com o reservatório fechado num aumento de temperatura para  $65^\circ\text{C}$ ? (desprezar dilatação do reservatório).

Solução:

1.  $P_{abs}=7+1=8 \text{ bar}$ , portanto:  $P_{1abs} \cdot V_1 = P_{2abs} \cdot V_2 \Rightarrow V_2 = \frac{10 \cdot 8}{1} = 80 \text{ m}^3$   
e assim:  $V_{2util} = 80 - 10 = 70 \text{ m}^3$
2.  $\frac{P_{1a}}{P_{2a}} = \frac{T_1}{T_2} \Rightarrow P_2 = 8 \cdot \frac{(273 + 25)}{(273 + 20)} = 9,22 \text{ bar}$

### Exercício 2.3.2

Uma ferramenta pneumática é operada por um cilindro de gás cheio de ar comprimido como mostrado na figura 2.3.3. A pressão de preenchimento é de 205 bar absoluto, a uma temperatura de  $20^\circ\text{C}$  e a capacidade do cilindro de gás é de 40 litros. A ferramenta é operada com uma pressão de trabalho igual à 4 bar e consome 200 litros/min de ar, referentes a 1 bar e  $20^\circ\text{C}$ .

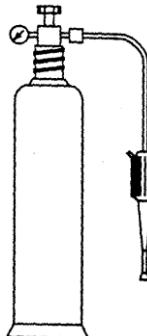


Figura 2.3.3 - Cilindro de gás.

1. Por quanto tempo a ferramenta poderá ser operada com o cilindro, em operação contínua?
2. Qual o tempo de funcionamento com 20% de vazão de utilização?
3. A qual valor de pressão se reduz o cilindro de gás que foi preenchido à 20°C quando este for empregado ao ar livre a uma temperatura ambiente de -5°C?

Solução:

1. A operação ocorre até que a pressão final seja igual à 5 bar, assim:  
 $P_i = 205 \text{ bar}; V_i = 40 \text{ L}; P_f = 4+1 = 5 \text{ bar}; V_f = 40 \text{ L}$   
 $205*40 = (1 \text{ bar}) * V_{i1} \Rightarrow V_{i1} = 8200 \text{ L}; 5*40 = (1 \text{ bar}) * V_{f2} \Rightarrow V_{f2} = 200 \text{ L}$   
Assim:  $V_{\text{util}} = 8200 - 200 = 8000 \text{ L}$  e portanto:  $t_{\text{uso}} = 8000 / 200 = 40 \text{ min}$
2. Vazão =  $0,2 * 200 = 40 \text{ L/min}$  e portanto:  $t_{\text{uso}} = 8000 / 40 = 3h 20min$
3. Temos:  $P_3 = P_1 \frac{T_3}{T_1} = 205 * \frac{268}{293} = 187,5 \text{ bar}$

### Exercício 2.3.3

Considere o percurso do ar aspirado numa central compressor como mostrado na figura 2.3.4. O ar atravessa as estações: compressor, resfriador, rede e chega ao consumidor. As características do ar aspirado (umidade, temperatura e pressão), e a sua temperatura ao longo do percurso são dados na figura 2.3.4. O ar é comprimido no compressor a uma pressão de 6 bar relativa.

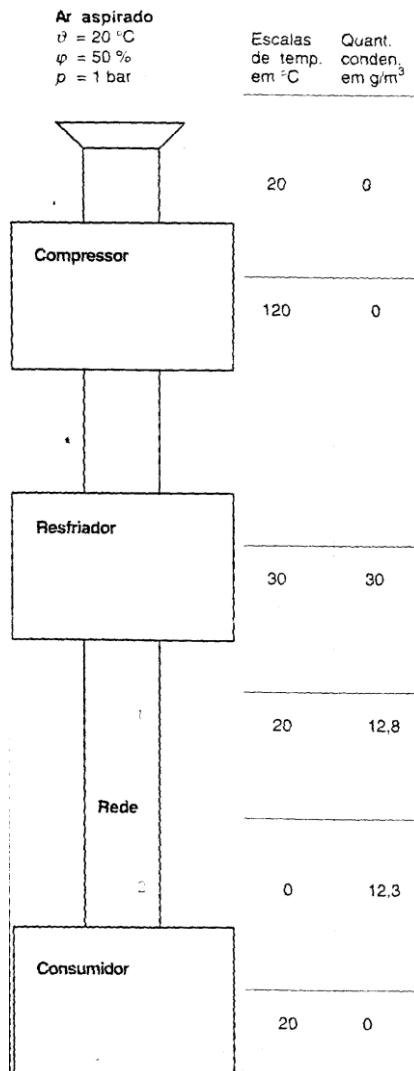


Figura 2.3.4 - Fluxo de ar numa central compressora.

Calcule a quantidade de água que condensa em cada estação.

Solução:

1. Sucção:  $P_0=1\text{bar}$        $V_0 = \frac{P_1}{P_0} * \frac{T_0}{T_1} * V_1 = \frac{8}{1} * \frac{293}{393} * 1 = 6$

$$\begin{aligned}\varphi &= 50\% & V_0 &= 6 \text{ m}^3 \\ f_{\max} &= 17,2 \text{ g/m}^3 & T_0 &= 20^\circ\text{C} \\ f &= \varphi * f_{\max} \Rightarrow m = 0,5 * 17,2 * 6 = 51,6 \text{ g}\end{aligned}$$

2. Compressor:  $P_1=8\text{bar}$   
 $f_{\max} > 600 \text{ g/m}^3$        $T_1=120^\circ\text{C}$  e  $V_1=1 \text{ m}^3$



$f=51,6 \text{ g/m}^3 < f_{\max} \Rightarrow \text{Não há condensação}$

3. Resfriador:  $P_2 \cong P_1 = 8 \text{ bar}$   $V_2 = \frac{T_2}{T_1} * V_1 = \frac{303}{393} * 1 = 0,77 \text{ m}^3$

$f_{\max}=30 \text{ g/m}^3$   $T_2=30 \text{ }^\circ\text{C} \text{ e } V_2=0,77 \text{ m}^3$

$f = \frac{51,6}{0,77} = 67 \text{ g/m}^3 \Rightarrow \text{condensa: } 51,6 - 30 * 0,77 = 51,6 - \boxed{23,1} = 28,5 \text{ g}$

4. Rede ponto 1:  $P_3 \cong P_1$   $V_3 = \frac{T_3}{T_2} * V_2 = \frac{293}{303} * 0,77 = 0,74 \text{ m}^3$

$f_{\max}=17,2 \text{ g/m}^3$   $T_3=20 \text{ }^\circ\text{C} \text{ e } V_3=0,74 \text{ m}^3$

$f = \frac{23,1}{0,74} = 31,2 \text{ g/m}^3 > f_{\max} \Rightarrow 23,1 - \boxed{17,2 * 0,74} = 23,1 - 12,7 = 10,4 \text{ g (condensa)}$

5. Rede Ponto 2:  $P_4 \cong P_1$   $V_4 = \frac{T_4}{T_3} * V_3 = \frac{273}{293} * 0,74 = 0,69 \text{ m}^3$

$f_{\max}=4,9 \text{ g/m}^3$   $T_4=0 \text{ }^\circ\text{C} \text{ e } V_4=0,69 \text{ m}^3$

$f = \frac{12,7}{0,69} = 18,7 \text{ g/m}^3 > f_{\max} \Rightarrow 12,7 - \boxed{4,9 * 0,69} = 12,7 - 3,9 = 9,3 \text{ g}$

6. Consumo:  $P_5 \cong P_1$   $V_5 = \frac{T_5}{T_4} * V_4 = \frac{293}{273} * 0,69 = 0,74 \text{ m}^3$

$f_{\max}=17,2 \text{ g/m}^3$   $T_5=20 \text{ }^\circ\text{C} \text{ e } V_5=0,74 \text{ m}^3$

$f = \frac{3,9}{0,74} = 5,3 \text{ g/m}^3 < f_{\max} \Rightarrow \text{não condensa}$



### 3. **Tecnologia de Açãoamento Pneumático**

Assim, como no caso dos motores elétricos, o sistema de açãoamento pneumático é constituído pelos elementos mostrados na figura 3.1.

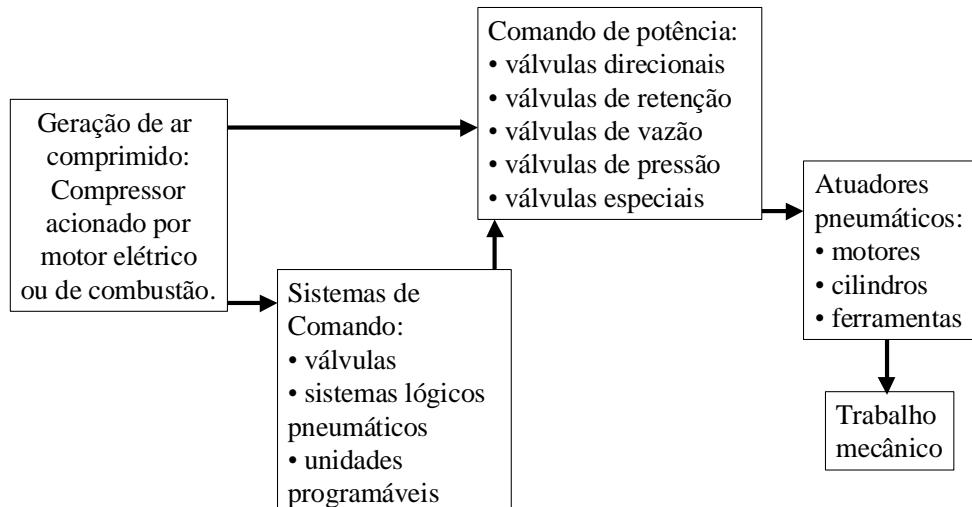


Figura 3.1 - Sistema de açãoamento pneumático.

Os sistemas de comando são os responsáveis por controlar o atuador pneumático mediante a informação dos sensores. Pode consistir num microcomputador por exemplo. Já o sistema de comando de potência vai converter os sinais recebidos do sistema de comando em sinais de níveis de energia coerente para acionar os atuadores.

A tabela 3.1 mostra uma comparação entre os sistemas elétrico, pneumático, hidráulico e mecânico do ponto de vista de energia, comando e açãoamento.



Tabela 3.1 - Comparação da energia, comando e acionamento entre os sistemas elétrico, pneumático, hidráulico e mecânico.

Tecnologia energética	Tecnologia de comando	Tecnologia de acionamento	
<b>Elétrica/ eletrônica</b> <b>Energia elétrica de</b> <ul style="list-style-type: none"><li><input type="radio"/> Energia hidráulica</li><li><input type="radio"/> Energia solar</li><li><input type="radio"/> Carvão</li><li><input type="radio"/> Petróleo</li><li><input type="radio"/> Nuclear</li><li><input type="radio"/> Reações químicas</li></ul>	Comando por reles e contatores	Contatores de potência	Motores Motores lineares Solenóides de curso
	Sistemas de comando digital e analógico <ul style="list-style-type: none"><li><input type="radio"/> Programas fixos</li><li><input type="radio"/> Sistemas livremente programáveis</li></ul>	Tiristores	
<b>Fluido hidráulico</b> Através de bombas com acionamento através de <ul style="list-style-type: none"><li><input type="radio"/> Motor elétrico</li><li><input type="radio"/> Motor de combustão</li><li><input type="radio"/> Manual</li></ul>		Válvulas direcionais Válvulas de retenção Válvulas de vazão Válvulas de pressão Válvulas especiais	Motores Cilindros Unidades construtivas
<b>Pneumática</b> Ar comprimido através de compressor com acionamento através <ul style="list-style-type: none"><li><input type="radio"/> Motor elétrico</li><li><input type="radio"/> Motor de combustão</li></ul>	Sistemas de comando digital <ul style="list-style-type: none"><li><input type="radio"/> Técnica convencional de válvulas</li><li><input type="radio"/> Sistemas lógicos pneumáticos</li><li><input type="radio"/> Unidades programáveis</li></ul>	Válvulas direcionais Válvulas de retenção Válvulas de vazão Válvulas de pressão Válvulas especiais	Motores Cilindros Ferramentas Unidades construtivas
<b>Mecânica</b> com acionamento através <ul style="list-style-type: none"><li><input type="radio"/> Motor elétrico</li><li><input type="radio"/> Manual</li></ul>	Curvas Cames Tuchos		Alavancas Redutores Multiplicadores



## 4. Características dos Sistemas Pneumáticos

Analisando as características do ar comprimido comentadas anteriormente podemos entender as características dos sistemas pneumáticos.

Entre as vantagens da utilização do ar comprimido temos:

- Facilidade de obtenção (volume ilimitado);
- Não apresenta riscos de faísca em atmosfera explosiva;
- Fácil armazenamento;
- Não contamina o ambiente (limpo e atóxico);
- Não necessita de linhas de retorno (escape para a atmosfera), ao contrário de sistemas elétricos e hidráulicos;
- Acionamentos podem ser sobrecarregados até a parada.

No entanto, o ar apresenta vapor d'água (umidade) como comentado. Esse vapor d'água pode se condensar ao longo da linha pneumática dependendo das condições de pressão e temperatura ao longo da linha. Se não houver um sistema para retirar a água, ela pode se acumular causando corrosão das tubulações.

O ar apresenta também uma baixa viscosidade. A viscosidade mede a facilidade com que um fluido (gás ou líquido) escoa. Se um fluido tem baixa viscosidade implica que ele pode escoar por pequenos orifícios e portanto a chance de ocorrer vazamentos é muito grande. Assim, vazamentos de ar em linhas pneumáticas são muito comuns.

Outro ponto importante é a compressibilidade do ar. Se considerarmos um atuador pneumático que é essencialmente um pistão acionado pelo ar não conseguimos fazer esse pistão parar em posições intermediárias com precisão, pois o esforço na haste do pistão压缩 the air removing the piston from its initial position of rest. Por isso, os atuadores pneumáticos possuem apenas duas posições limitadas por batentes mecânicos, uma vez que não é possível atingir posições intermediárias com precisão. Esse problema já não ocorre com os atuadores hidráulicos, pois o óleo é incompressível. Aliás, algumas máquinas que exigem alta precisão de posicionamento usam atuadores hidráulicos. Nesse sentido os circuitos pneumáticos são análogos aos circuitos eletrônicos digitais e



os circuitos hidráulicos são análogos aos circuitos eletrônicos analógicos. Outra dificuldade imposta pela compressibilidade do ar é o controle e estabilidade da velocidade dos atuadores. Os atuadores pneumáticos não apresentam velocidades uniformes ao longo de seu curso.

As tabelas 4.1 e 4.2 comparam as características das tecnologias de acionamento e sistemas de comando para os sistemas hidráulico, elétrico e pneumático.

Tabela 4.1 - Comparaçao da tecnologia de acionamento para os sistemas elétrico, pneumático e hidráulico.

	Hidráulica	Elétrica	Pneumática
Energia	Trasmissão	limitada e muito lenta	bem rápida e longas distâncias
	Distância econômica	até aprox. 100 m	praticamente sem limite
	Velocidade de trasmissão	aprox. 2 – 6 m/s	aprox. 300 000 km/s
	Acumular	possível dentro de limites	difícil
	Custo de energia	alto	baixo
Acionamento	Produção de movimentos lineares	muito simples	complicado e caro
	Velocidades de trabalho	até aprox. 0,5 m/s	até 4 m/s, em casos especiais ainda maior
	Peso / potência	bem alto	baixo
	Forças alcançáveis	bem altas	altas c/ grande investimentos
	Cursos alcançáveis	altos, até 10 m ou mais	limitado 2 m max.
	Alteração de forças	simples e preciso	caro
	Velocidades	simples e preciso	caro
	Rendimento	bom	ruim
	Produção de movimentos rotativos	simples	simples
	Rotações	limitado	alto, até 500.000 rpm
	Torque alcançável	bem alto	baixo
	Alteração da rotação	simples e preciso	caro
	Alteração de torque	simples e preciso	caro
	Rendimento	boa	ruim
	Interligação	cara	muito simples
	Segurança à sobrecarga	completa	normalmente não existe
	Proteção natural à explosão	parcial	não
			sim



Tabela 4.2 - Comparação da tecnologia de sistemas de comando para os sistemas elétrico, pneumático e hidráulico.

		Pneumático 3–8 bar	Pneumático 50 – 500 mbar	Eletro- mecânico	Eletônico
Trasmissão do sinal	em geral	lento e limitado	lento e limitado	rápido e sem problemas	
	distância velocidade econo- mica	aprox. 100 m aprox. 20 – 70 m/s	aprox. 300 m até max. 300 m/s	Praticamente sem limites aprox. 300.000 km/s	
Elementos de comando	tempo de comutação volume físico durabilidade	4 ms grande alta	0,1 ms pequeno bem alta	10 ms grande alta	1 ms bem pequeno bem alta
Sensibilidade contra influência ambiental	Sujeira, pó, umidade, interferência elétrica, atuação de calor	baixa baixa não tem baixa	alta baixa não tem baixa	alta alta baixa baixa	alta alta alta bem alta
Interligação		bem simples e sem problemas	bem simples e sem problemas	simples	simples
Escopo de comando		limitado	limitado	limitado	praticamente sem limites
Manipulação e manutenção		ótima	boa	boa	boa, com pessoal treinado



## **5. Produção, Preparação e Distribuição de Ar Comprimido**

### **5.1 Qualidade do Ar Comprimido**

Os equipamentos pneumáticos (principalmente as válvulas) são constituídos de mecanismos muito delicados e sensíveis e para que possam funcionar de modo confiável, com bom rendimento, é necessário assegurar determinadas exigências de qualidade do ar comprimido, entre elas:

- Pressão
- Vazão
- Teor de água
- Teor de partículas sólidas
- Teor de óleo

As grandezas de pressão e vazão estão relacionadas diretamente com a força e velocidade, respectivamente, do atuador pneumático. Cada componente pneumático tem sua especificação própria de pressão e vazão de operação. Para atender a essas especificações é necessário suficiente vazão no compressor, correta pressão na rede e tubulação de distribuição corretamente dimensionada em função da vazão.

Já água, óleo e impurezas têm grande influência sobre a durabilidade e confiabilidade de componentes pneumáticos. O óleo em particular é usado para lubrificar os mecanismos dos sistemas pneumáticos. Dependendo da aplicação as exigências do ar com relação à água, óleo e impurezas são diferentes. A tabela 5.1.1 mostra uma classificação do ar com relação a diferentes teores desses elementos.



Tabela 5.1.1 - Classificação do ar com relação a teores de água, óleo e impurezas.

Classe	Impurezas sólidas		Teor de água	Teor de óleo
	Tamanho das partíc. μm	Concentr. de partíc. mg/m <sup>3</sup>		
1	0.1	0.1	-20	proibido
2	1	1	2	0.01
3	5	5	10	0.1
4	50	—	—	1
5	—	—	—	5
6	—	—	—	25

A tabela 5.1.2 mostra as especificações do ar exigidas em cada aplicação.

Tabela 5.1.2 - Especificação do ar para diferentes aplicações.

Aplicação	Partículas sólidas classe	Água classe	Óleo classe
Área de instrumentos	2	1	4
Equipam. p/ mineração	3	2	6
Pintura à revólver	2	1	5
Indústria alimentícia	3	3	3
Ar para oficina	4	3	6
Ferram. pneumáticas	3	3	6
Sistemas de comando	4	2	5

Assim o ar deve passar por um tratamento rigoroso, que envolve filtros, secadores e lubrificadores, antes de ser distribuído na fábrica.

## 5.2 Sistema de Produção e Preparação do Ar Comprimido

A figura 5.2.1 mostra as etapas que o ar comprimido passa desde a sua geração e tratamento até ser distribuído nas máquinas. Em geral, o ar comprimido é produzido de forma centralizada e distribuído na fábrica. Para atender às exigências de qualidade, o ar após ser comprimido sofre um tratamento que envolve:

- Filtração
- Resfriamento



- Secagem
- Separação de impurezas sólida e líquidas inclusive vapor d'água

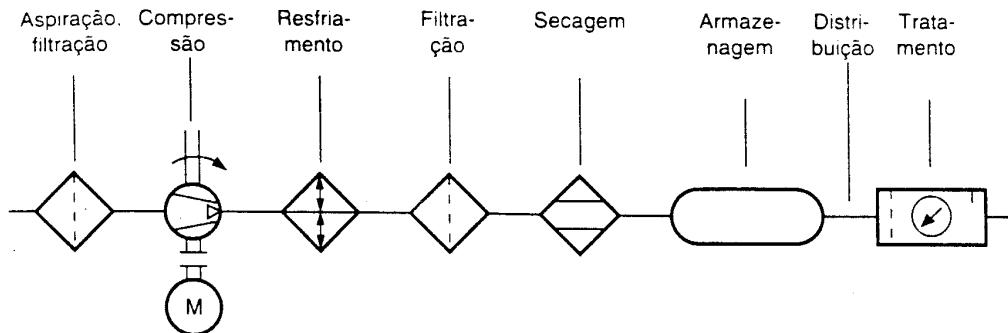


Figura 5.2.1 - Geração, tratamento e distribuição do ar comprimido.

Nessa figura cada equipamento por onde o ar passa é representado, por um símbolo. Em pneumática existe uma simbologia para representar todos os equipamentos pneumáticos. Assim estão representados na figura por exemplo, os símbolos do filtro, compressor, motor (elétrico ou de combustão), resfriador, secador e reservatório.

Na figura 5.2.1 vemos que o ar é aspirado pelo compressor, que é a máquina responsável por comprimir o ar. A taxa de compressão é em geral 1:7, ou seja, o ar atmosférico à 1 bar é comprimido para 7 bar. Na entrada do compressor existe um filtro para reter partículas sólidas do ar do meio ambiente. Ao ser comprimido, o ar aquece aumentando a temperatura em 7 vezes, como já visto. Assim é necessário resfriá-lo, pois a alta temperatura pode danificar a tubulação. Após o resfriamento o ar passa por um processo de secagem na tentativa de remover a água do ar que está sob a forma de vapor, além disso sofre uma filtração para eliminar partículas sólidas introduzidas pelo compressor, por exemplo. O ar então é armazenado num reservatório que tem duas funções:

- Garantir uma reserva de ar de maneira a garantir que a pressão da linha se mantenha constante, evitando que o compressor tenha que ser ligado e desligado várias vezes. Note que o consumo de ar na fábrica é variável ao longo do expediente.



- Alguns compressores, como o compressor de êmbolo (ver adiante) geram pulsos de pressão na compressão do ar. O reservatório evita que esses pulsos de pressão sejam transmitidos para linha pneumática da fábrica.

Do reservatório, o ar é distribuído na fábrica e em cada máquina existe uma unidade de tratamento de ar (descrita adiante no ítem 5.7) que irá ajustar as características do ar comprimido de acordo com as necessidades específicas da máquina. O ar comprimido é então convertido em trabalho mecânico pelos atuadores pneumáticos

### 5.3 Compressores

O compressor é uma máquina responsável por transformar energia mecânica (ou elétrica) em energia pneumática (ar comprimido), através da compressão do ar atmosférico. A figura 5.3.1 mostra a classificação dos compressores existentes que serão descritos a seguir.

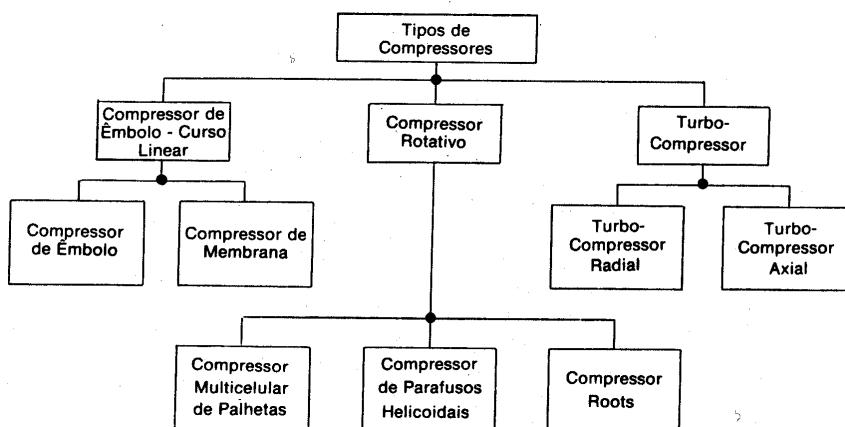


Figura 5.3.1 - Classificação dos compressores existentes.

Os compressores de êmbolo e rotativo se caracterizam por comprimir mecanicamente um volume fixo de ar em cada ciclo. Já o turbo-compressor comprime o ar forçando o seu escoamento por um bocal (difusor), ou seja, transforma a sua energia cinética em energia de pressão.



A figura 5.3.2 indica a região de atuação de cada compressor no gráfico pressão em função da vazão de operação.

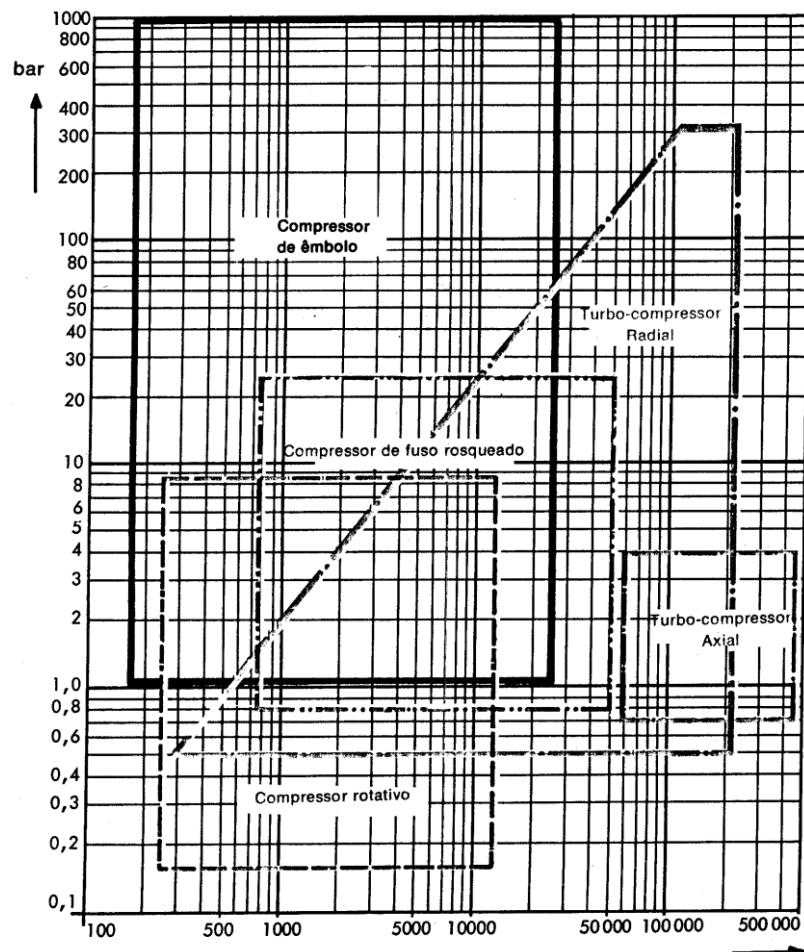


Figura 5.3.2 - Região de atuação de cada compressor no gráfico pressão X volume.

Na seção 9.5 será descrito os métodos de regulagem dos compressores para combinar o volume de fornecimento com o consumo de ar .

### 5.3.1 Compressor de Êmbolo

Consiste num mecanismo biela-manivela (igual ao motor de um automóvel) acionado por um motor elétrico ou de combustão, como mostrado na figura 5.3.1.1.

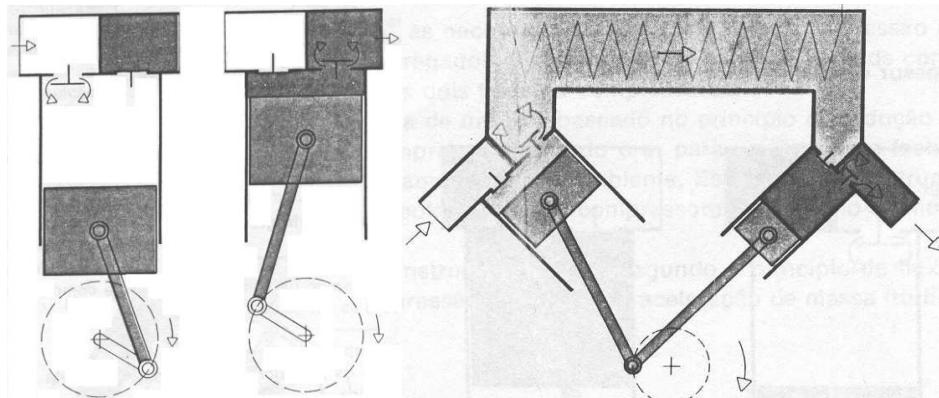


Figura 5.3.1.1 - Compressor de êmbolo monoestágio e multi-estágio.

Nesse compressor, o pistão aspira o ar através da válvula de aspiração e o comprime no curso de compressão até atingir a pressão desejada quando abre a válvula de pressão. São os mais usados ("compressor do dentista") pois tem uma larga faixa de operação como mostrado na figura 5.3.2.

São econômicos na faixa de pressão de 8 a 10 bar. Quando a razão de compressão necessária é muito alta ocorrem perdas térmicas muito altas, e nesse caso deve-se usar a versão multiestágio (ver figura 5.3.1.1), em que a cada estágio ocorre um aumento da pressão melhorando-se o rendimento. Em torno de cada pistão existem aletas para a dissipação do calor gerado na compressão. Em alguns casos é necessário um sistema de refrigeração à água.

Esse compressor apresenta como desvantagem a geração de oscilações de pressão além de um fluxo de ar pulsante.

Uma variação desse compressor, chamado compressor de membrana é apresentado na figura 5.3.1.2. Possui uma membrana ao invés de um pistão. A idéia é isolar o ar a ser comprimido das peças do compressor evitando resíduos de óleo. É muito utilizado nas indústrias alimentícia e farmacêutica, por exemplo.

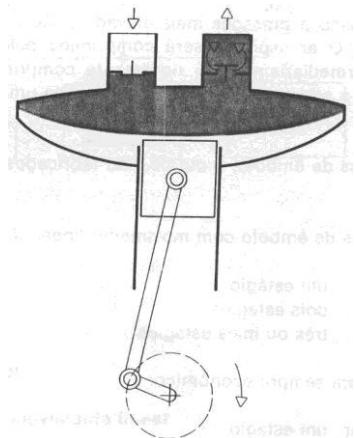


Figura 5.3.1.2 - Compressor de membrana.

### 5.3.2 Compressores Rotativos

#### 5.3.2.1 Compressor de Palhetas

Trata-se de um rotor que gira no interior de uma carcaça acionado por um motor elétrico ou de combustão. O rotor está excêntrico à carcaça e apresenta palhetas ao seu redor que podem deslizar em guias como mostrado na figura 5.3.2.1.1.

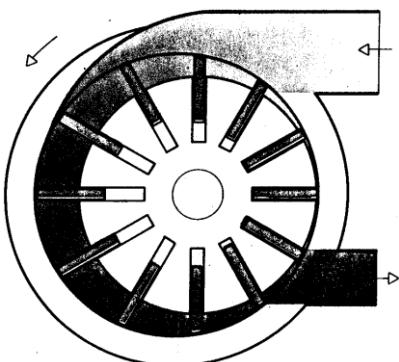


Figura 5.3.2.1.1 - Compressor de palhetas.

Note que o volume de ar aspirado é ligeiramente comprimido ao longo do percurso do rotor. Dessa forma, o fluxo gerado é pouco pulsante, mas opera em faixas de pressão menores do que a do compressor de êmbolo. A faixa de operação é mostrada na figura 5.3.2. A lubrificação é feita por injeção de óleo.



### 5.3.2.2 Compressor Parafuso

Consiste em dois parafusos, cada um ligado a um eixo de rotação acionado por um motor elétrico ou de combustão como mostrado na figura 5.3.2.2.1. O ar é deslocado continuamente entre os parafusos, com isto não ocorrem golpes e oscilações de pressão, uma vez que não há válvulas de oscilação de pressão e aspiração fornecendo um fluxo de ar extremamente contínuo. São pequenos e permitem alta rotação, apresentando um alto consumo de potência. Embora sejam caros são os mais preferidos no mercado por fornecer um fluxo contínuo de ar. Devem operar à seco com ar comprimido isento de óleo.

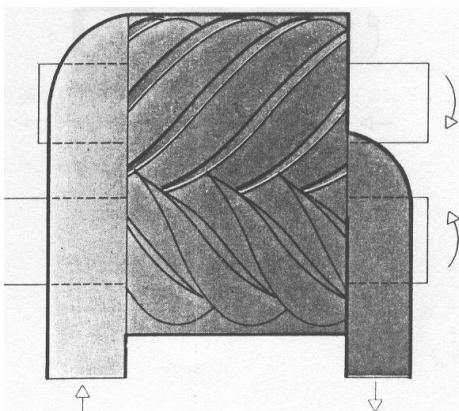


Figura 5.3.2.2.1 - Compressor de parafuso.

### 5.3.2.3 Compressor Roots

Consiste em duas "engrenagens" que se movimentam acionadas por um motor elétrico ou de combustão como mostrado na figura 5.3.2.3.1. Funciona sem compressão interna sendo usado apenas para o transporte pneumático gerando baixas pressões. A pressão é exercida apenas pela resistência oferecida ao fluxo.

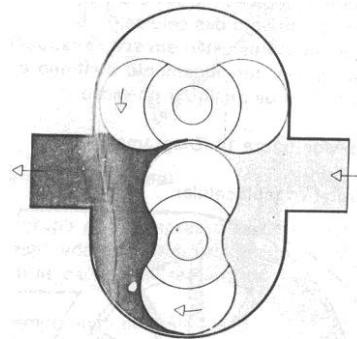


Figura 5.3.2.3.1- Compressor Roots.

### 5.3.3 Turbo-Compressores

#### 5.3.3.1 Turbo Compressor Axial

O ar passa por rodas girantes atinge altas velocidades e no último estágio, através de um difusor, a energia cinética do fluxo de ar é convertida em pressão como mostrado na figura 5.3.3.1.1. Geram altas vazões de ar, porém como em cada estágio a pressão é muito baixa faz se necessário a montagem de muitos estágios para alcançar pressões maiores.

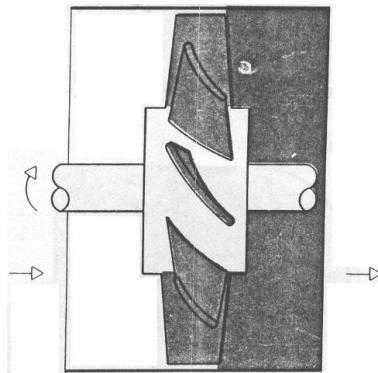


Figura 5.3.3.1.1- Compressor Axial.

#### 5.3.3.2 Turbo Compressor Radial

A aspiração ocorre no sentido axial sendo o ar conduzido no sentido radial para a saída como mostrado na figura 5.3.3.2.1. Apresentam as mesmas características dos



compressores axiais (altas vazões e baixas pressões). Observa-se pelo figura 5.3.2 que esse compressor apresenta uma larga faixa de operação.

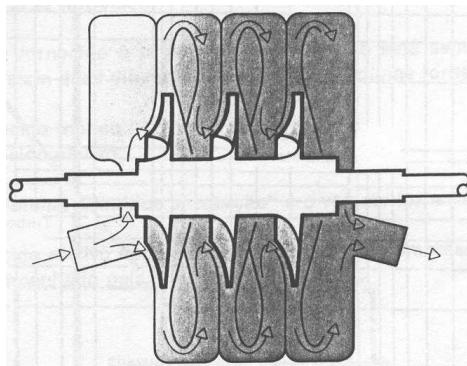


Figura 5.3.3.2.1- Compressor radial.

## 5.4 Secagem do Ar Comprimido

O ar possui água na forma de vapor. Este vapor d'água é aspirado pelo compressor junto com o ar. Esse vapor pode se condensar ao longo da linha dependendo da pressão e temperatura. A água acumulada pode ser eliminada através de filtros separadores de água e drenos dispostos ao longo da linha. No entanto um filtro não pode eliminar vapor d'água e para isso são necessários secadores.

Para entendermos os princípios da secagem do ar vamos usar o fato que o ar é equivalente a uma esponja. Se a esponja estiver saturada de água, não poderá absorver mais água. Da mesma forma se a umidade do ar atingir o seu valor máximo, o mesmo não poderá absorver mais vapor d'água. Comprimindo uma esponja não-saturada, diminuímos sua quantidade de água, o que é equivalente a aumentar a pressão do ar e ocorrer condensação do vapor d'água. Ao resfriar a esponja, seus poros diminuem de volume, eliminando água, o que é equivalente a aumentar a temperatura do ar e ocorrer condensação.

Essa analogia nos sugere métodos para retirar o vapor d'água do ar. Existem quatro métodos de secagem:

- Resfriamento
- Adsorção



- Absorção
- Sobrepressão

#### 5.4.1 Resfriamento

Consiste em se resfriar o ar o que reduz o seu ponto de orvalho. O ar é resfriado circulando-o por um trocador de calor (serpentina com fluido refrigerante) como mostrado na figura 5.4.1.1.

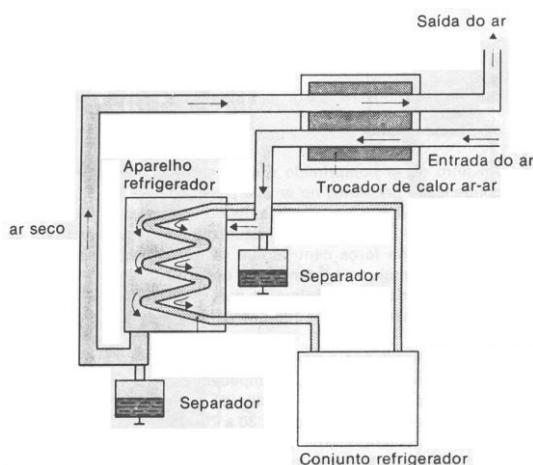


Figura 5.4.1.1 - Processo de resfriamento para a secagem do ar.

O ponto de orvalho (umidade) alcançado com esse método situa-se entre 2°C e 5°C. Note que na figura 5.2.1 que logo após o compressor o ar comprimido é resfriado. Dessa forma, a região após o resfriador é uma região onde há grande ocorrência de condensação na linha pneumática.

#### 5.4.2 Adsorção

Opera através de substâncias secadoras que por vias físicas (efeito capilar) adsorvem (adsorver - admitir uma substância à superfície da outra) o vapor d'água do ar, as quais podem ser regeneradas através de ar quente. Assim os sistemas de adsorção possuem um sistema de circulação de ar quente em paralelo para realizar a limpeza do elemento secador como mostrado na figura 5.4.2.1. Devem ser usados dois secadores em paralelo, pois enquanto um está sendo limpo o outro pode ser usado.

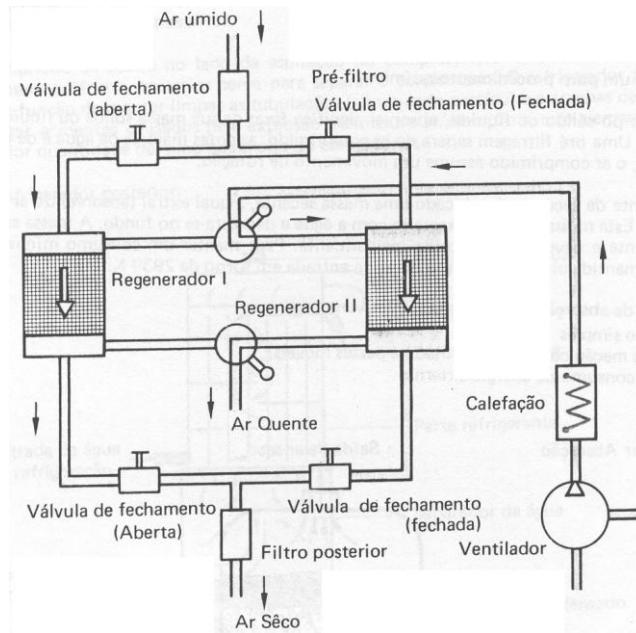


Figura 5.4.2.1 - Secagem por adsorção.

O ponto de orvalho alcançável com esse método está em torno de  $-20^{\circ}\text{C}$ , em casos especiais  $-90^{\circ}\text{C}$ . Em geral, o elemento secador é um material granulado com arestas ou formato esférico. A substância usada é o Dióxido de Sílico, mais conhecido como "Sílica gel". Trata-se do sistema mais caro em relação aos demais, mas o que é capaz de retirar a maior quantidade de umidade.

### 5.4.3 Absorção

É um processo químico. O ar comprimido passa por uma camada solta de um elemento secador como mostra a figura 5.4.3.1. A água ou vapor d'água que entra em contato com este elemento combina-se quimicamente com ele e se dilui formando uma combinação elemento secador e água. Este composto pode ser removido periodicamente do absorvedor. Com o tempo o elemento secador é consumido e o secador deve ser reabastecido periodicamente (2 à 4 vezes por ano).

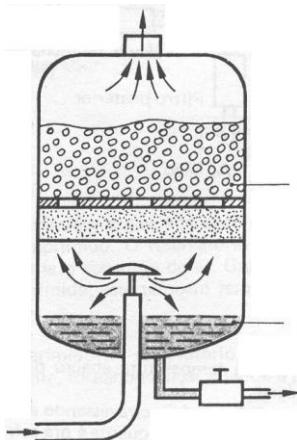


Figura 5.4.3.1 - Secagem por absorção.

O secador por absorção separa ao mesmo tempo vapor e partículas de óleo. Porém, grandes quantidades de óleo atrapalham o funcionamento do secador. Devido a isto é usual antepor um filtro fino ao secador. O ponto de orvalho alcançável com esse método é 10°C. É o método mais barato entre os demais porém o que retira menor quantidade de água.

#### 5.4.4 Sobrepressão

Aumentando-se a pressão há condensação, como já comentado, e pode-se drenar água.

### **5.5 Distribuição de Ar Comprimido**

As tubulações pneumáticas exigem manutenção regular, razão pela qual não devem, dentro do possível, serem mantidas dentro de paredes ou cavidades estreitas, pois isto dificulta a detecção de fugas de ar. Pequenos vazamentos são causas de consideráveis perdas de pressão. Existem três tipos de redes de distribuição de pressão principais:

- Rede em circuito aberto
- Rede em circuito fechado
- Rede combinada



Essas linhas principais são feitas de tubos de Cobre, latão, aço liga, etc... Conectadas às linhas principais estão as linhas secundárias, em geral, mangueiras de borracha ou material sintético.

A rede em circuito aberto mostrada na figura 5.5.1 é a mais simples e deve ser montada com um declive de 1% a 2% na direção do fluxo para garantir a eliminação da água que condensa no interior da linha. Isso ocorre porque o ar fica parado no interior da linha quando não há consumo.

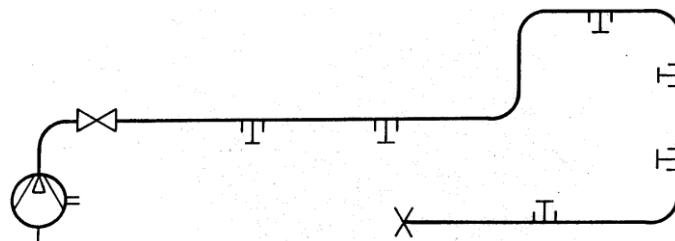


Figura 5.5.1 - Rede em circuito aberto.

Já a rede em circuito fechado mostrada na figura 5.5.2 permite que o ar flua nas duas direções e que fique circulando na linha reduzindo o problema de condensação.

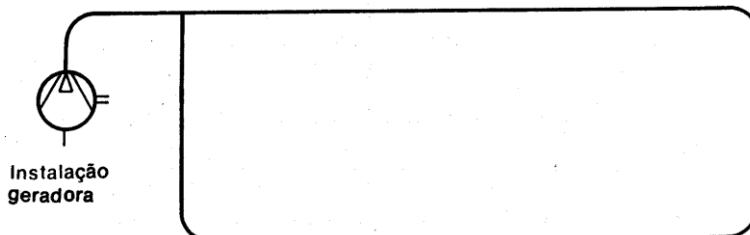


Figura 5.5.2 - Rede em circuito fechado.

As redes combinadas como mostrado na figura 5.5.3, também são instalações em circuito fechado. No entanto, mediante as válvulas de fechamento existe a possibilidade de bloquear determinadas linhas de ar comprimido quando a mesmas não forem usadas ou quando for necessário colocá-las fora de serviço por razões de manutenção. Há uma estanqueidade da rede portanto.

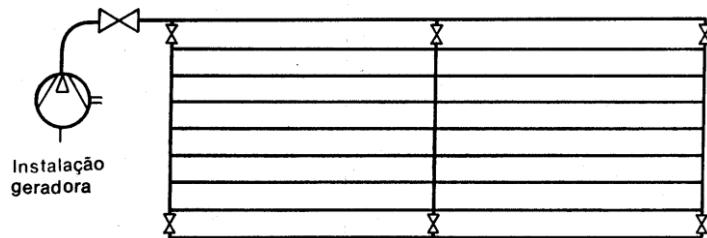


Figura 5.5.3 - Rede combinada.

Em todas as configurações de rede por causa da formação de água condensada (maior ou menor) é fundamental instalar a tomada de ar das tubulações de ar secundárias na parte superior do tubo principal. Desta forma evita-se que a água condensada, eventualmente existente na tubulação principal possa chegar aos ramais secundários. Para interceptar e drenar a água condensada devem ser instaladas derivações com drenos na parte inferior da tubulação principal.

A figura 5.5.4 ilustra os tipos de conexão disponíveis para tubos metálicos.

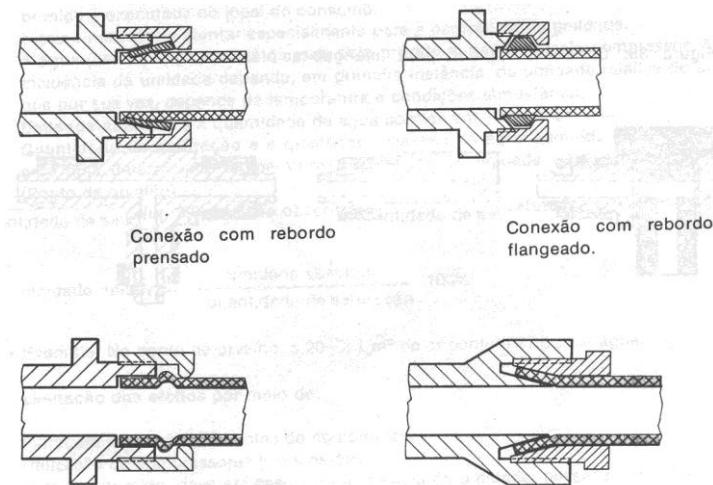


Figura 5.5.4 - Conexões para tubos metálicos.

A figura 5.5.5 ilustra os tipos de acoplamentos usados nas linhas pneumáticas.

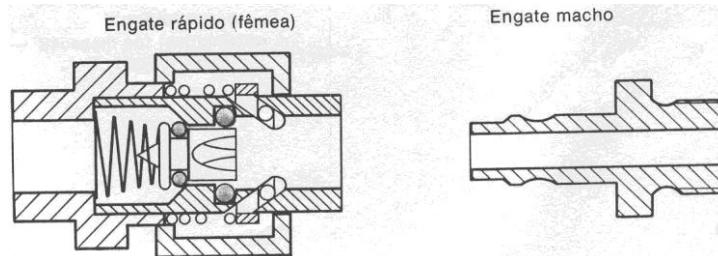


Figura 5.5.5 - Acoplamentos tipo engate rápido e macho.

A figura 5.5.6 ilustra os tipos de conexões disponíveis para mangueiras de borracha e plásticas.

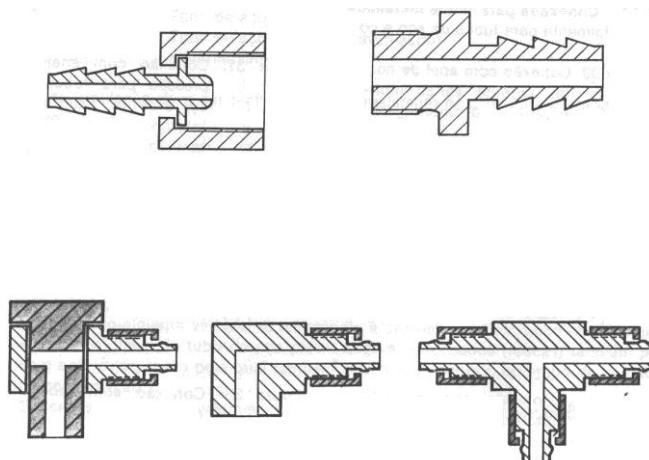


Figura 5.5.6 - Conexões para mangueiras de borracha e plásticas.

## 5.6 Tratamento do ar Comprimido

Antes de entrar em cada máquina pneumática o ar passa por uma unidade de tratamento como mostrado na figura 5.6.1 composta por um filtro, uma válvula reguladora de pressão e um lubrificador. Essa unidade tem por objetivo ajustar as características do ar de forma específica para cada máquina.

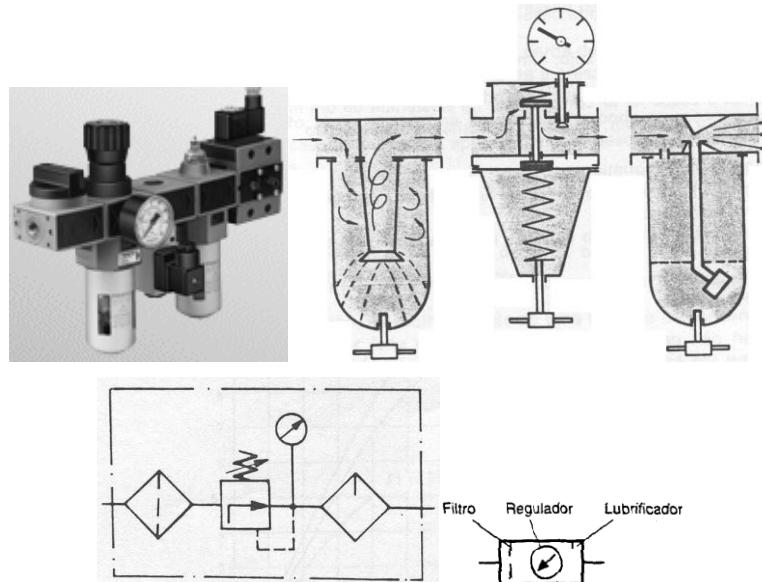


Figura 5.6.1 - Unidade de tratamento e seus símbolos.

Vejamos cada um de seus componentes.

### 5.6.1 Filtro

O filtro serve para eliminar partículas sólidas e líquidas (impurezas, água, etc..). A filtração ocorre em duas fases. Uma pré-eliminação é feita por rotação do ar gerando uma força centrífuga como mostrado na figura 5.6.1.1. A eliminação fina é feita pelo elemento filtrante. O filtro apresenta um dreno (manual ou automático) para a eliminação de água. A porosidade do elemento filtrante é da ordem de 30 a 70  $\mu\text{m}$ .

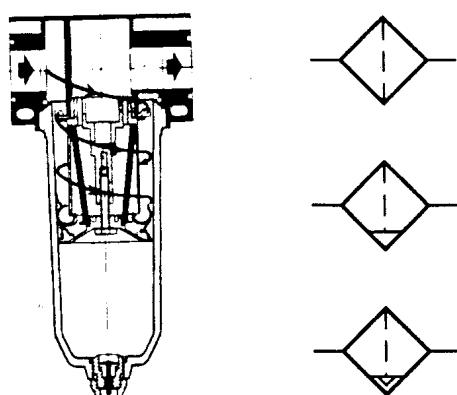


Figura 5.6.1.1 - Filtro e seus símbolos.



### 5.6.2 Válvula Reguladora de Pressão

Essa válvula tem a função de manter constante a pressão no equipamento. Ela somente funciona quando a pressão a ser regulada (pressão secundária) for inferior que a pressão de alimentação da rede (pressão primária). Assim essa válvula pode reduzir a pressão, mas jamais aumentá-la. A figura 5.6.2.1 descreve uma válvula de segurança juntamente com o seu símbolo.

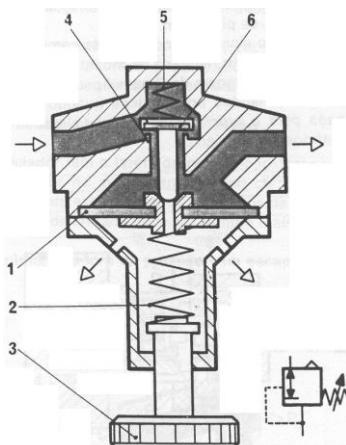


Figura 5.6.2.1 - Válvula de segurança.

O seu funcionamento ocorre da seguinte forma. Se a pressão secundária diminui em relação a um valor especificado a mola 2 (ver figura 5.6.2.1) empurra o êmbolo 6 que abre a comunicação com a pressão primária. Se a pressão secundária aumenta, em relação a um valor especificado (por exemplo, devido à um excesso de carga no atuador) então a membrana 1 é atuada pressionando a mola 2 e o êmbolo 6 fecha a comunicação até que a pressão secundária diminua. Se a pressão secundária aumentar demais, então além de ocorrer a situação anterior, a membrana 1 se separa do êmbolo 6, abrindo a comunicação com os furos de exaustão, ocorrendo o escape de ar, o que reduz a pressão secundária. O parafuso 3 permite regular a rigidez da mola 2 e portanto a pressão secundária. Logicamente essa válvula gera uma oscilação de pressão na sua



saída (pressão secundária), no entanto tanto menor será essa oscilação quanto melhor forem dimensionados os componentes da válvula.

### 5.6.3 Lubrificador

O lubrificador tem a função de lubrificar os aparelhos pneumáticos de trabalho e de comando. A alimentação do óleo é feita pelo princípio de Venturi que é ilustrado na figura 5.6.2.2.

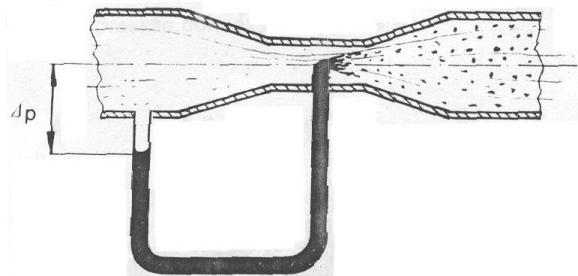


Figura 5.6.2.2 - Princípio de Venturi.

Essencialmente quando o fluxo de ar passa por uma seção de menor área, a sua velocidade aumenta e a sua pressão diminui, e portanto o óleo contido no tubo é pulverizado no ar. A figura 5.6.2.3 ilustra um lubrificador e seu símbolo. O nível do óleo deve ser verificado periodicamente e a sua dosagem controlada.

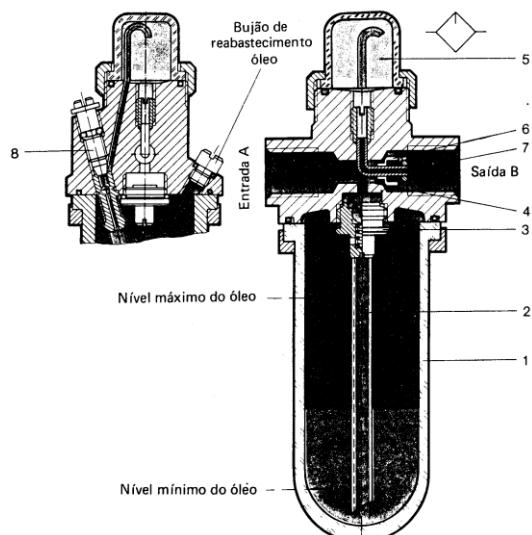


Figura 5.6.2.3 - Lubrificador.



## 6. Atuadores Pneumáticos

Os atuadores pneumáticos são classificados em atuadores lineares que geram movimentos lineares e atuadores rotativos que geram movimentos rotativos que serão descritos a seguir.

As principais características dos atuadores pneumáticos são:

- Apresentam baixa rigidez devido à compressibilidade do ar;
- Não há precisão na parada em posições intermediárias;
- Apresentam uma favorável relação peso/potência;
- Dimensões reduzidas;
- Segurança à sobrecarga;
- Facilidade de inversão;
- Proteção à explosão.

A tabela 6.1 descreve os tipos de atuadores pneumáticos e suas aplicações.

Tabela 6.1 - Tipos e aplicações de atuadores pneumáticos.

Aparelhos da técnica pneumática		
Acionamentos	Ferramentas manuais	Unidades construtivas
<b>Movimento rotativo</b> <input type="radio"/> Motor de palhetas <input type="radio"/> Motor de pistões axiais <input type="radio"/> Motor de pistões radiais <input type="radio"/> Motor de engranagens <input type="radio"/> Turbina	<b>Movimento rotativo</b> <input type="radio"/> Furadeira <input type="radio"/> Rosqueadeira <input type="radio"/> Lixadeira <input type="radio"/> Aparafusadeira <input type="radio"/> Serra <input type="radio"/> Debicador <input type="radio"/> Tesoura para chapa	<input type="radio"/> Unidade de avanço hidropneumático <input type="radio"/> Unidade de fixação <input type="radio"/> Esteira transportadora <input type="radio"/> Mesa giratória posicionadora <input type="radio"/> Unidade furadora <input type="radio"/> Unidade rosqueadora <input type="radio"/> Aparafusadeira múltipla
<b>Movimento linear</b> <input type="radio"/> Cilindro de simples ação <input type="radio"/> Cilindro de membrana <input type="radio"/> Cilindro tipo fole <input type="radio"/> Cilindro de dupla ação <input type="radio"/> Cilindro de dupla ação com haste passante <input type="radio"/> Cilindro de dupla ação sem haste <input type="radio"/> Cilindro de múltiplas posições <input type="radio"/> Cilindro tandem <input type="radio"/> Cilindro com cabo de aço <input type="radio"/> Cilindro rotativo <input type="radio"/> Cilindro golpeador <input type="radio"/> Cilindro telescópico	<b>Movimento de percussão</b> <input type="radio"/> Martelo <input type="radio"/> Britateira <input type="radio"/> Rebitadeira <input type="radio"/> Estampo de gravação <input type="radio"/> Pregador	



## 6.1 Atuadores Lineares

### 6.1.1 Cilindro de Simples Ação

A figura 6.1.1.1 descreve esse tipo de atuador juntamente com o seu símbolo e características construtivas. Consiste de um pistão com uma mola. Ao se reduzir a pressão a mola retorna o pistão. Entre as suas características temos:

- Consumo de ar num sentido;
- Forças de avanço reduzida (em 10%) devido à mola;
- Maior comprimento e cursos limitados;
- Baixa força de retorno (devido à mola).

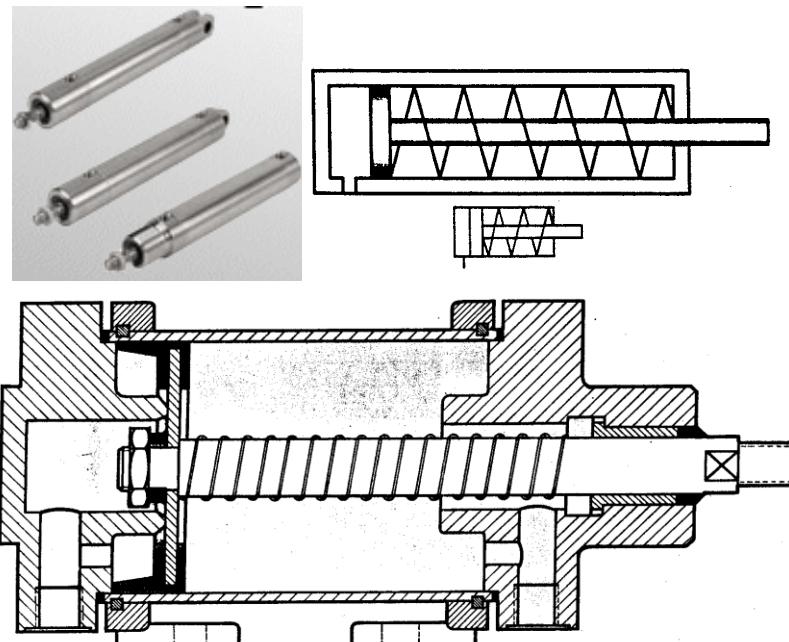


Figura 6.1.1.1 - Cilindro de simples ação.

Tem várias aplicações, em especial em situações de segurança, como freios de caminhão, onde os freios ficam normalmente fechados sob ação da mola, abrindo apenas quando o motor do caminhão está funcionando e fornecendo pressão. Em caso de falha do motor os freios travam.



### 6.1.2 Cilindro de Dupla Ação

A figura 6.1.2.1 descreve esse tipo de atuador juntamente com o seu símbolo e características construtivas. A atuação é feita por ar comprimido nos dois sentidos. Entre as suas características temos:

- Atuação de força nos dois sentidos, porém com força de avanço maior do que a de retorno;
- Não permite cargas radiais na haste;

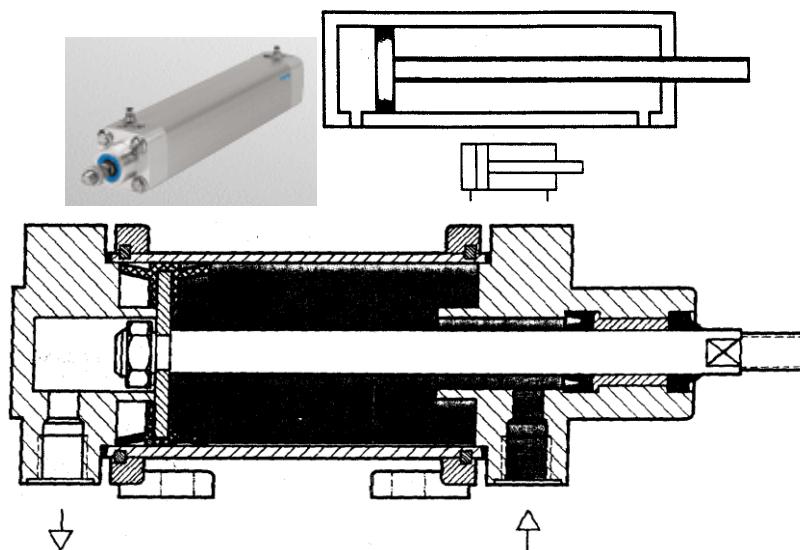


Figura 6.1.2.1 - Cilindro de dupla ação.

É o mais utilizado possuindo inúmeras aplicações, como prensas, fixadores, etc... O curso não pode ser muito grande pois surgem problemas de flambagem.

### 6.1.3 Cilindros de Membrana

A figura 6.1.3.1 descreve esse tipo de atuador. Consiste num cilindro de simples ação com grande diâmetro possuindo uma membrana ao invés de um pistão. A idéia é fornecer altas forças (até 25000 N) num curso limitado (60 mm) (por problemas de espaço, por exemplo).

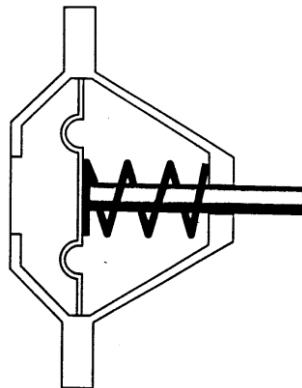


Figura 6.1.3.1 - Cilindro de membrana.

É utilizado em aplicações como prensas, mas principalmente no acionamento de servoválvulas hidráulicas.

#### 6.1.4 Cilindro de Dupla Ação com Haste Passante

A figura 6.1.4.1 descreve esse tipo de atuador. Consiste num cilindro de dupla ação com haste em ambos os lados. Entre as suas características temos:

- Possibilidade de realizar trabalho nos dois sentidos;
- Absorve pequenas cargas laterais;
- Força igual nos dois sentidos.

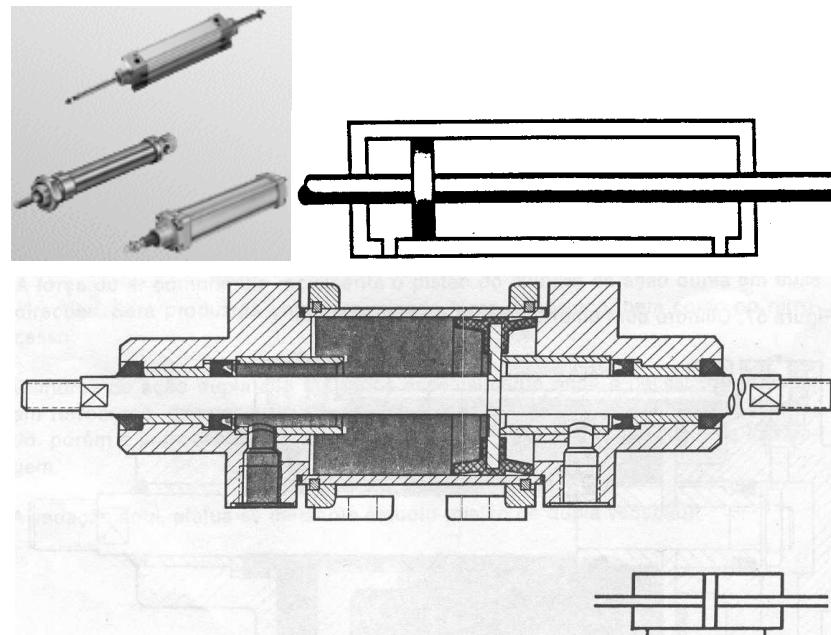


Figura 6.1.4.1 - Cilindro de dupla ação com haste passante.

### 6.1.5 Cilindro Sem Haste

Estes cilindros são aplicados onde são necessários cursos muito grandes e surgem problemas de flambagem na haste de um cilindro comum. Apresentam a mesma área em ambos os lados e por isso mesma força de avanço e retorno. São aplicados em acionamento de portas, alimentador de peças, etc... Existem três tipos descritos a seguir.

#### 1. Com tubo fendido

A figura 6.1.5.1 descreve esse tipo de cilindro. Essa montagem permite absorver elevados momentos e forças transversais, no entanto a vedação consiste num ponto crítico. É utilizado em particular em catapultas de porta aviões, onde é acionado por vapor superaquecido.

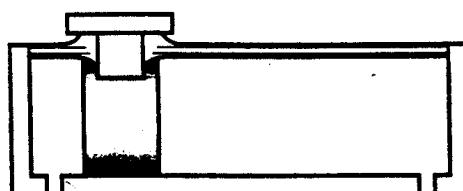


Figura 6.1.5.1 - Cilindro sem haste com tubo fendido.



## 2. Com imã

A figura 6.1.5.2 descreve esse tipo de cilindro. Não tem problemas de vedação como o anterior, mas a transmissão da força é limitada pelo imã. É utilizado em robôs cartesianos.

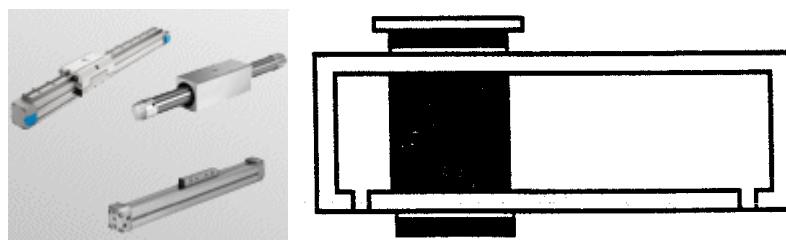


Figura 6.1.5.2 - Cilindro sem haste com imã.

## 3. Com cabo ou fita

A figura 6.1.5.3 descreve esse tipo de cilindro. Não há problema de flambagem, pois as fitas estão sobre tração. Muito usado no acionamento de portas.

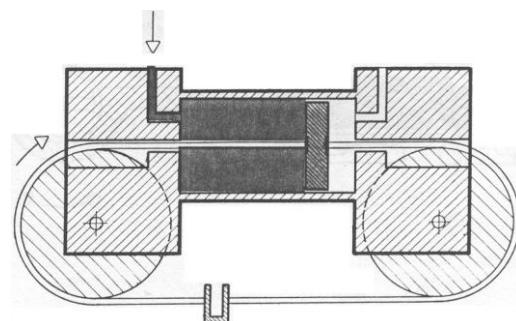


Figura 6.1.5.3 - Cilindro sem haste com cabo ou fita.

## 6.1.6 Cilindro de Múltiplas Posições

A figura 6.1.6.1 descreve esse tipo de atuador juntamente com o seu símbolo e exemplo de aplicação. Consiste em dois ou mais cilindros montados em conjunto para alcançar várias posições. Com  $n$  cilindros de cursos desiguais, pode-se obter  $2^n$  posições distintas.

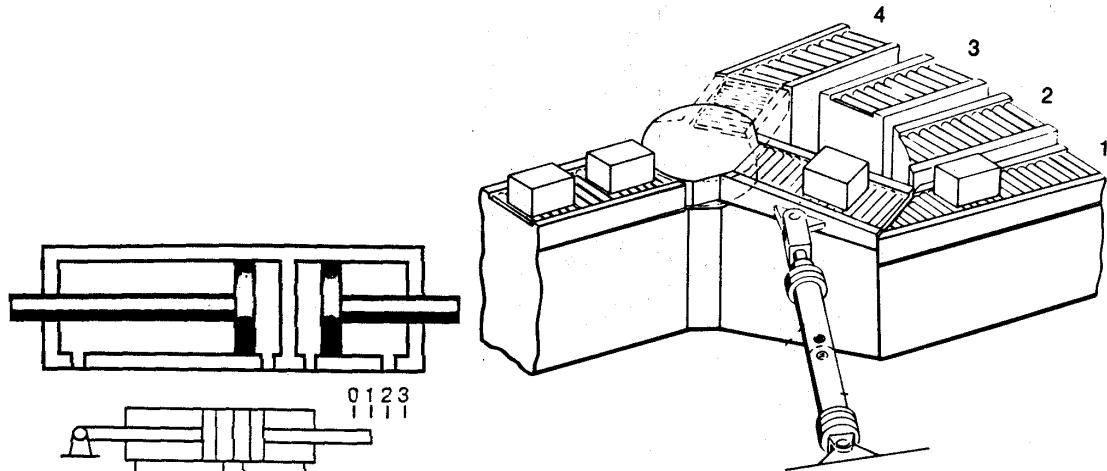


Figura 6.1.6.1 - Cilindro de múltiplas posições.

É aplicado em mudança de desvios (ver figura 6.1.6.1), acionamento de válvulas, etc..

### 6.1.7 Cilindro Tandem

A figura 6.1.7.1 descreve esse tipo de atuador juntamente com o seu símbolo e característica construtiva. Consiste em dois cilindros acoplados mecanicamente em série. É aplicado principalmente em pregadores pneumáticos. Entre as suas características temos:

- Grande força com pequeno diâmetro;
- Grande dimensão de comprimento;
- Somente para pequenos cursos.

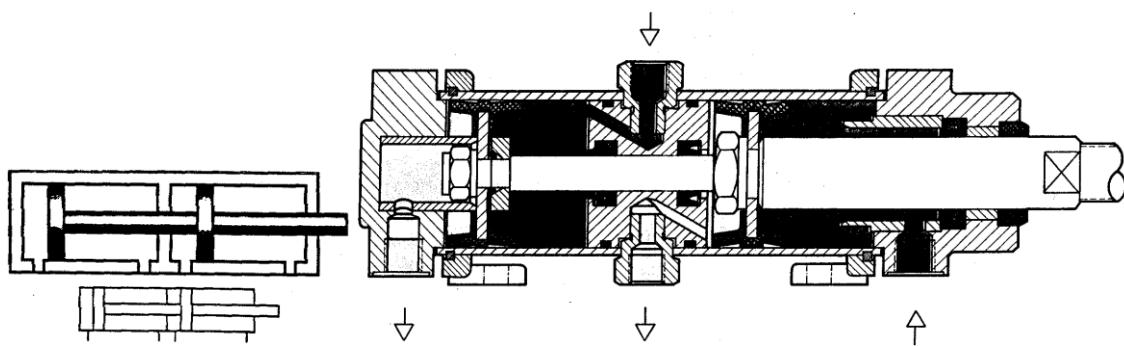


Figura 6.1.7.1 - Cilindro tandem.



### 6.1.8 Cilindro de Percussão

A figura 6.1.8.1 descreve esse tipo de cilindro juntamente com o seu símbolo e característica construtiva. É usado para gerar um alta força de impacto e alta velocidade (7,5 a 10 m/s). Funciona da seguinte forma:

- Inicialmente é aplicado pressão nas câmaras A e B (ver figura 6.1.8.1), e o valor da pressão é aumentado em ambos os lados;
- Num certo instante, a câmara A é exaurida (pressão atmosférica) e o pistão é empurrado pela pressão da câmara B;
- Ao se movimentar um pouco a área em que a pressão da câmara B atua tem seu diâmetro aumentado bruscamente como mostrado na figura, o que faz com que o pistão seja acelerado violentamente;
- A energia cinética do pistão é convertida em força de impacto.

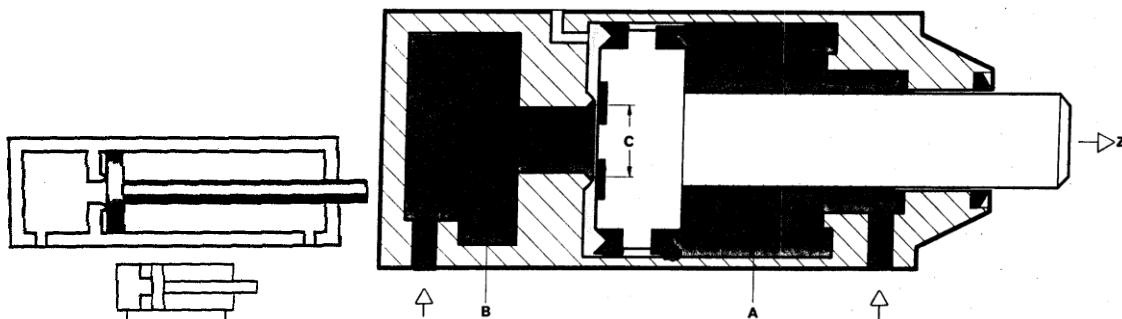


Figura 6.1.8.1 - Cilindro de percussão.

Apresenta um pequeno curso. É aplicado em prensas pneumáticas para forjamento, britadeiras, rebitadeiras, etc..

### 6.1.9 Cilindro Telescópico

A figura 6.1.9.1 descreve esse tipo de atuador. É composto de vários cilindros montando em série um dentro do outro. Apresenta curso longo e dimensões reduzidas



de comprimento, porém um diâmetro grande face à força gerada. É aplicado em máquinas que precisam de um longo curso e comprimento reduzido.

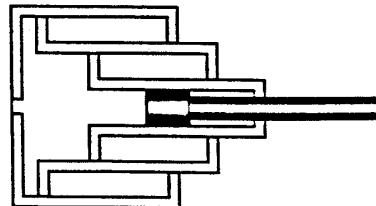


Figura 6.1.9.1 - Cilindro telescópico.

## 6.2 Atuadores Rotativos

Transformam o movimento linear do cilindro de dupla ação num movimento rotativo com ângulo limitado de rotação. A figura 6.2.1 descreve esse tipo de cilindro juntamente com o seu símbolo e a sua característica construtiva. Nesse caso a conversão do movimento é feita utilizando-se um sistema pinhão-cremalheira. A rotação tem ângulo limitado podendo ser regulada de 45° até 720°.

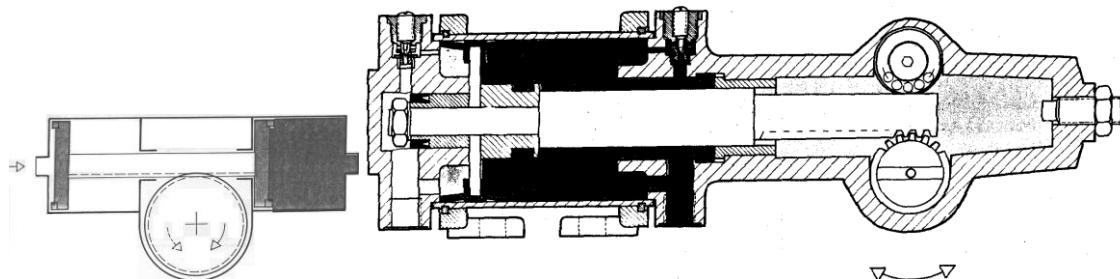


Figura 6.2.1 - Cilindro rotativo.

A figura 6.2.2 ilustra um outro tipo de cilindro chamado cilindro de aleta giratória. Seu ângulo é limitado em 300° e apresentam problemas de vedação. São aplicados para girar peças, curvar tubos, acionar válvulas, etc.

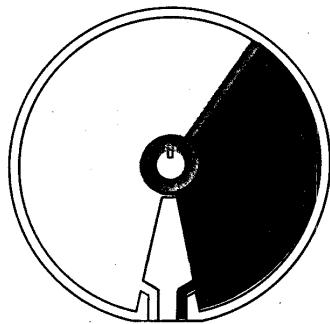


Figura 6.2.2 - Cilindro de aleta giratória.

### 6.3 Unidades Hidropneumáticas

A compressibilidade do ar não permite um posicionamento preciso dos cilindros pneumáticos bem como manter uma velocidade constante na presença de cargas variáveis. No entanto, em muitos casos não é conveniente usar um sistema hidráulico, pois apenas a alimentação pneumática está disponível na empresa. Nesse caso utilizam-se as unidades hidropneumáticas como mostrado na figura 6.3.1. O acionamento é pneumático, no entanto há um cilindro hidráulico que se desloca juntamente em paralelo, fornecendo a rigidez necessária ao movimento e aumentando a estabilidade da velocidade e posição do circuito pneumático. O circuito hidráulico pode ser ajustado através de um estrangulamento variável.

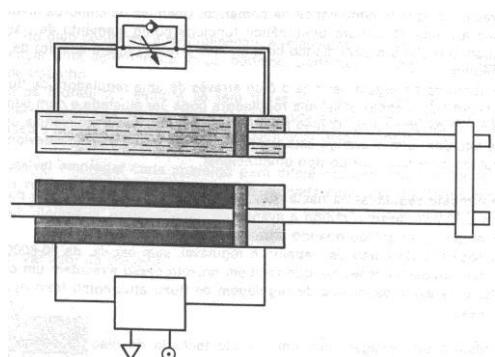


Figura 6.3.1 - Unidade hidropneumática.



## 6.4 Execução Prática de um Cilindro Pneumático

A figura 6.4.1 mostra a execução construtiva de um cilindro de dupla ação.

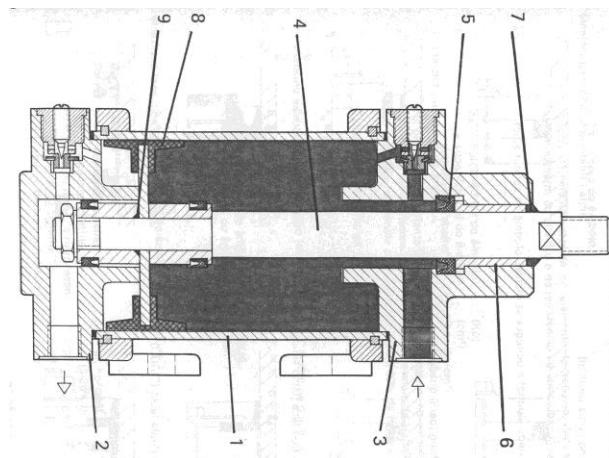


Figura 6.4.1 - Execução construtiva de um cilindro de dupla ação.

- 1- Camisa: feita de um tubo de aço trefilado a frio sem costura;
- 2 e 3 - Tampas de alumínio fundido;
- 4 - haste do êmbolo: feita de aço e pode ter proteção anti-corrosiva. As roscas são laminadas reduzindo o risco de ruptura;
- 5 - anel circular: responsável pela vedação da haste;
- 6 - bucha de guia: guia a haste;
- 7 - anel limpador: evita a entrada de impurezas;
- 8 - guarnição duplo lábio: veda ambos os lados do pistão;
- 9 - juntas tóricas ou "O-ring": atua como vedação.

A figura 6.4.2 descreve os diversos tipos de vedação usados no êmbolo além da guarnição duplo lábio mostrada acima.

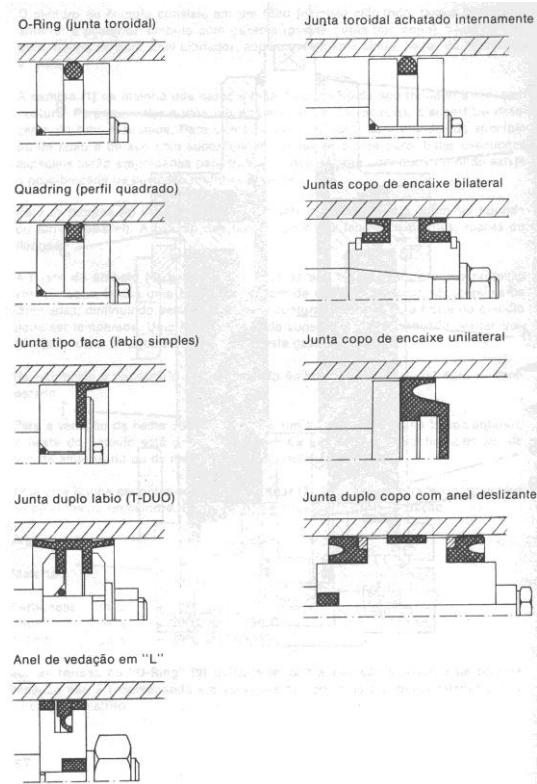


Figura 6.4.2 - Tipo de vedação para êmbolos.

A figura 6.4.3 ilustra as diversas montagens de fixação dos cilindros nas máquinas.

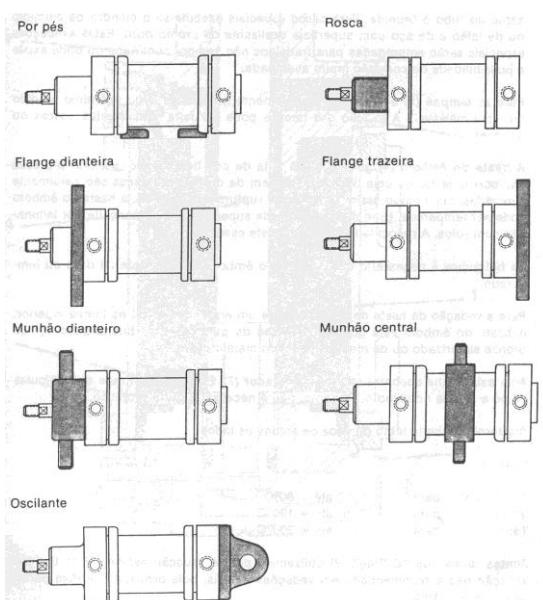
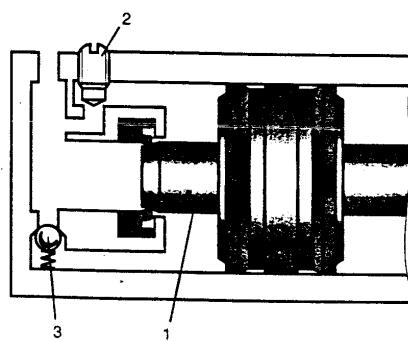


Figura 6.4.3 - Tipos de fixação dos cilindros nas máquinas.



## 6.5 Amortecimento de Fim de Curso

Na figura 6.5.1 está representado também um sistema de amortecimento que evita o impacto entre o êmbolo e a tampa. Esse sistema está melhor ilustrado na figura 6.5.2 abaixo.



1. Espiga de amortecimento
2. Estrangulamento
3. Válvula de retenção

Figura 6.5.2 - Sistema de amortecimento do cilindro.

Essencialmente, ao chegar próximo do final do curso a haste (1) obstrui o canal principal de saída do ar que é obrigado a passar pelo estrangulamento (2) amortecendo assim o movimento do êmbolo. No sentido oposto, o ar passa pela válvula de retenção (3) exercendo pressão sobre toda a área do êmbolo e movendo-o.

## 6.6 Dimensionamento e Características de um Cilindro Pneumático

A seguir são resolvidos alguns exercícios ilustrando o dimensionamento de um cilindro pneumático.



### 6.6.1 Exercícios

#### Exercício 6.6.1.1

Considerando o cilindro de dupla ação mostrado na figura 6.6.1.1 e dado as informações abaixo, calcule a força exercida pelo cilindro nos dois sentidos e a vazão  $V_0$  em condições normais.

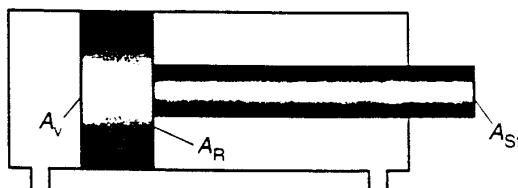


Figura 6.6.1.1 - Cilindro de dupla ação.

Diâmetro do êmbolo  $d_1$ : 63 mm

Diâmetro da haste  $d_2$ : 20 mm

Curso  $h$ : 500 mm

Volume adicional  $V_T$ : 30 cm<sup>3</sup>

Pressão de trabalho  $p_1$ : 6 bar

Número de cursos  $n$ : 20/min

Temperatura  $T_1$ : 30°C

Solução:  $P_a=6+1=7$  bar

$$A_{embolo} = \frac{\pi D^2}{4} = 31,2 \text{ cm}^2 = A_e; \quad A_{emb-haste} = \frac{\pi (D^2 - d^2)}{4} = 28 \text{ cm}^2 = A_H$$

Força de avanço:  $F_v = P_a * A_e - P_{atm} * A_H \equiv (P_a - 1)A_e = P_e * A_e = 60(\text{N/cm}^2) * 31,2 \text{ cm}^2 = 1872 \text{ N}$

Força de retorno:  $F_R = P_a * A_H - P_{atm} * A_e \equiv (P_a - 1)A_H = P_e * A_H = 60(\text{N/cm}^2) * 28 \text{ cm}^2 = 1680 \text{ N}$

Volume de ar no avanço:  $V_v = A_e * h + V_T$ , onde  $V_T$  é o volume adicional ou morto, ou seja, a soma dos volumes de pequenos espaços dentro do atuador além do cilindro.

Deve ser considerado no avanço e no retorno. Assim:

$$V_v = (A_e * h + V_T) * n = (1590 \text{ cm}^3/\text{ciclo}) * 20 = 31800 \text{ cm}^3/\text{min} = 31,8 \text{ l/min}$$

$$\text{No retorno: } V_R = (A_H * h + V_T) * n = (1400 \text{ cm}^3/\text{ciclo}) * 20 = 28000 \text{ cm}^3/\text{min} = 28 \text{ l/min}$$

Portanto o consumo de ar total à 7bar e 30°C é  $V_{total} = 31,8 + 28 = 59,8 \text{ l/min}$



$$\text{À 1 bar e } 20^\circ\text{C: } V_{1\text{bar}} = \frac{7\text{bar} * 59,8 * (273 + 20)}{(273 + 30) * 1\text{bar}} = 404,78 \text{ l/min}$$

### Exercício 6.6.1.2

Considere o cilindro de dupla ação mostrado na figura 6.6.1.2 e dado as informações abaixo.

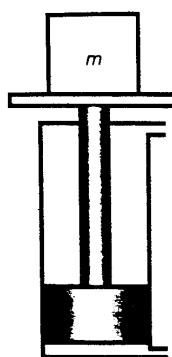


Figura 6.6.1.2 - Cilindro de dupla ação.

Diâmetro do êmbolo $d_1$	63 mm
Diâmetro da haste $d_2$	20 mm
Pressão de trabalho $p_e$	6 bar (relativa)
Curso h	500 mm

Esse cilindro deve elevar verticalmente uma massa de 48 Kg por um curso de 1m, imprimindo uma aceleração de  $10\text{m/s}^2$ . Qual o diâmetro de êmbolo necessário, com uma pressão relativa máxima de trabalho de 5 bar ( $50 \text{ N/cm}^2$ ) supondo um rendimento de 0,9?

Solução:

Força total no êmbolo:  $F_V = F_G + F_A$

Força da gravidade:  $F_G = m * g = (48 \text{ Kg}) * (9,81 \text{ m/s}^2) = 470 \text{ N}$

Força de aceleração:  $F_A = m * a = (48 \text{ Kg}) * (10\text{m/s}^2) = 480 \text{ N}$

Força teórica sem atrito:  $F_{V1} = 950 \text{ N}$



$$\text{A força efetiva vale: } F_V = \frac{F_{V1}}{\eta} = \frac{950}{0,9} = 1055N$$

$$\text{A área e diâmetro do êmbolo valem: } A = \frac{F_V}{P} = \frac{1055}{50} = 21,1 \text{ cm}^2$$

$$\text{e } d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = 5,2\text{cm} = 52\text{mm}, \text{ mas o diâmetro mais próximo no catálogo é 63mm.}$$

### 6.6.2 Flambagem nos cilindros

Outro ponto importante a se considerar no dimensionamento dos cilindros é a questão da flambagem da haste que é crítica para grandes cursos. A força crítica de flambagem ( $F_{crit}$ ) é dada pela equação:

$$F_{crit} = \frac{\pi^2 E J}{S_k C} \text{ onde } J = \frac{\pi d^4}{64} \quad (6.6.2.1)$$

onde  $E$  é o módulo de elasticidade,  $J$  o momento de inércia da haste,  $d$  o diâmetro da haste,  $C$  um coeficiente de segurança (2,5 a 5).  $S_k$  é o comprimento total livre definido na figura 6.6.2.1 para diferentes montagens do pistão, e  $L$  é o comprimento real submetido a flambagem. Os fabricantes fornecem gráficos da carga crítica (em termos de pressão) em função do curso, e diâmetro do cilindro.

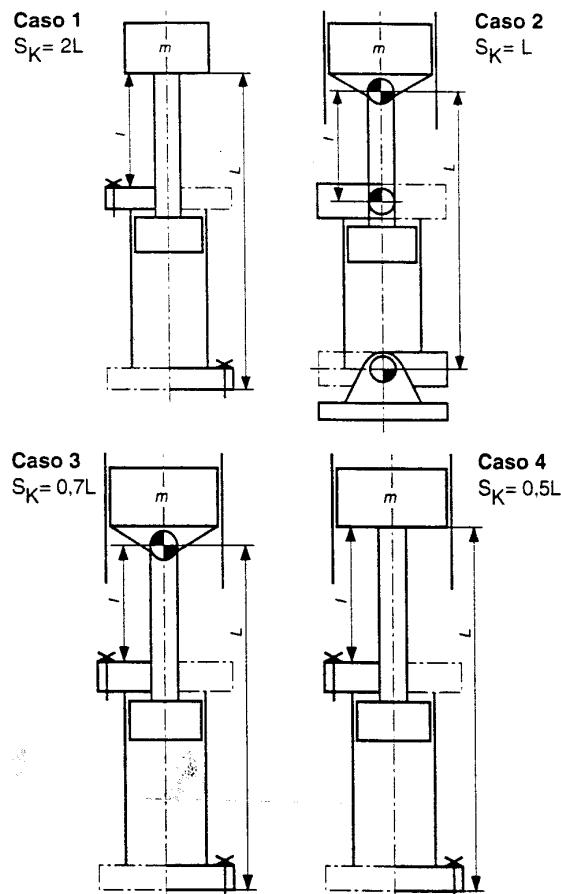


Figura 6.6.2.1 - Condições de flambagem no cilindro.



## 7. Outros Dispositivos Pneumáticos

### 7.1 Mesa Pneumática

A figura 7.1.1 ilustra uma mesa pneumática ou “almofada de ar”. Essencialmente, consiste numa chapa de metal com dutos no seu interior que direcionam o fluxo de ar para a região de contato entre a chapa e o solo. Muito útil para reduzir o atrito no transporte de altas cargas sendo também muito utilizada em máquinas de precisão (mesas de medição).

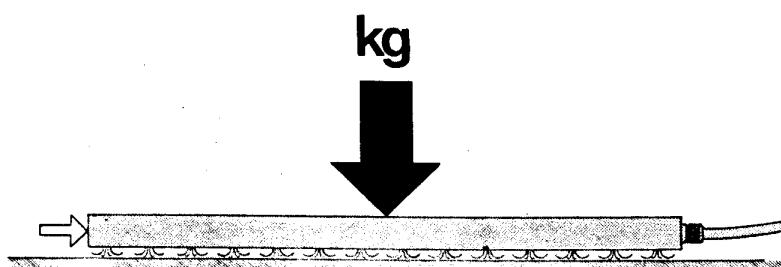


Figura 7.1.1 - Mesa pneumática.

### 7.2 Pinça Pneumática

A figura 7.2.1 ilustra um dispositivo que atua como uma pinça em máquinas ferramentas para prender a ferramenta de usinagem. Trata-se essencialmente de um pistão de simples ação. Permite a fixação rápida e com grandes forças da ferramenta.

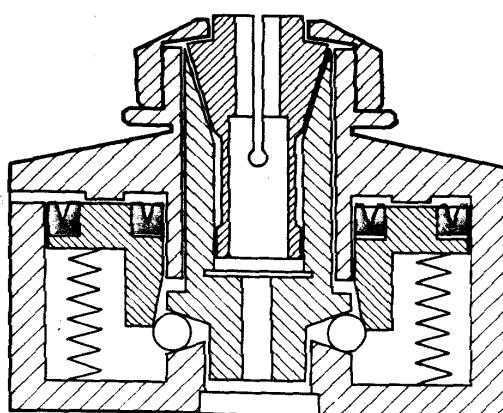


Figura 7.2.1 - Pinça pneumática.



## 8. Motores Pneumáticos

São responsáveis por transformar energia pneumática em trabalho mecânico realizando a operação inversa dos compressores. A figura 8.1 ilustra a classificação dos motores pneumáticos.

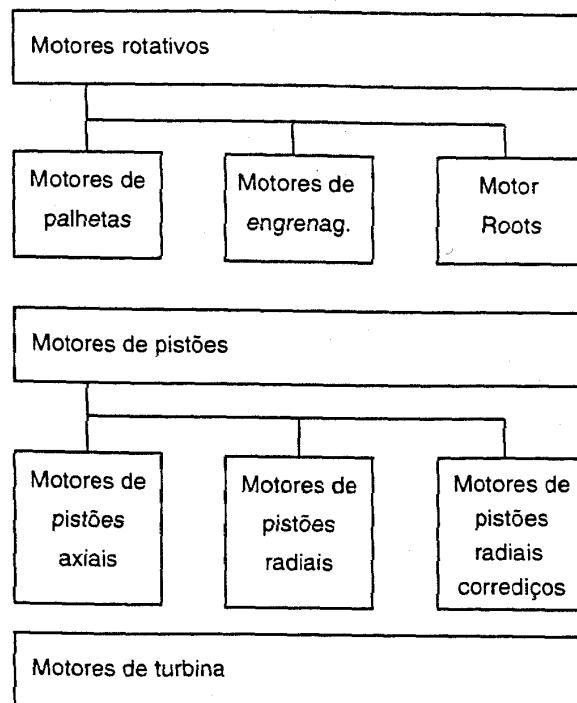


Figura 8.1 - Classificação dos motores pneumáticos.

Entre as características dos motores pneumáticos temos:

- Inversão simples e direta do sentido de rotação;
- Regulagem progressiva de rotação e torque.
- Alta relação peso/potência;
- Possibilidade de operação com outros fluidos.

O gráfico da figura 8.2 indica a curva de torque (M) e potência (P) em função da rotação (n) de um motor pneumático.

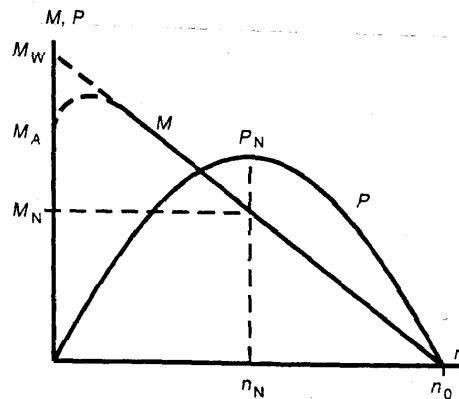


Figura 8.2 - Curva de torque e potência em função da rotação dos motores pneumáticos.

onde  $n_N$  é a rotação nominal,  $n_0$  a rotação em vazio,  $M_N$  o torque nominal,  $M_A$  o torque de arranque,  $M_w$  o torque de parada por sobrecarga e  $P_N$  a potência nominal. Dado que o torque varia linearmente com a rotação, ou seja:

$$M = M_w \left( 1 - \frac{n}{n_0} \right) \quad (8.1.1)$$

a potência será quadrática com a rotação, ou seja:

$$P = Mn = M_w \left( n - \frac{n^2}{n_0} \right) \quad (8.1.2)$$

e portanto existe uma rotação que nos dá a potência máxima, que é a rotação nominal.

Entre os critérios para a escolha de um motor pneumático temos:

- Torque necessário sob carga e no arranque;
- Rotação com carga correspondente;
- Desvio admissível da rotação com variação de carga;
- Consumo de ar e rendimento.

A construção mecânica desses motores é similar a dos compressores pneumáticos já descrita. A seguir são descritos brevemente cada tipo de motor.



## 8.1 Motores Rotativos

### 8.1.1 Motor de Palhetas

A figura 8.1.1.1 ilustra um motor de palhetas. Seu funcionamento é exatamente o oposto do compressor de palhetas. A expansão do ar nas câmaras entre as palhetas também é aproveitada na realização de trabalho mecânico. A rotação é facilmente invertida dependendo da entrada do ar. A faixa de rotação de um motor de palheta varia de 200 rpm até 10000 rpm e a de potência varia de 50W até 20 kW. É muito usado em parafusadeiras pneumáticas.

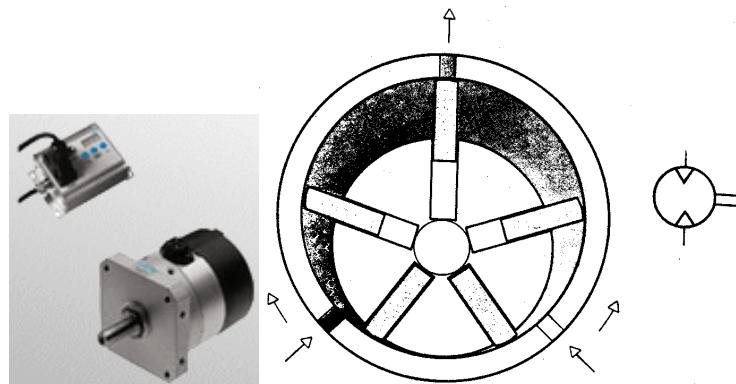


Figura 8.1.1.1 - Motor de palhetas.

### 8.1.2 Motor de Engrenagens e Motor Roots

A geração do torque ocorre pela pressão do ar exercida nos flancos dos dentes de duas engrenagens engrenadas. Uma engrenagem está fixa ao eixo e a outra livre. Podem ser fabricados com dentes retos, helicoidais ou em "V". Nos motores de dentes retos não há aproveitamento da expansão de volume de ar. A faixa de rotação varia de 1000 r.p.m. à 3000 r.p.m. e a faixa de potência vai até 70 kW. O motor roots apresenta o mesmo princípio sendo de igual construção ao compressor roots.



## 8.2 Motores de Pistões

Entre as características desse motor temos:

- Elevado torque de arranque e na faixa de rotação;
- Baixa rotação (até 5000 r.p.m.);
- Faixa de potência varia de 2W até 20 kW;
- Comando de fornecimento de ar por distribuidor rotativo.

A figura 8.2.1 ilustra um motor de pistões radiais em execução estrela onde a transformação do movimento linear do pistão ocorre por um mecanismo biela-manivela (como no motor de automóvel). São utilizados em equipamentos de elevação.

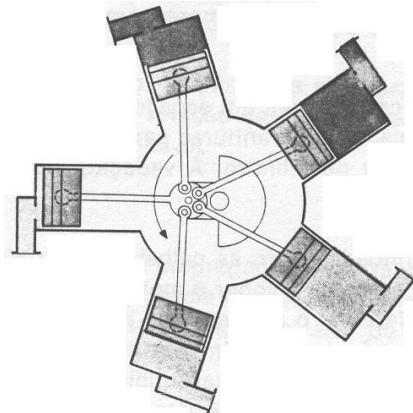


Figura 8.2.1 - Motor de pistões radiais.

A figura 8.2.2 ilustra um motor de pistões axiais onde a transformação ocorre por disco oscilante como ilustrado na figura 8.2.3. Esse motor apresenta uniformidade no movimento de rotação com um funcionamento silencioso e sem vibrações, sendo utilizado em equipamentos de elevação.

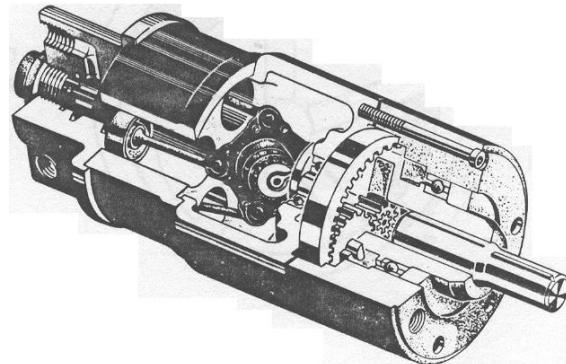


Figura 8.2.2 - Motor de pistões axiais.

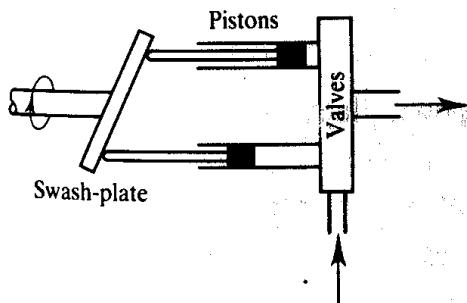


Figura 8.2.3 - Esquema de funcionamento do motor de pistões axiais.

### 8.3 Motores de Turbina

Opera de forma contrária ao turbo-compressor, ou seja, a energia cinética do ar é convertida em movimento rotativo. Apresentam péssimo rendimento devido às altas perdas de ar, sendo econômico apenas para baixas potências, no entanto são capazes de atingir rotações elevadíssimas com baixo torque que variam de 80.000 r.p.m. até 400.000 r.p.m. Para baixas rotações e altos torques não é vantajoso a sua utilização pois necessita de ser acoplado a um redutor.

Uma aplicação clássica é a "broca do dentista" que chega atingir 500.000 r.p.m.. Também usado em fresadoras e retificadoras de alta rotação.



## 9. Válvulas Pneumáticas

As válvulas comandam e influenciam o fluxo de ar comprimido. Existem quatro tipos de válvulas:

- Válvulas Direcionais: comandam a partida, parada e sentido de movimento do atuador;
- Válvulas de Bloqueio: bloqueiam o fluxo de ar preferencialmente num sentido e o liberam no sentido oposto;
- Válvulas de Fluxo: influenciam a vazão de ar comprimido;
- Válvulas de Pressão: influenciam a pressão do ar comprimido ou são comandadas pela pressão.

A figura 9.1 ilustra um esquema envolvendo um cilindro, uma válvula de fluxo e uma válvula direcional.

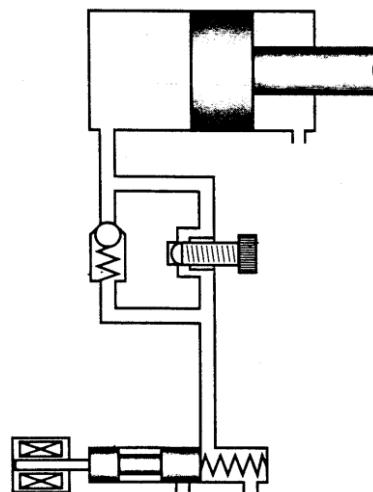


Figura 9.1 - Esquema de um cilindro com válvulas.

As válvulas são representadas por símbolos gráficos. A figura 9.2 ilustra como o símbolo é usado para representar a comutação de uma válvula direcional. O símbolo é formado por dois “quadrados”, cada um representando uma posição da válvula. Assim na posição de “retorno” a câmara do pistão está ligada na atmosfera enquanto que na posição de avanço a rede está alimentando o pistão.

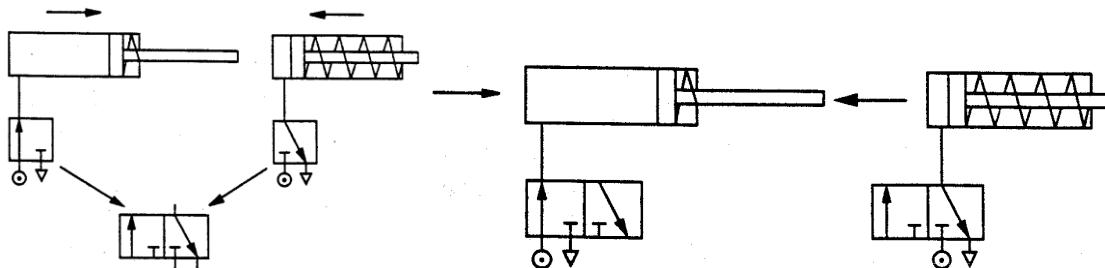


Figura 9.2 - Símbologia de comutação da válvula.

Essa válvula possui duas posições de comutação e 3 conexões, sendo por isso, chamada válvula 3/2 vias. Assim a nomenclatura das válvulas obedece à seguinte regra: uma válvula m/n vias significa que é uma válvula que possui m conexões e n posições de comutação. A tabela 9.1 ilustra diversos tipos de válvulas direcionais.

Tabela 9.1 - Tipos de válvulas direcionais.

	Válvula 2/2 vias fechada no repouso
	Válvula 2/2 vias aberta no repouso
	Válvula 3/2 vias fechada no repouso
	Válvula 3/2 vias aberta no repouso
	Válvula 4/2 vias
	Válvula 5/2 vias
	Válvula 4/3 vias com posição central bloqueada
	Válvula 4/3 vias com posição central para escape
	Válvula 5/3 vias com posição central bloqueada
	Válvula 5/3 vias com posição central para escape



Diferentes configurações mecânicas de válvulas podem ser representadas por um símbolo se possuírem a mesma função.

A tabela 9.2 indica a notação para se denominar as conexões das válvulas.

Tabela 9.2 - Denominação das conexões das válvulas.

Indicações das conexões	Letra	Número
Conexões de serviço	A, B ...	2, 4 ...
Conexão de pressão	P	1
Descompressão e tubulações ao reservatório	R, S, T	3, 5
Conexões de dreno de óleo	L	-
Conexões de pilotagem	Z, X, Y	10, 12, 14

## 9.1 Válvulas Direcionais

### 9.1.1 Princípio de Funcionamento

A figura 9.1.1 ilustra o funcionamento de uma válvula 3/2 vias acionada por botão e com retorno por mola, mostrando a sua posição de repouso e a posição acionada.

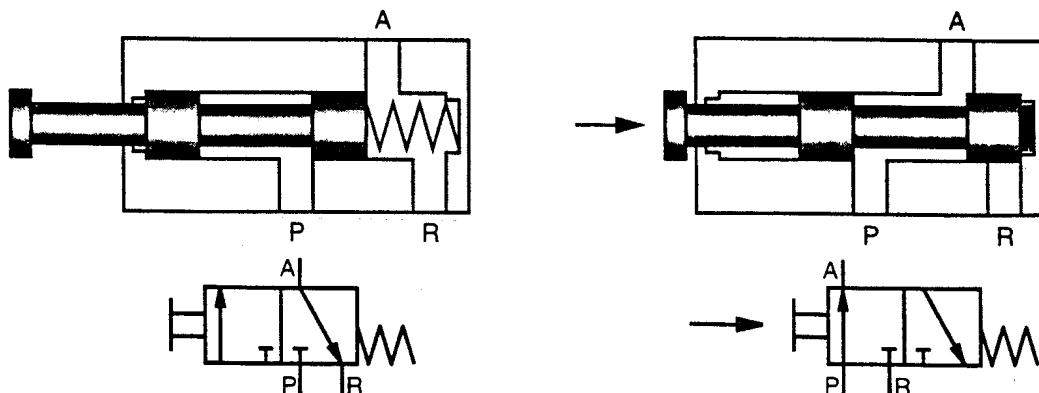


Figura 9.1.1 – Funcionamento de uma válvula 3/2 vias acionada por botão e com retorno por mola.

### 9.1.2 Acionamento das Válvulas Direcionais

As válvulas direcionais podem ser acionadas de forma manual, mecânica, pneumática e elétrica como mostrado na figura abaixo.

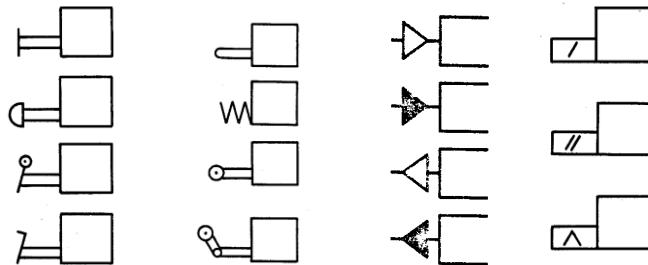


Figura 9.1.2 - Tipos de acionamento manual, mecânico, pneumático e elétrico.

As válvulas com acionamento elétrico são usadas em eletropneumática.

### 9.1.3 Execução Construtiva das Válvulas

Existem dois tipos de execução construtiva de válvulas: válvulas de assento e válvulas de êmbolo deslizante.

#### 9.1.3.1 Válvulas de assento

A execução em assento é ilustrada na figura 9.1.3.1.

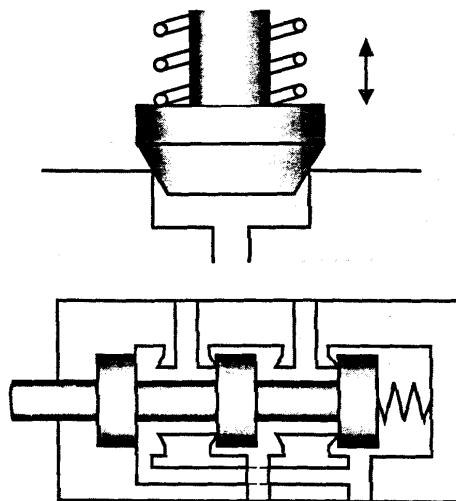


Figura 9.1.3.1 - Execução em assento.

Entre as características da execução em assento temos:

- Estanqueidade perfeita;



- Requerem elevadas forças de acionamento devido ao diâmetro do seu êmbolo;
- Comutam rapidamente com curso reduzido;
- Insensíveis à impureza;
- Comutam de modo brusco (devido à variação brusca de área do êmbolo).

#### 9.1.3.2 Válvulas de êmbolo deslizante

A execução em êmbolo é ilustrada na figura 9.1.3.2.

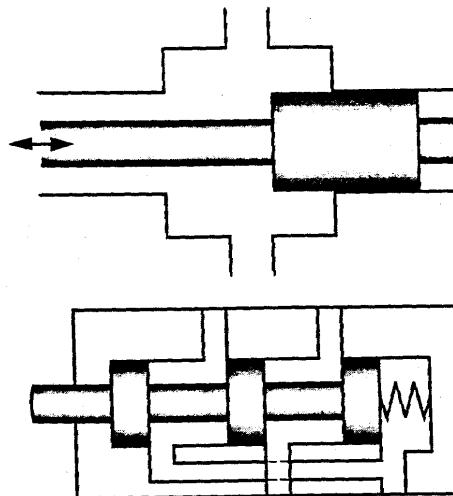


Figura 9.1.3.2 - Execução em êmbolo.

Entre as características da execução em êmbolo temos:

- Construção simples e pequeno volume construtivo;
- Estanqueidade condicional (depende da pressão);
- Requer pequena força de acionamento devido ao diâmetro do seu êmbolo;
- Curso de comutação longo;
- Sensíveis à impureza;



#### 9.1.4 Exaustão Cruzada

Ocorre quando há comunicação simultânea entre todas as conexões durante a comutação por apenas alguns segundos. Isto provoca escape de ar que não é usado no trabalho. A figura 9.1.4.1 ilustra uma válvula 3/2 vias com execução de assento que apresenta exaustão cruzada.

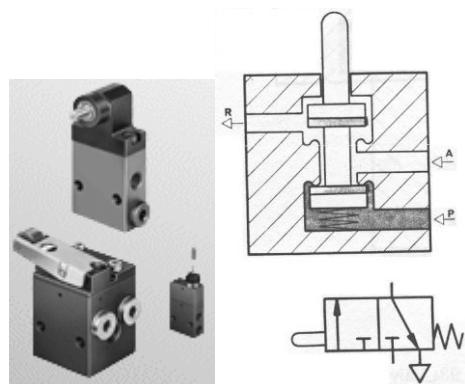


Figura 9.1.4.1 - Válvula 3/2 vias com exaustão cruzada. A parte escura representa ar.

A forma de evitar isso é alterando o mecanismo da válvula. A figura 9.1.4.2 ilustra uma válvula 3/2 vias que não apresenta exaustão cruzada.

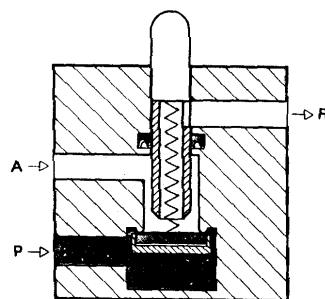


Figura 9.1.4.2 - Válvula 3/2 vias sem exaustão cruzada. A parte escura representa ar.

#### 9.1.5 Tipos de Válvulas Direcionais

As válvulas pneumáticas podem ser pré-operadas pneumaticamente. Nesse caso, o impulso de comando não é efetuado sobre a válvula principal, mas sobre uma válvula de pilotagem adicional, que por sua vez aciona a válvula principal através da pressão do



ar. Com isso se reduz a força de acionamento necessária. É usada em válvulas de assento que requerem elevadas forças de acionamento ou em válvulas de comando eletromagnético, para poder utilizar pilotos elétricos de pequenas dimensões. Os tempos de comutação são mais longos e necessitam uma fonte de pressão. A figura 9.1.5.1 ilustra esse tipo de válvula na execução de assento e sua representação no circuito pneumático.

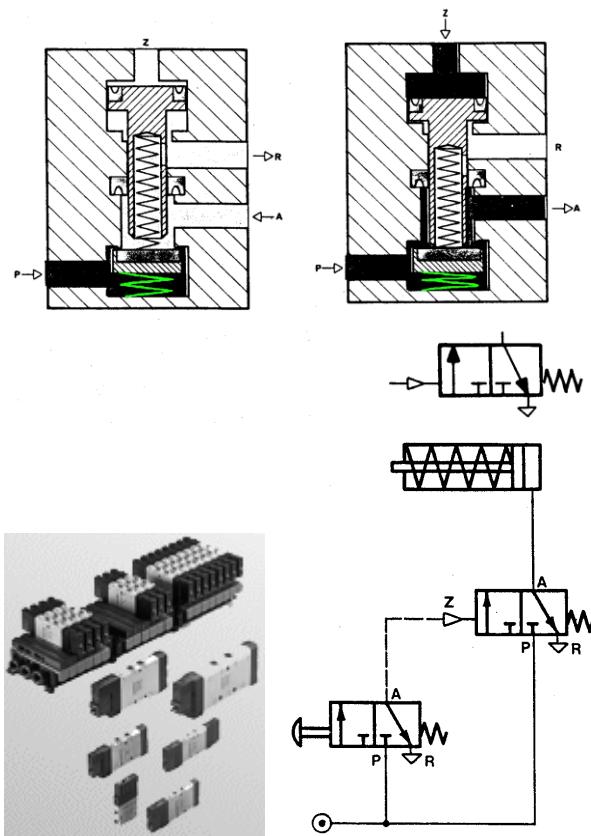


Figura 9.1.5.1 - Válvula 3/2 vias com acionamento pneumático e exemplo de circuito. A parte escura representa ar.

A figura 9.1.5.2 ilustra um outro tipo de válvula acionada pneumáticamente chamada “bi-estável” que trabalha segundo o princípio de assento flutuante. Esta válvula é comutada alternadamente por impulsos, mantendo a posição de comando até receber um novo impulso (bi-estável). O pistão de comando se desloca no sistema de corrediça.

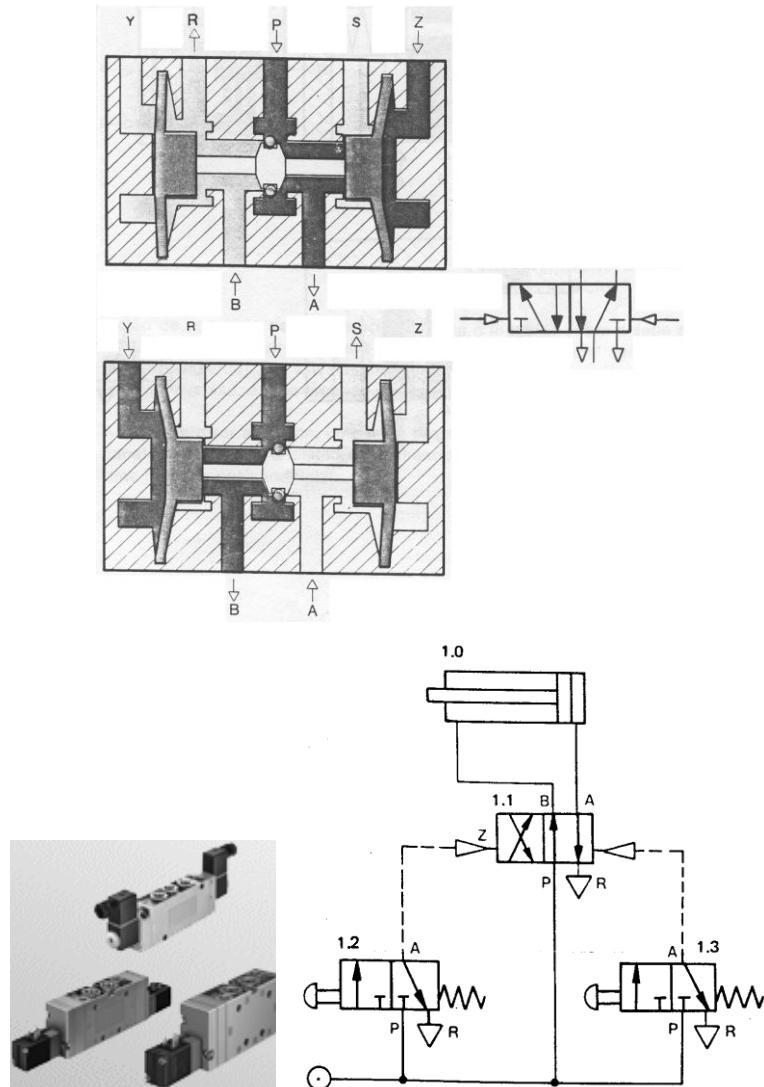


Figura 9.1.5.2 - Válvula 5/2 vias bi-estável e exemplo de circuito. A parte escura representa ar.

Esse tipo de válvula é muito utilizado em pneumática. A figura 9.1.5.2 também ilustra o uso dessa válvula no circuito pneumático.

A figura 9.1.5.3 ilustra uma válvula direcional 3/2 vias servo-comandada. Consiste num sistema mecânico que aciona um sistema pneumático que aciona a válvula principal. A força para acionamento do sistema mecânico está em torno de 1,8 N.

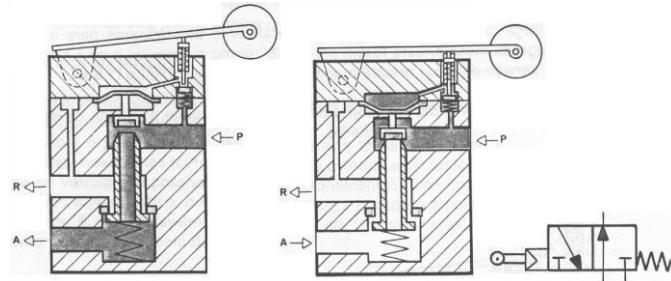


Figura 9.1.5.3 - Válvula 3/2 vias servo-comandada.

Acionando-se a alavanca do rolete abre-se a válvula de servo-comando. O ar comprimido flui para a membrana e movimenta o prato da válvula principal para baixo. A comutação da válvula se efetua em duas etapas. Primeiro, fecha-se a passagem de A para R, depois abre-se a passagem de P para A. O retorno efetua-se ao soltar a alavanca do rolete. Isto provoca o fechamento da passagem do ar para a membrana e posterior exaustão. A figura 9.1.5.4 ilustra uma válvula 3/2 vias servo-comandada acionada por botão.

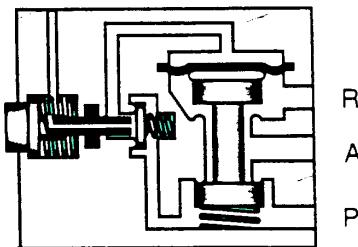


Figura 9.1.5.4- Válvula 3/2 vias servo-comandada acionada por botão.

A figura 9.1.5.5 ilustra uma válvula 5/2 vias de êmbolo deslizante acionada pneumaticamente.

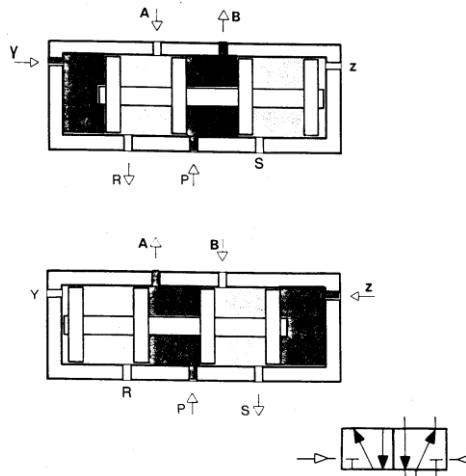


Figura 9.1.5.5 – Válvula 5/2 vias de êmbolo acionada pneumáticamente.

A figura 9.1.5.6 ilustra duas válvulas 3/2 vias acionadas por solenóide (acionamento eletromagnético) que são usadas em eletropneumática.

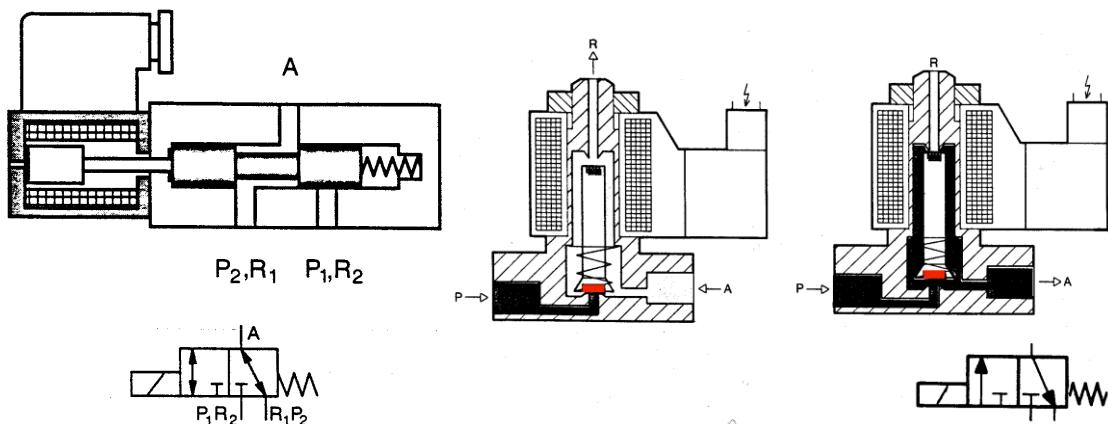


Figura 9.1.5.6 - Válvulas 3/2 vias acionadas por solenóide.

### 9.1.6 Especificação das Válvulas Direcionais

A válvulas são especificadas mediante o valor nominal de vazão de ar ( $Q_N$ ). O valor de  $Q_N$  é um valor de aferição para pressão de 6 bar, relacionado com uma queda de pressão de 1 bar na válvula e uma temperatura de 20°C e está especificado no catálogo do fabricante. A vazão da válvula nas condições de operação deve ser



calculada usando-se gráficos fornecidos pelos fabricantes. Além da vazão nominal deve-se especificar o tamanho das conexões.

## 9.2 Válvulas de Bloqueio

### 9.2.1 Válvula de Retenção

Essas válvulas permitem o fluxo livre num sentido e bloqueiam completamente o fluxo no sentido oposto. São construídas na execução de assento com mola como mostrado na figura 9.2.1.1. São muito usadas em conjunto com uma válvula de fluxo para ajustar a velocidade dos atuadores pneumáticos (ver adiante).

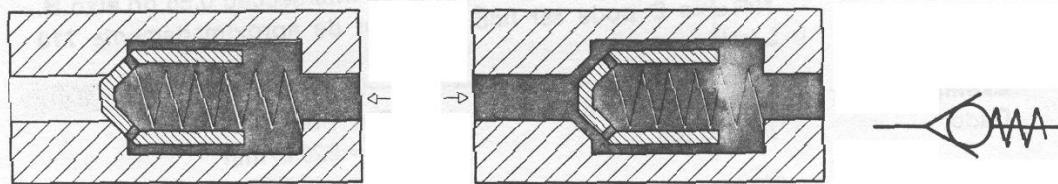


Figura 9.2.1.1 - Válvula de retenção.

### 9.2.2 Válvula Alternadora (“OU”)

A figura 9.2.2.1 ilustra esse tipo de válvula (e seu símbolo) que é equivalente ao elemento lógico "OU" da eletrônica digital. Ela somente fornece sinal de saída quando pelo menos tiver um sinal de pressão numa conexão de entrada. É usada quando se deseja acionar o atuador pneumático por dois tipos de válvulas como mostrado na figura 9.2.2.1.

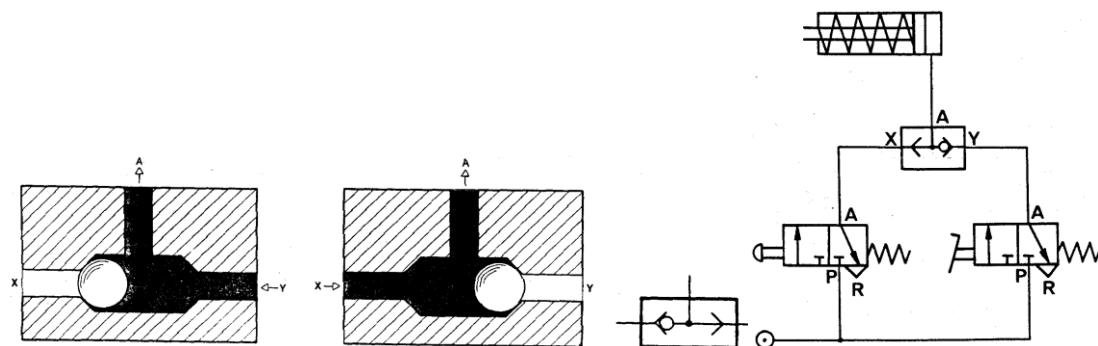


Figura 9.2.2.1 - Válvula alternadora e exemplo de circuito.



### 9.2.3 Válvula de Duas Pressões ("E")

A figura 9.2.3.1 ilustra esse tipo de válvula (e seu símbolo) que é equivalente ao elemento lógico "E" da eletrônica digital. Somente fornece saída em A quando existirem dois sinais de entrada  $P_x$  e  $P_y$  simultâneos e de mesmo valor. Existindo diferença de tempo nos sinais de entrada  $P_x$  e  $P_y$ , o sinal atrasado vai para saída. Quando há diferença de pressão dos sinais de entrada, a pressão maior fecha um lado da válvula e a pressão menor vai para a saída A. É muito usada em comandos de segurança quando se deseja que o atuador seja acionado somente quando duas válvulas são pressionadas simultaneamente como mostrado no circuito da figura 9.2.3.1.

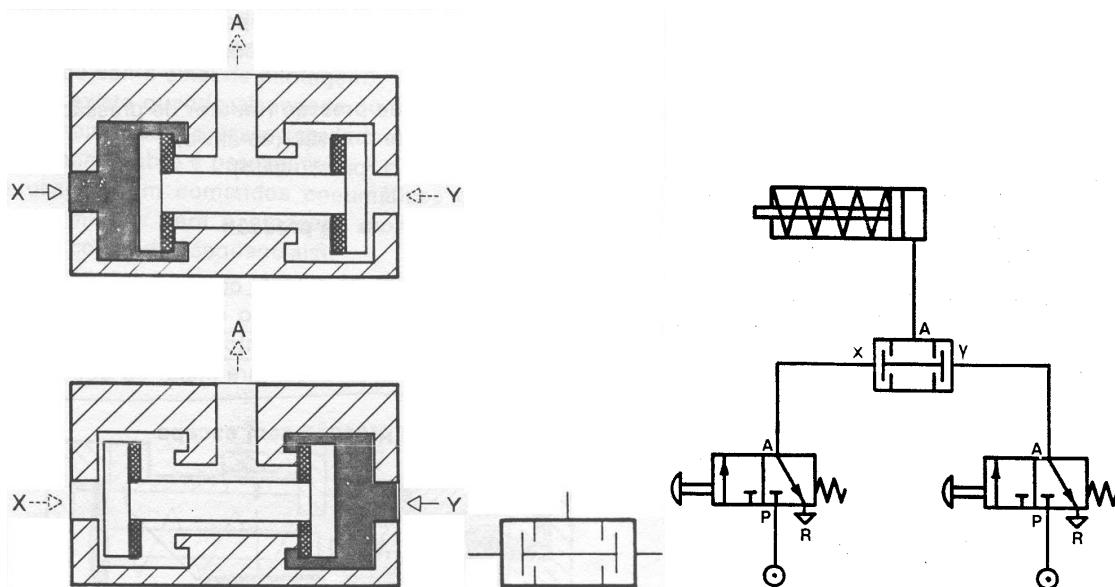


Figura 9.2.3.1 - Válvula de duas pressões.

### 9.2.4 Válvula de Escape Rápido

A figura 9.2.4.1 ilustra esse tipo de válvula e seu símbolo. Através dessa válvula é possível exaurir grandes volumes de ar comprimido aumentando a velocidade dos cilindros. Quando há pressão em P o elemento de vedação adere ao assento do escape e



o ar atinge a saída para o atuador. Quando a pressão em P deixa de existir, o ar que agora retorna pela conexão A, movimenta o elemento de vedação contra a conexão P e provoca o seu bloqueio (ver figura 9.2.4.1). Dessa forma o ar pode escapar por R rapidamente para a atmosfera, evitando que o ar passe por uma canalização longa e de diâmetro pequeno que reduze o seu fluxo. Essa válvula é colocada diretamente na saída do cilindro como mostrado na figura 9.2.4.1.

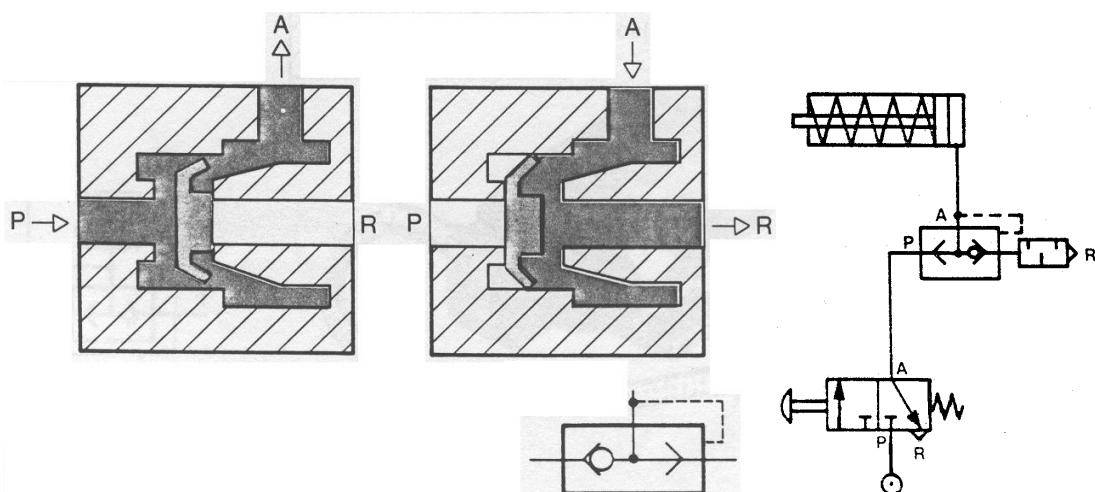


Figura 9.2.4.1 - Válvula de escape rápido.

### 9.3 Válvulas de Fluxo

Essas válvulas reduzem a seção de passagem para modificar a vazão do ar comprimido e assim controlar a velocidade dos atuadores. Para uma dada seção de passagem a vazão depende somente da diferença de pressão entre as duas extremidades da seção. A figura 9.3.1 ilustra os diferentes tipos de seção de passagem e seus símbolos.

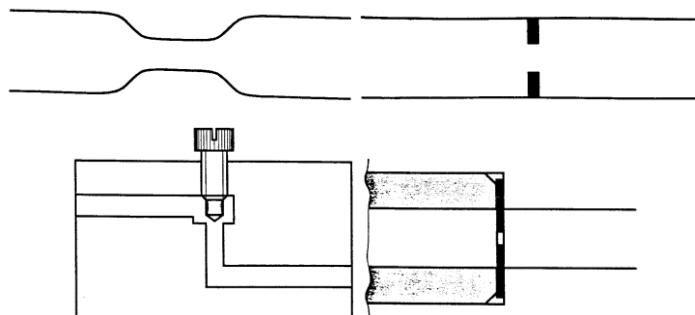


Figura 9.3.1 - Seções de passagem.

### 9.3.1 Válvula Reguladora Unidirecional

Trata-se da combinação em paralelo de uma válvula estranguladora variável e uma válvula de retenção. É usada quando se deseja regular o fluxo num único sentido. A figura 9.3.1.1 ilustra essa válvula, seu símbolo e sua montagem no circuito pneumático.

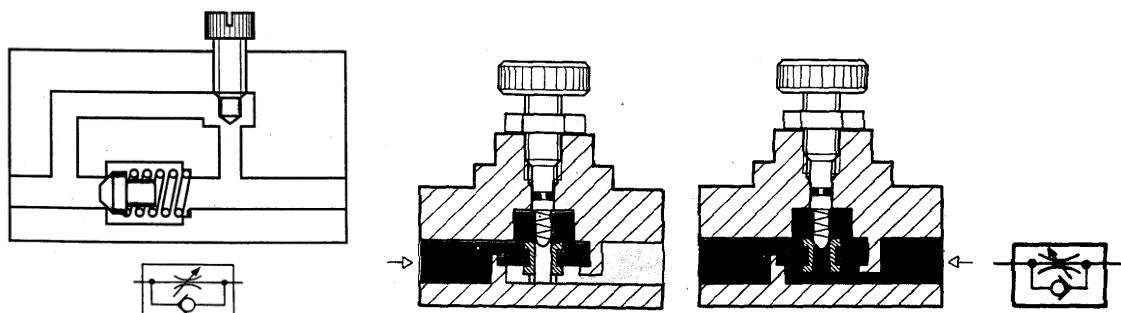


Figura 9.3.1.1 - Válvula reguladora de fluxo unidirecional.

A figura 9.3.1.2 ilustra um detalhe de montagem dessa válvula no circuito do atuador. Na montagem do circuito da esquerda somente um lado do pistão está submetido à pressão do ar, assim se ocorrer uma aplicação de carga brusca na haste do pistão (tração ou compressão) o mesmo irá se mover (a válvula de retenção permite o fluxo fácil de ar), ou seja, esse tipo de circuito não dá rigidez ao movimento da haste. Já no circuito da direita ambos os lados do pistão estarão sob pressão, pois o estrangulamento impõe uma perda de carga para a saída de ar do pistão. Assim esse



círculo dá mais rigidez ao movimento do pistão que não fica sujeito à oscilações devido a variações da carga.

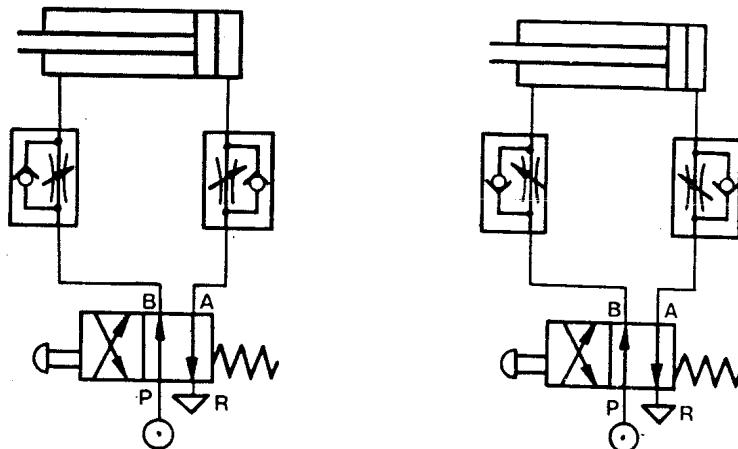


Figura 9.3.1.2 - Diferentes montagens da válvula reguladora no circuito pneumático.

### 9.3.2 Válvulas de Fechamento

São essencialmente "torneiras" pneumáticas que bloqueiam manualmente o fluxo de ar. A figura 9.3.2.1 ilustra esse tipo de válvula cuja construção é similar a torneira hidráulica doméstica.

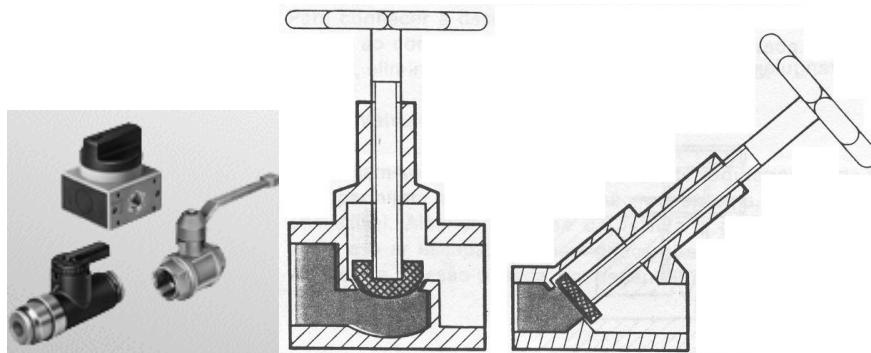


Figura 9.3.2.1 - Válvula de fechamento.



## 9.4 Válvulas de Pressão

### 9.4.1 Válvula Regulador de Pressão

Essa válvula é usada para limitar a pressão que alimenta um equipamento pneumático já tendo sido explicada no ítem 5.6.2.

### 9.4.2 Válvula Limitadora de Pressão

São utilizadas como válvulas de segurança ou alívio contra sobrepressões. A figura 9.4.2.1 ilustra esse tipo de válvula. No momento em que um valor de pressão pré-estabelecido é superado, abre-se uma passagem no interior da válvula contra a pressão de uma mola e o ar comprimido é exaurido para atmosfera.

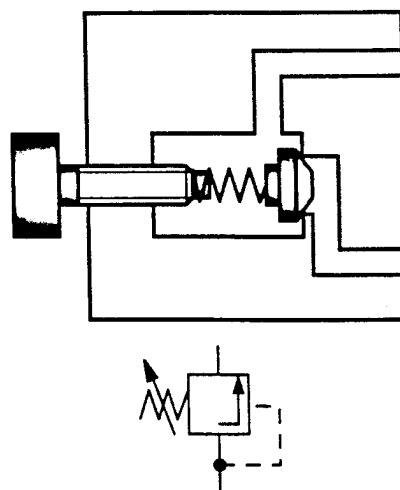


Figura 9.4.2.1 - Válvula limitadora de pressão.

### 9.4.3 Conversores pneumático-elétrico ou pressostatos

Serve para transformar um sinal de entrada pneumático num sinal de saída elétrico. Em geral a pressão age sobre um êmbolo (ou membrana) que se desloca efetuando o contato. A regulagem da pressão em que o contato ocorre é feita regulando-se a distância entre que o êmbolo deve mover para realizar o contato. A figura 9.4.3.1 ilustra um pressostato de calibragem fixa e um variável.

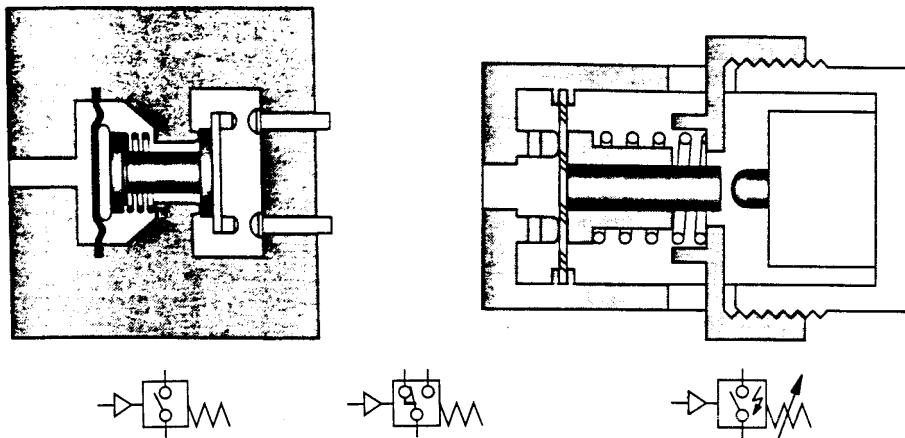


Figura 9.4.3.1 - Pressostatos de calibragem fixa e variável.

## 9.5 Regulagem dos compressores

Para combinar o volume de fornecimento com o consumo de ar é necessária uma regulagem dos compressores. Em geral os sistemas de regulagem envolvem o uso de válvulas pneumáticas como mostrado adiante. Dois valores limites pré-estabelecidos de pressão máxima/mínima influenciam o volume de ar fornecido. Existem três tipos de regulagem descritos a seguir.

### 9.5.1 Regulagem de marcha vazio

- Regulagem por descarga

Quando alcançada a pressão regulada, o ar escapa livre da saída do compressor através de uma válvula limitadora de pressão como mostrado na figura 9.5.1.1. Uma válvula de retenção evita que o reservatório se esvazie ou retorne para o compressor.

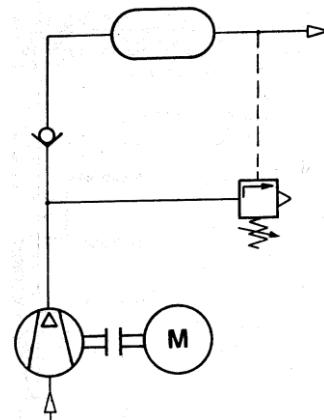


Figura 9.5.1.1 - Regulagem por descarga.

- Regulagem por fechamento

Nesta regulagem se fecha o lado da sucção como mostrado na figura 9.5.1.2. O compressor não pode mais aspirar e funciona em vazio. Esta regulagem é encontrada em compressores rotativos e de êmbolo.

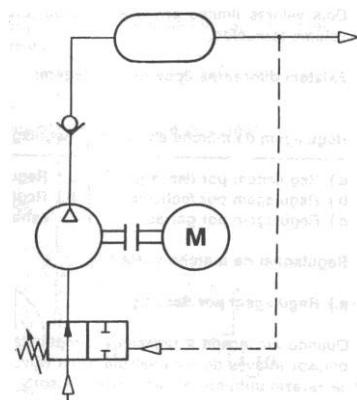


Figura 9.5.1.2 - Regulagem por fechamento.

- Regulagem por garras

É empregada em compressores de êmbolo. Mediante garras, mantém-se aberta a válvula de sucção, evitando que o compressor continue comprimindo como mostrado na figura 9.5.1.3.

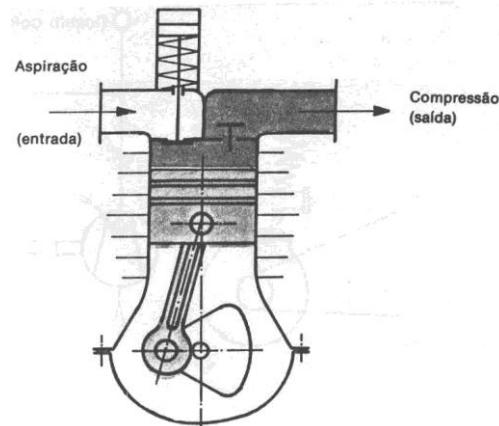


Figura 9.5.1.3 - Regulagem por garras.

### 9.5.2 Regulagem de carga parcial

- Regulagem na rotação

Ajusta-se o regulador de rotação do motor que aciona o compressor. A regulagem pode ser manual ou automática dependendo da pressão de trabalho.

- Regulagem por estrangulamento

É encontrado em compressores rotativos e em turbo-compressores. A regulagem é feita estrangulando-se o funil de sucção do compressor.

### 9.5.3 Regulagem intermitente

Ao alcançar a pressão máxima, o motor que aciona o compressor é desligado, e quando a pressão atinge um valor mínimo, o motor liga novamente e o compressor volta a trabalhar. A ação de ligar e desligar é comandada por um interruptor pneumático chamado pressostato, como mostrado na figura 9.5.3.1.

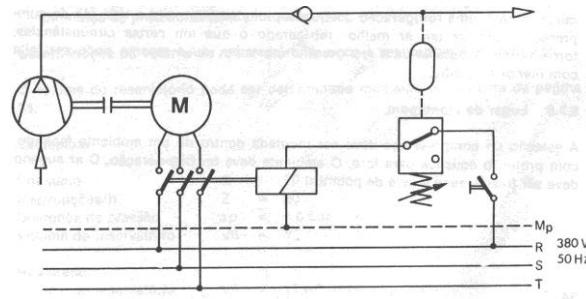


Figura 9.5.3.1 - Regulagem intermitente.

A freqüência de comutações pode ser regulada no pressostato e para que os períodos de comando possam ser limitados a uma medida aceitável, é necessário um grande reservatório de ar comprimido.



## 10. Temporizadores Pneumáticos

Servem para criar um retardo no envio ou na recepção de um sinal de comando. A figura 10.1 ilustra um temporizador que retarda a emissão do sinal e sua simbologia. A aplicação do sinal em X, provoca após um tempo de retardo, o aparecimento de um sinal de saída em A. A temporização é obtida através de um progressivo aumento da pressão no pequeno reservatório provocado pela entrada do sinal X que por sua vez passa através de um estrangulamento regulável. Após um tempo  $t$  a pressão é suficiente para comandar o êmbolo da válvula 3/2 vias. Interligando as conexões P com A. Ao cessar o sinal em X, o ar do reservatório sai pela membrana de retenção do estrangulamento. O gráfico da figura 10.1 também ilustra os sinais em X e A em função do tempo.

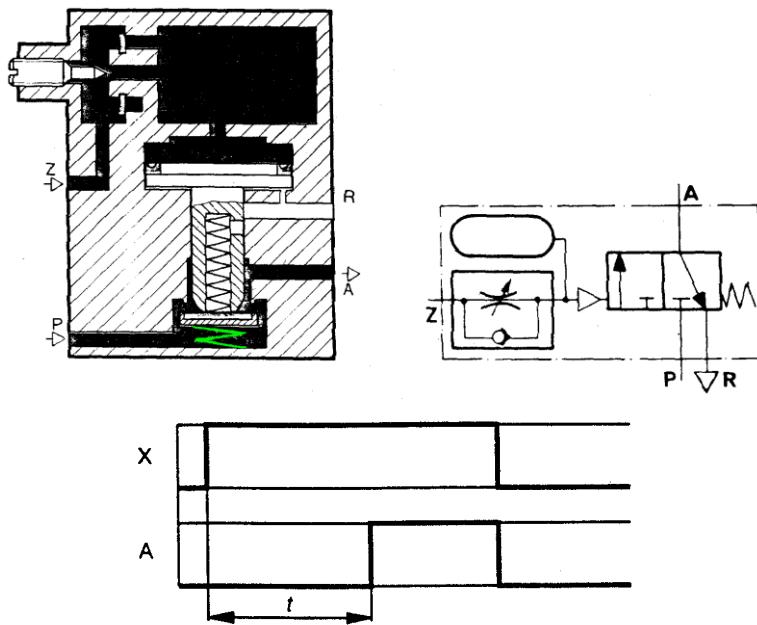


Figura 10.1 - Válvula temporizadora que retarda a emissão do sinal.

A figura 10.2 ilustra uma válvula temporizadora que retarda a interrupção do sinal e sua simbologia. O princípio de funcionamento é análogo à válvula anterior. O gráfico da mesma figura ilustra os sinais em X e A em função do tempo.

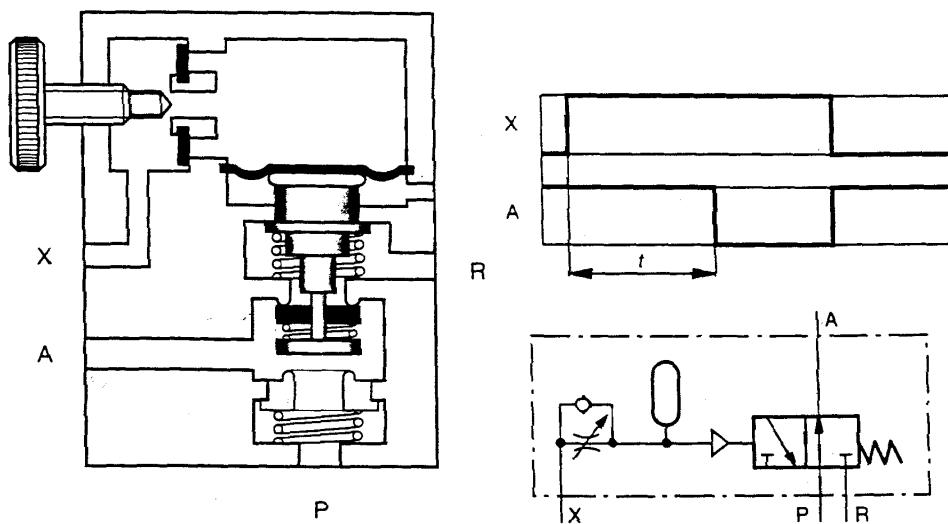


Figura 10.2 - Válvula temporizadora que retarda a interrupção do sinal.



## 11. Amplificadores Pneumáticos

Os sinais de pressão gerados por alguns dispositivos pneumáticos como os sensores como será visto adiante são muito pequenos, da ordem de até mbar. Assim os amplificadores são usados para amplificar o sinal pneumático.

### 11.1 Amplificador de Pressão Monoestágio

São usados para pressões de comando de 0,1 a 0,5 bar. A figura 11.1.1 ilustra esse tipo de amplificador. Inicialmente P está bloqueado e A está em exaustão. Recebendo o sinal X, o diafragma é atuado erguendo o pistão de comando e abrindo a passagem de P para A. P está conectado à pressão normal de até 8 bar. O sinal de A é usado para o comando de elementos que trabalham com média pressão. Eliminando o sinal em X, o pistão de comando fecha a passagem de P para A que retorna para exaustão. A amplificação de pressão é dada pela razão  $P_A/P_X$ . O ganho desse amplificador pode chegar até 10 vezes.

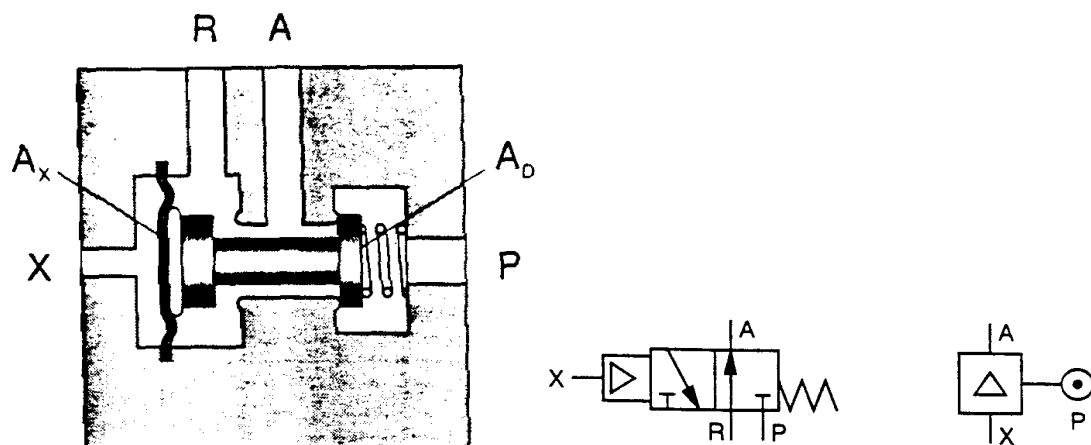


Figura 11.1.1 - Amplificador de Pressão Monoestágio.



## 11.2 Amplificador de Pressão de Duplo Estágio

Quando for necessário ganhos maiores de amplificação são usados os amplificadores de duplo estágio que permitem atingir amplificações de até 12.000 vezes. A figura 11.2.1 ilustra esse tipo de amplificador. Na posição de repouso a válvula 3/2 vias está fechada de P para A. Na entrada  $P_x$  existe uma alimentação contínua de ar (0,1 a 0,2 bar) que escapa pela saída  $R_x$  para a atmosfera (consumo contínuo de ar). Existindo um sinal de comando em X a membrana fecha a passagem de ar de  $P_x$  para  $R_x$ . A pressão  $P_x$  aciona a membrana de comando do amplificador que move o êmbolo de comando comunicando P com A e fechando R. Eliminando a pressão em X a mola retorna a membrana e portanto o êmbolo de comando que fecha a passagem de P para A voltando ao estado inicial.

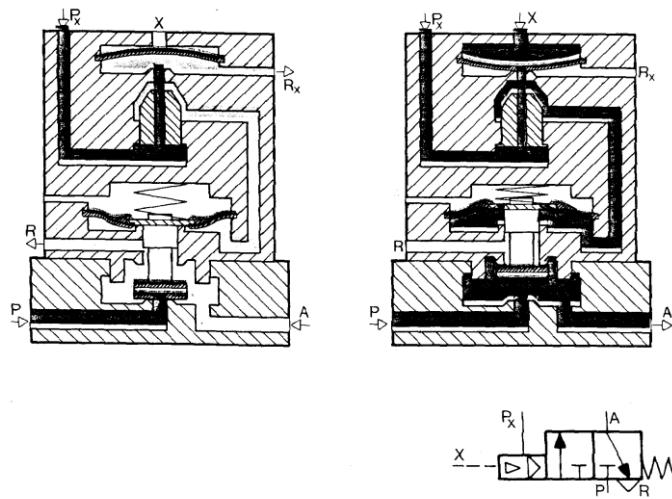


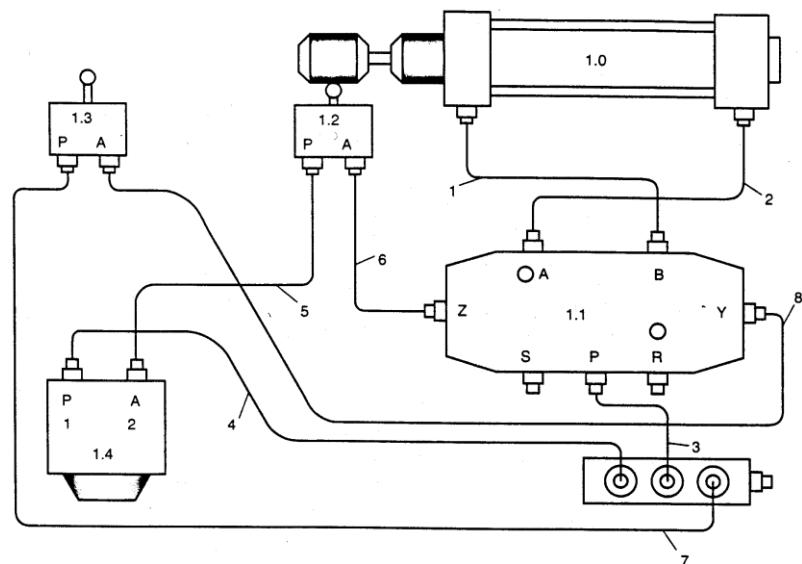
Figura 11.2.1 - Amplificador de pressão de duplo estágio.



## 12. Circuitos Pneumáticos

Os circuitos pneumáticos são compostos de válvulas pneumáticas e são responsáveis por comandar os atuadores pneumáticos. Como já comentado na introdução, os circuitos pneumáticos são equivalentes a circuitos eletrônicos digitais, uma vez que cada atuador possui apenas duas posições (0 ou 1).

Um circuito pneumático deve ser representado por símbolos. A figura 12.1 ilustra a montagem real de um circuito pneumático que controla um pistão de dupla ação e ao lado a sua representação simbólica. Note que a posição das válvulas acionadas por rolete (1.2 e 1.3) são representadas apenas por pequenos traços na posição em que elas devem ser montadas juntamente com o número da válvula.



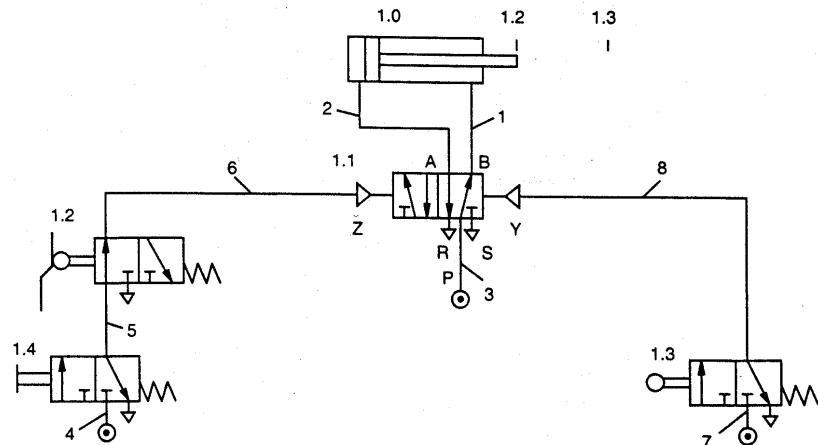


Figura 12.1 - Circuito real e sua representação simbólica.

O circuito é iniciado ao se pressionar a válvula 1.4. A válvula bi-estável 1.1 comuta e move o pistão. Ao final do curso a haste pisa na válvula 1.3 que comuta novamente a válvula 1.1 retornando o pistão. Se a válvula 1.4 for mantida pressionada o pistão fica indo e voltando até que o botão 1.4 seja liberado.

A figura 12.2 ilustra um circuito pneumático para o acionamento de motores pneumáticos.

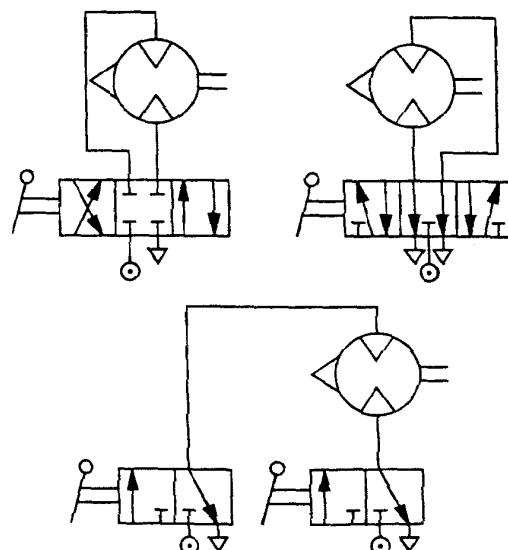


Figura 12.2 - Circuito para motores pneumáticos.

Num circuito pneumático encontramos os seguintes elementos:



- Elementos de trabalho: cilindros e motores pneumáticos
- Elementos de comando e de sinais: válvulas direcionais 4/2 vias, 3/2 vias, etc.
- Elementos de alimentação: unidade de tratamento, válvulas de fechamento e de segurança.

A figura 12.3 ilustra como esses elementos devem ser numerados.

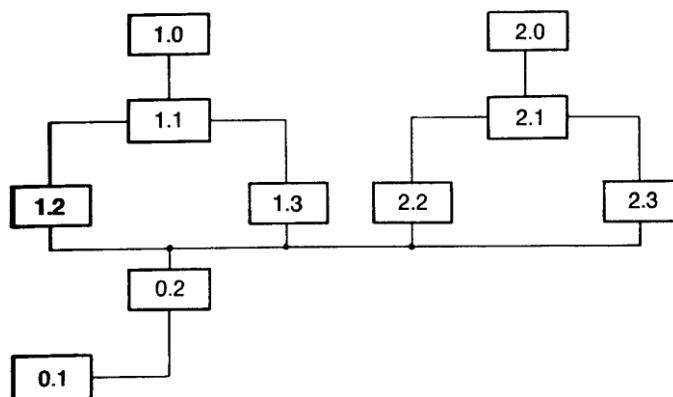


Figura 12.3 - numeração dos elementos pneumáticos no circuito.

Os elementos de trabalho são numerados como 1.0, 2.0, etc.. Para as válvulas, o primeiro número está relacionado a qual elemento de trabalho elas influem. Para as válvulas de comando, que acionam diretamente o pistão, o número a direita do ponto é 1. Para as válvulas de sinais o número a direita do ponto é par (maior do que zero) se a válvula é responsável pelo avanço do elemento de trabalho e ímpar (maior do que 1) se a válvula é responsável pelo retorno do elemento de trabalho. Para os elementos de regulagem (válvulas de fluxo) o número a direita do ponto é o número "0" seguido de um número par (maior do que zero) se a válvula afeta o avanço e ímpar (maior do que 1) se a válvula afeta o retorno do elemento de trabalho.

Para os elementos de alimentação o primeiro número é "0" e o número depois do ponto corresponde à seqüência com que eles aparecem. A figura 12.4 ilustra como fica a numeração completa de um circuito pneumático.

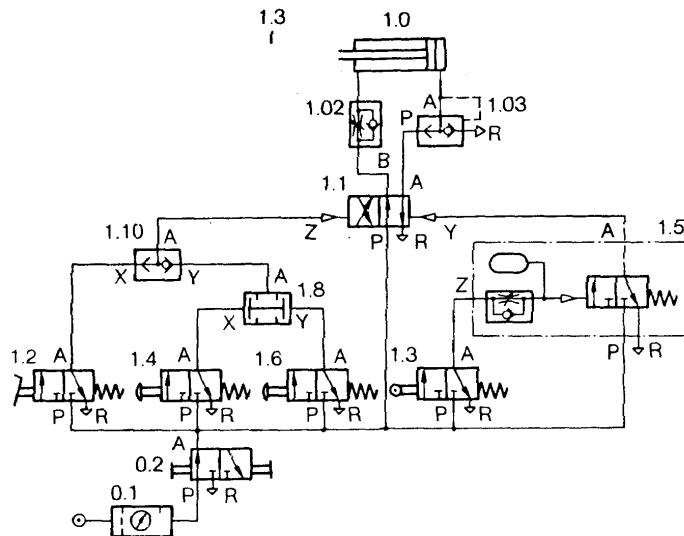


Figura 12.4 - Numeração de um circuito pneumático.

## 12.1 Seqüência de Movimento dos Pistões

O circuito pneumático é projetado mediante a seqüência de acionamento dos pistões que podem ser especificadas na forma de gráficos trajeto-passo, gráficos trajeto-tempo, ou letras com os sinais + (avançar) ou - (retornar) como mostrado na figura 12.1.1.

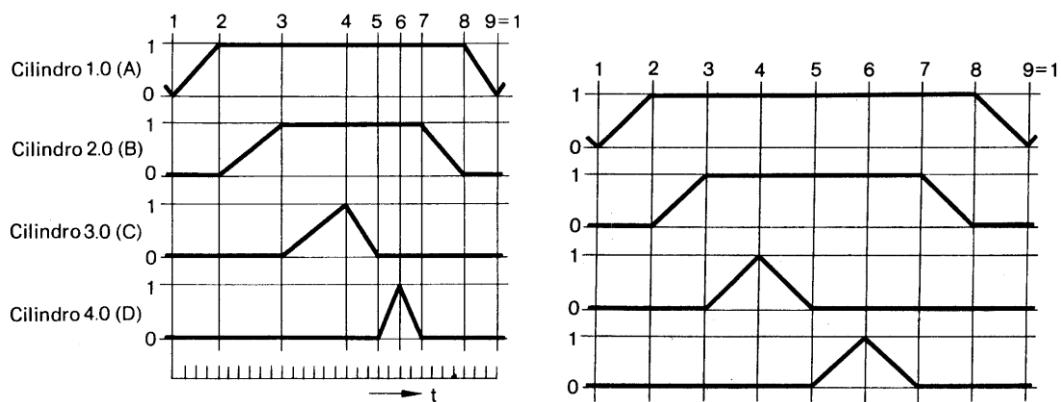


Figura 12.1.1 - Diagramas de trajeto-tempo (esquerda) e trajeto-passo (direita).

Pode-se representar o acionamento das válvulas através do diagrama de comandos como mostrado na figura 12.1.2.

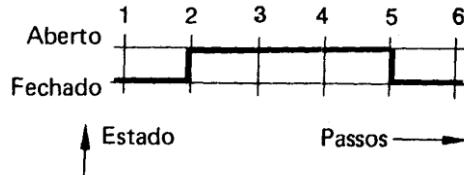


Figura 12.1.2 - Diagrama de comandos.

Para o projeto do circuito pneumático é importante identificar se a seqüência é direta ou indireta. Para isso dividimos a seqüência ao meio como mostrado abaixo. Se as letras estiverem na mesma ordem da seqüência trata-se de uma seqüência direta, caso contrário é um seqüência indireta. Abaixo temos vários exemplos de seqüências diretas e indiretas.

$$A + B + | A - B - \quad \text{(seqüência direta)}$$

$$A + B + | B - A - \quad \text{(seqüência indireta)}$$

$$A + C + B - | A - C - B + \quad \text{(seqüência direta)}$$

$$A + B + C + A - | D + B - D - C - \quad \text{(seqüência indireta)}$$

$$A + B - B + | A - B - B + \quad \text{(seqüência indireta)}$$

$$A + A - | B + B - \quad \text{(seqüência indireta)}$$

Em seqüências que apresentam movimento simultâneo de dois ou mais cilindros, pode-se inverter a ordem dos cilindros dentro dos parênteses sem alterar a seqüência original. Desta forma, seqüências que aparentemente são indiretas podem ser constituídas em seqüências diretas como mostrado abaixo.

$$A + B - | (B + A - ) = A + B - | (A - B + ) \Rightarrow \text{seqüência direta}$$

$$\begin{aligned} A + B + (A - | C + ) B - C - &= A + B + (C + | A - ) B - C - \\ \Rightarrow \text{seqüência direta} \end{aligned}$$



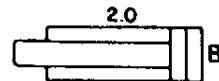
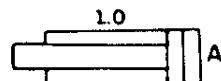
## 12.2 Métodos de Projeto de Circuitos Pneumáticos

Serão descritos adiante dois métodos para o projeto de um circuito pneumático: método intuitivo e método passo-a-passo. Se a seqüência de acionamento for direta podemos usar o método intuitivo, caso contrário (seqüência indireta) devemos usar o método passo-a-passo para evitar o problema de sobreposição de sinais que será descrito adiante.

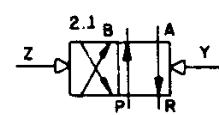
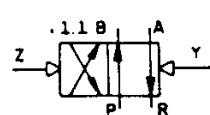
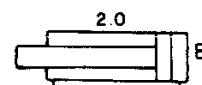
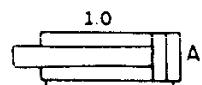
### 12.2.1 Método Intuitivo

Considere o projeto de um circuito pneumático que execute a seqüência direta A+B+A-B-. A seguir descrevemos as etapas para o projeto desse circuito usando o método intuitivo.

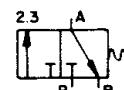
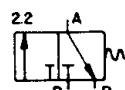
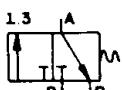
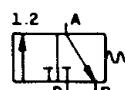
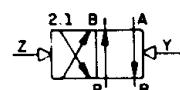
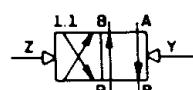
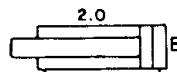
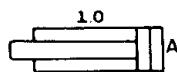
1. Etapa: desenhar os elementos de trabalho



2. Etapa: desenhar as válvulas de comando principal

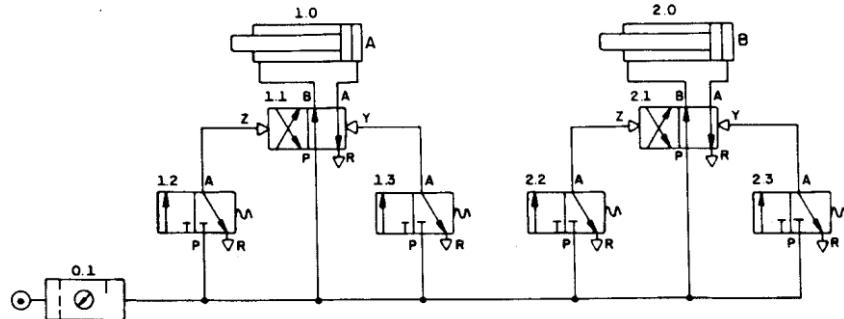


3. Etapa: desenhar os elementos de sinal



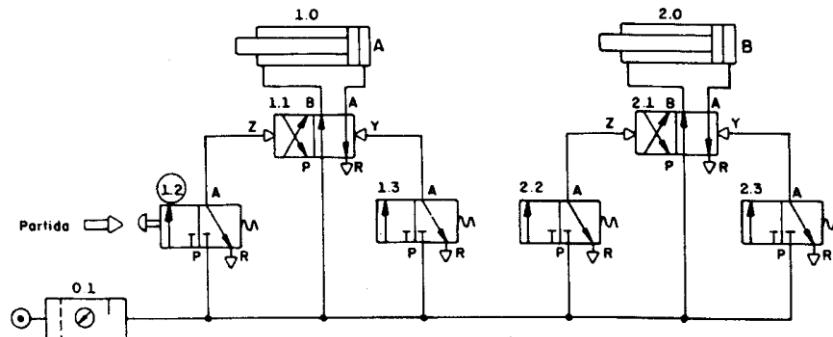


4. Etapa: desenhar todas as linhas de trabalho, pilotagem, alimentação de ar e exaustão

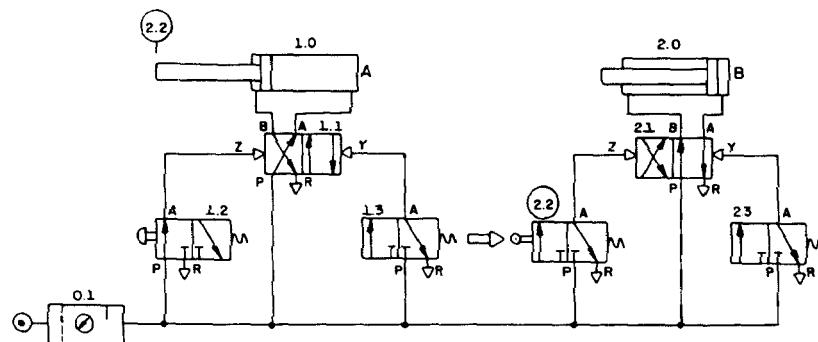


5. Etapa: de acordo com os passos da seqüência de movimento, desenhar os acionadores dos elementos de sinal e representar a posição de cada uma das válvulas piloto entre os cilindros.

1º passo: acionando um botão de partida, deverá ocorrer o avanço do cilindro A, que é o primeiro passo da seqüência de movimentos

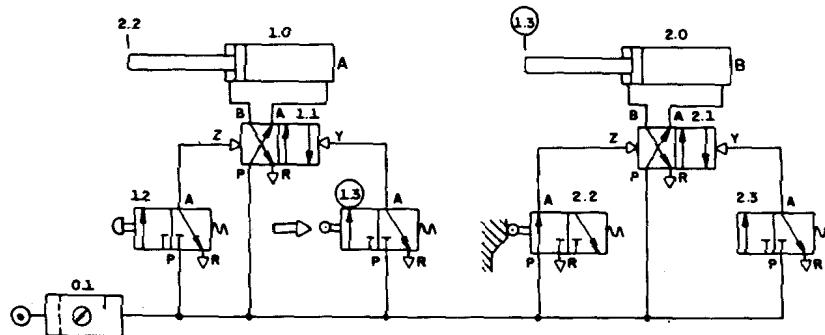


2º passo: quando o cilindro A alcançar o final do curso de avanço, acionará o rolete de outro elemento de sinal cuja função é pilotar o avanço do cilindro B, que é o segundo passo da seqüência de movimentos

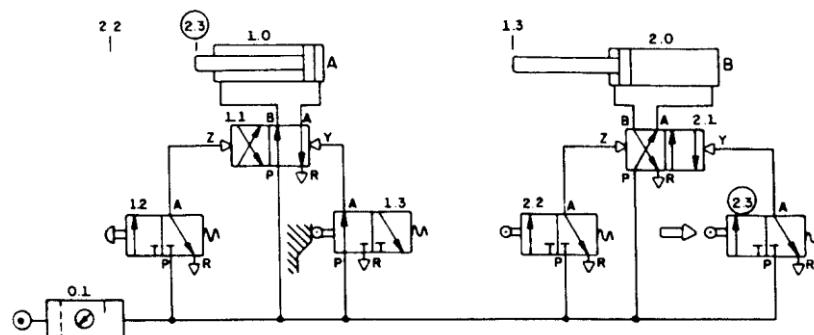




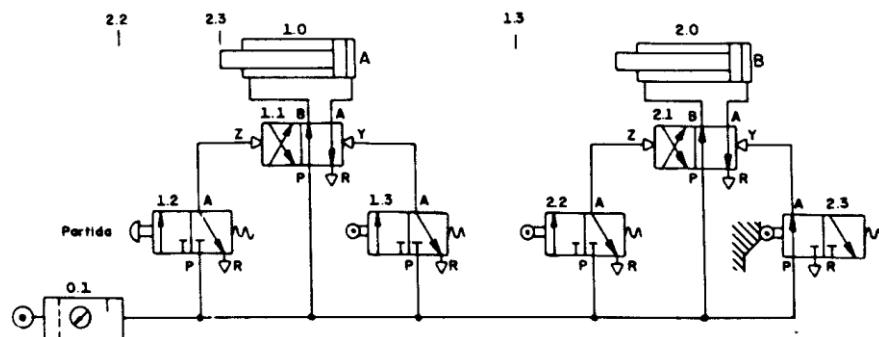
3º passo: quando o cilindro B alcançar o final do curso de avanço, será acionado o rolete de outro elemento de sinal cuja função é pilotar o retorno do cilindro A, que é o terceiro passo da seqüência de movimentos



4º passo: quando o cilindro A alcançar o final do curso de retorno, acionará o rolete de outro elemento de sinal cuja função é pilotar o retorno do cilindro B, que é o último passo da seqüência de movimentos



#### 6. Fim do ciclo: esquema final para A+B+A-B-





O circuito final deve ser sempre representado na sua posição de partida. As válvulas que estiverem "pisadas" devem ser representadas como na figura 12.2.1.

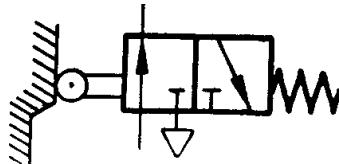
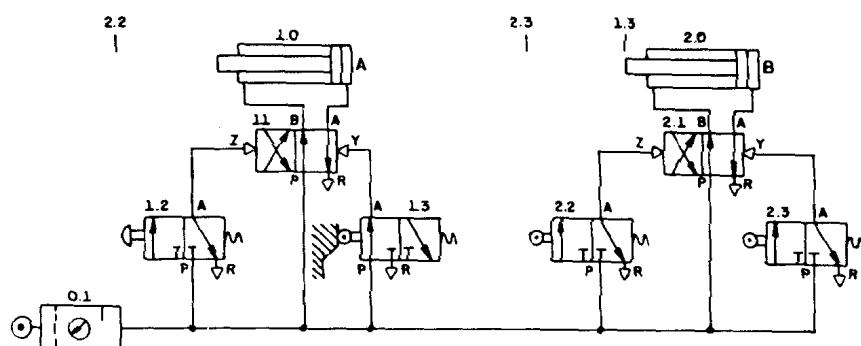
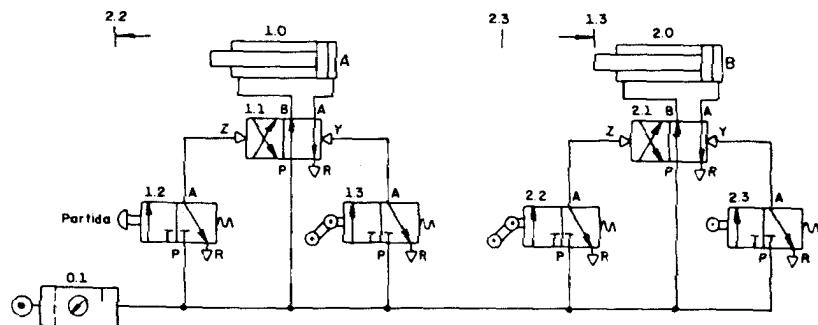


Figura 12.2.1 - Representação da válvula acionada.

A figura abaixo ilustra um circuito pneumático projetado usando o método intuitivo para a seqüência indireta A+B+B-A-.



Esse circuito não funciona. Acionando-se a válvula 1.2, o cilindro A deveria avançar. Entretanto, note que o cilindro B, parado na sua posição final traseira, mantém a válvula 1.3 acionada pressurizando o piloto Y da válvula 1.1, o que evita que a válvula 1.2 dê a partida no circuito. Outra sobreposição de sinais ocorre quando o cilindro B aciona a válvula 2.3 que deve pilotar o retorno do cilindro B. No entanto, o cilindro A mantém a válvula 2.1 acionada pressurizando o piloto Z da válvula de comando 2.1 e evitando que a válvula 2.3 possa pilotar o retorno do cilindro B. Uma forma de contornar esse problema nesse circuito é utilizar válvulas com roletes escamoteáveis como mostrado abaixo.



Essas válvulas são acionadas somente num sentido e não no outro como mostrado na figura 12.2.2. Na representação de sua posição devemos desenhar uma seta indicando o sentido de acionamento (ver figura 12.2.2).

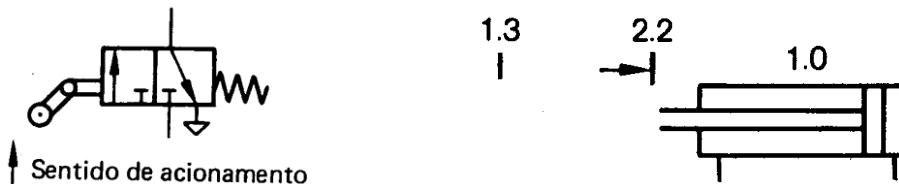
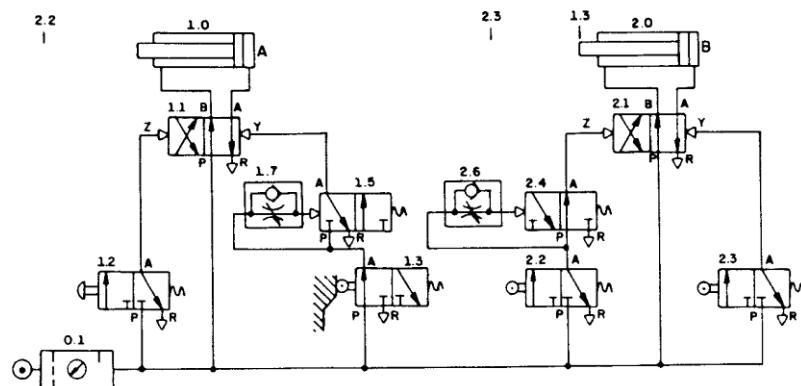


Figura 12.2.2 - Válvula com rolete escamoteável.

A desvantagem da utilização desse tipo de válvula é que ela deve ser montada alguns milímetros antes do final (ou começo) do curso do cilindro, o que faz com que, por alguns segundos, ocorra superposição dos movimentos dos dois cilindros, o que nem sempre é desejável. Por exemplo, enquanto o pistão que executa uma prensagem não parar o pistão que fixa a peça não pode se mover.

Uma outra solução seria usar válvulas temporizadoras como mostrado abaixo





Nesse caso a válvula introduz um atraso no acionamento das válvulas eliminando o problema de sobreposição de sinais. No entanto essa é uma solução anti-econômica, pois as válvulas temporizadoras são mais caras do que válvulas 3/2 vias comuns. A solução é usar o método apresentado a seguir.

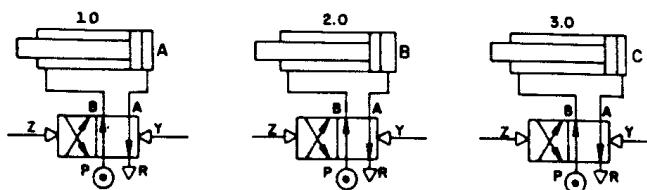
### 12.2.2 Método Passo-a-Passo

Considere o projeto de um circuito pneumático que execute a seqüência direta A+B+B-A-. A seguir descrevemos as etapas para o projeto desse circuito usando o método passo-a-passo.

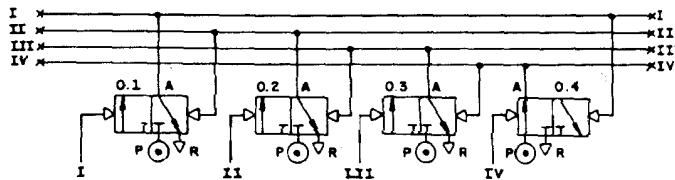
1. Etapa: dividir a seqüência de movimentos do circuito em grupos lembrando que cada movimento (passo) da seqüência corresponde a um grupo. Em geral, teremos um número par de grupos de alimentação de ar, com exceção das seqüências com movimentos simultâneos que poderão apresentar um número ímpar de grupos.

$$\begin{array}{c} A + | B + | B - | A - \\ \text{I} \quad \text{II} \quad \text{III} \quad \text{IV} \end{array}$$

2. Etapa: desenhar os elementos de trabalho do circuito ligados às suas respectivas válvulas de comando de duplo piloto.



3. Etapa: desenhar o comando passo a passo com tantos grupos de alimentação de ar quantos forem encontrados na primeira etapa. O número de válvulas necessárias para controlar as linhas de alimentação de ar é igual ao número de grupos encontrados na divisão da seqüência. Para quatro grupos temos:



Pilotando-se a válvula 0.1 do lado esquerdo a linha 1 será pressurizada, e com isso a válvula 0.4 será pilotada do lado direito descarregando a linha IV para a atmosfera. Uma a uma as válvulas distribuidoras 0.1, 0.2, 0.3 e 0.4 serão pilotadas pelos elementos de sinal de acordo com a ordem de acionamento dos elementos de sinal, pressurizando uma linha de alimentação de ar de cada vez para que ocorra a seqüência de movimentos do circuito. Por convenção, a última linha sempre deve estar pressurizada na partida do circuito.

4. Etapa: ligar os pilotos das válvulas de comando dos cilindros às linhas de alimentação de ar de acordo com os grupos determinados na divisão da seqüência de movimentos do circuito.

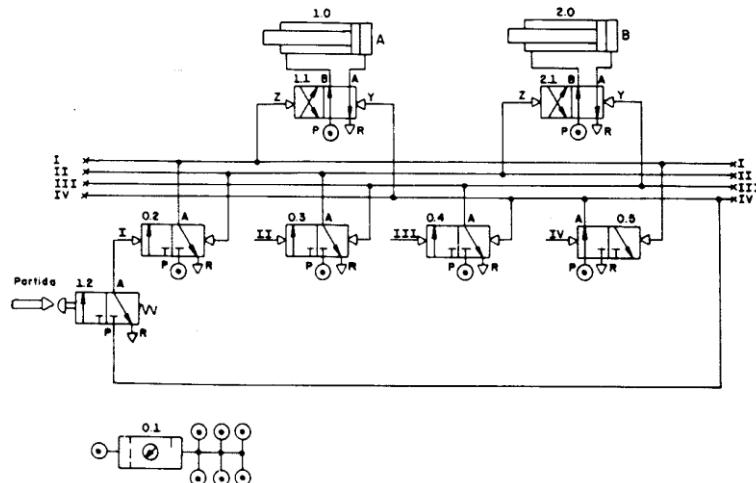
$$\begin{array}{c} A + | B + | B - | A - \\ \text{I} \qquad \text{II} \qquad \text{III} \qquad \text{IV} \end{array}$$

Assim, devemos ligar os pilotos de avanço dos cilindros A e B nas linhas I e II, respectivamente, e os pilotos de retorno dos cilindros B e A nas linhas III e IV, respectivamente.

5. Etapa: desenhar os elementos de sinal pilotando as válvulas do comando passo-a-passo de acordo com a seqüência de movimentos do circuito. Os elementos de sinal devem ser acionados por rolete mecânico, com exceção daqueles que são responsáveis pela partida, geralmente acionados por botão. Todos os elementos de sinal devem ser alimentados pelas linhas referentes aos grupos do comando passo a passo, sendo que o ar da linha atuante deverá ser usado para pilotar a linha posterior.  
Para a seqüência em questão temos:

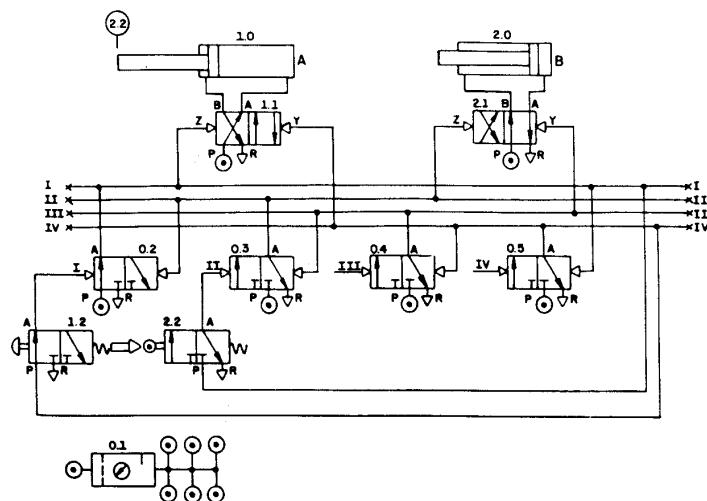


1º passo: mudança da alimentação de ar do grupo IV para o grupo I para que o cilindro A avance (partida).



Acionando-se 1.2, ocorre a mudança de alimentação de ar da linha IV para a linha I do comando passo a passo e o cilindro A avança.

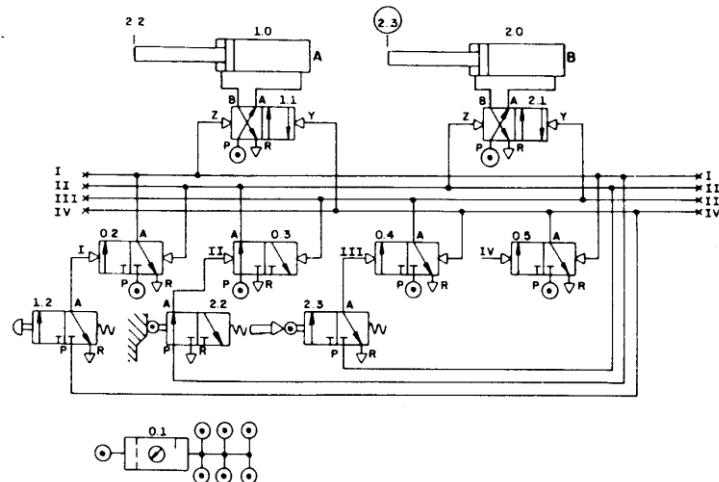
2º passo: mudança da alimentação de ar do grupo I para o grupo II para que o cilindro B avance.



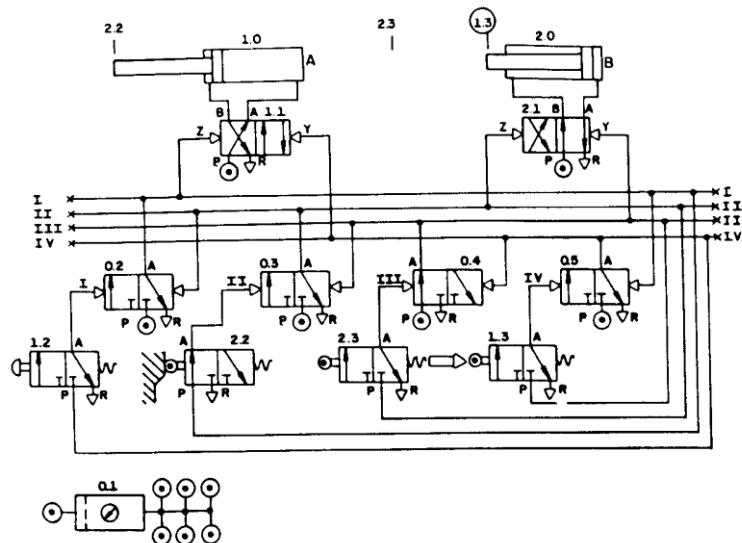
Quando o cilindro A aciona a válvula 2.2, a alimentação da linha I muda para a linha II do comando para que o cilindro B avance.



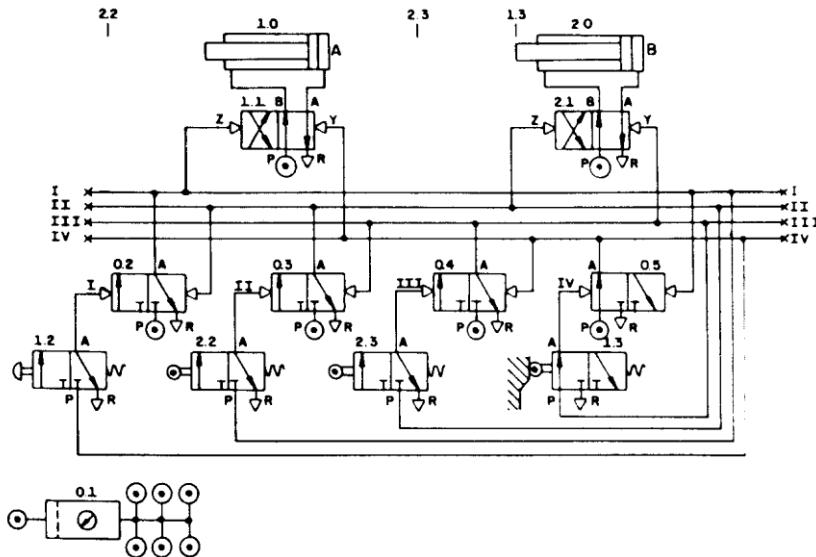
3º passo: mudança da alimentação de ar do grupo II para o grupo III para que o cilindro B retorne



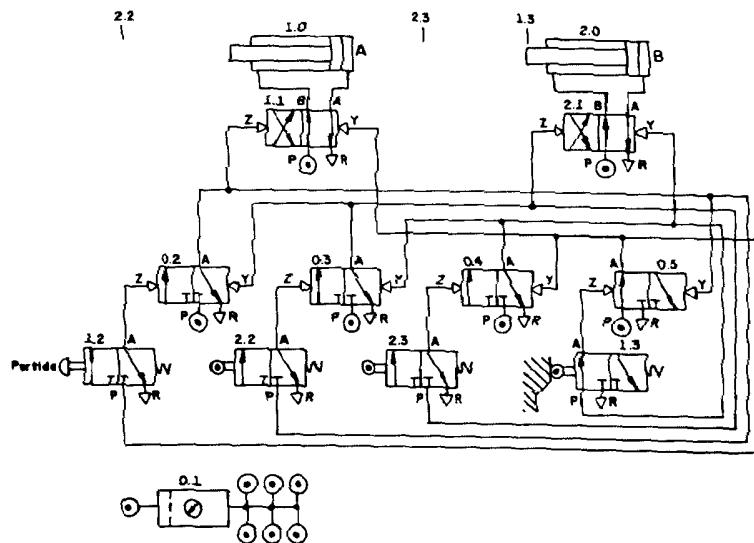
4º passo: mudança da alimentação de ar do grupo III para o grupo IV para que o cilindro A retorne.



Fim do ciclo: quando o cilindro A alcança o final do curso de retorno, encerra-se a seqüência do ciclo. Uma nova partida é obtida pressionando-se o botão 1.2



6. Etapa: eliminar as extremidades das linhas de alimentação de ar comprimido referentes a todos os grupos do comando passo-a-passo.





## 13. Exemplos de Aplicação de Pneumática

Vejamos alguns exemplos de aplicação de sistemas pneumáticos.

A figura 13.1 ilustra uma prensa de dobra e estampagem acionada por 4 cilindros. São colocadas chapas de metal manualmente. O cilindro 1 fixa a chapa, os cilindros 2 e 3 dobram a chapa e o cilindro 4 fura a chapa. A seqüência de acionamento dos cilindros e o circuito pneumático que a controla são mostrados na figura 13.1.

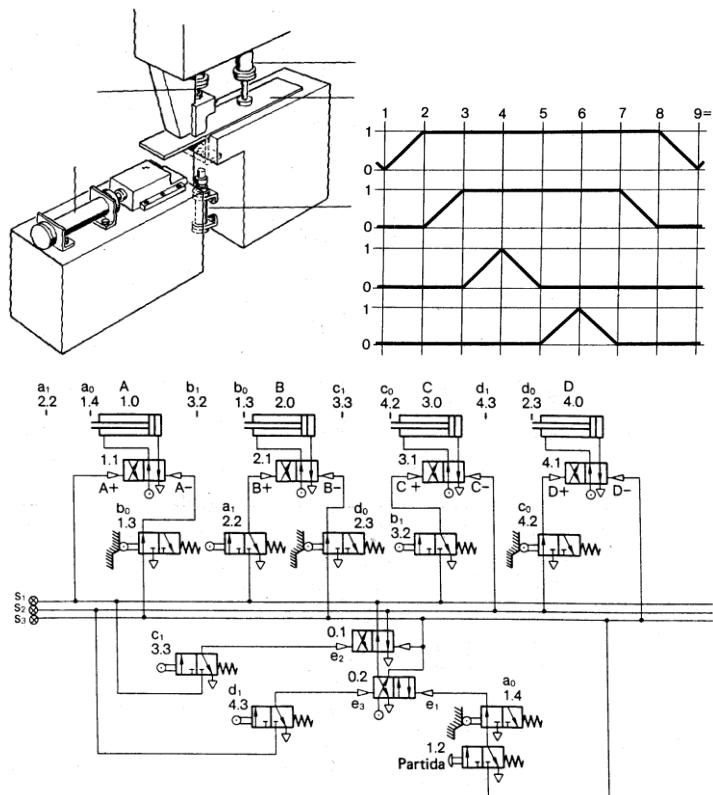


Figura 13.1 - Prensa de dobra e estampagem e seu circuito pneumático.

A figura 13.2 mostra um rebitador e a seqüência de acionamento dos pistões. As peças são introduzidas manualmente no dispositivo. O cilindro A fixa a peça e ambos os cilindros B introduzem os rebites, mantendo-os fixos. O cilindro 3 remacha as extremidades dos rebites. As peças prontas são extraídas manualmente. O circuito pneumático que controla o movimento também é mostrado

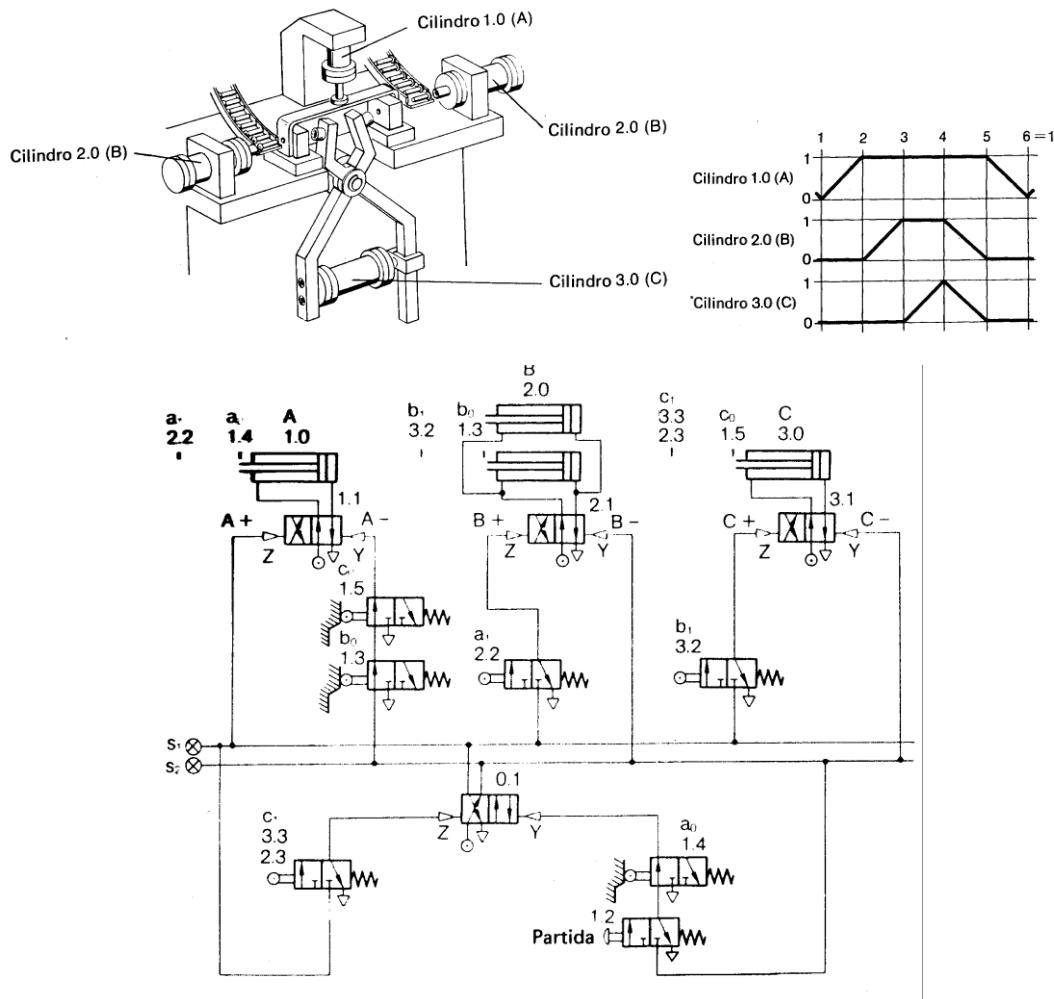


Figura 13.2 - Rebitador e seu circuito pneumático.

A figura 13.3 mostra um dispositivo para a montagem de rolamentos e a seqüência de acionamento dos cilindros. Após a montagem das peças os rolamentos são fixados por um cilindro A. O cilindro B aciona uma bomba que introduz a graxa no rolamento. O número de bombeamentos é regulável, pois podem haver rolamentos de diversas medidas.

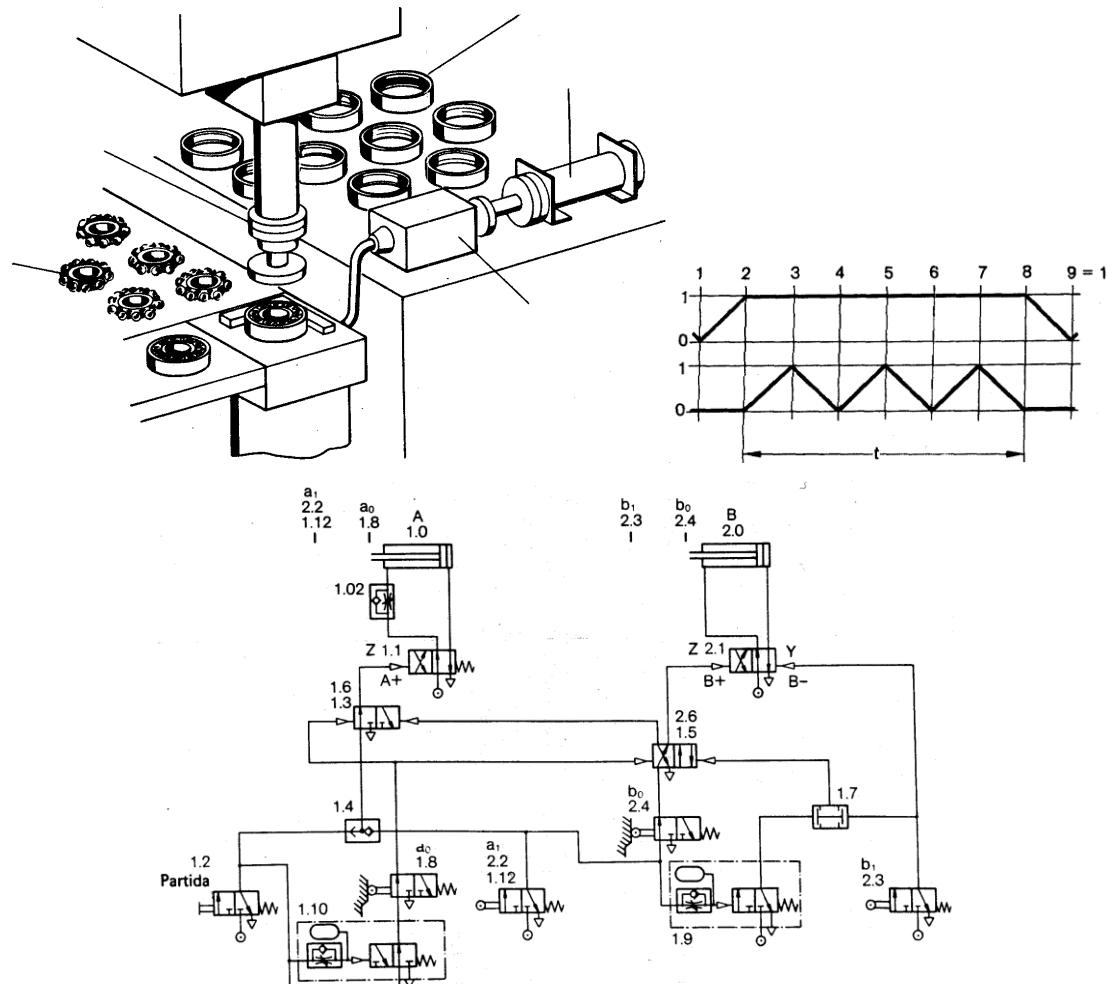


Figura 13.3 - Dispositivo de montagem de rolamentos e seu circuito pneumático.

A figura 13.4 mostra um dispositivo de injeção para a decoração de bolo e a seqüência de acionamento dos cilindros. O bolo deve ser recoberto de chocolate. O sistema de injeção é aberto pelo cilindro A. Simultaneamente se realiza o avanço dos cilindros B e C. O cilindro B avança lentamente a forma do bolo, enquanto que o cilindro C guia a pistola de injeção com movimentos oscilantes transversalmente ao curso longitudinal. Quando o cilindro B alcança a posição final o cilindro A fecha o sistema de injeção de chocolate e os cilindros B e C retornam a sua posição inicial.

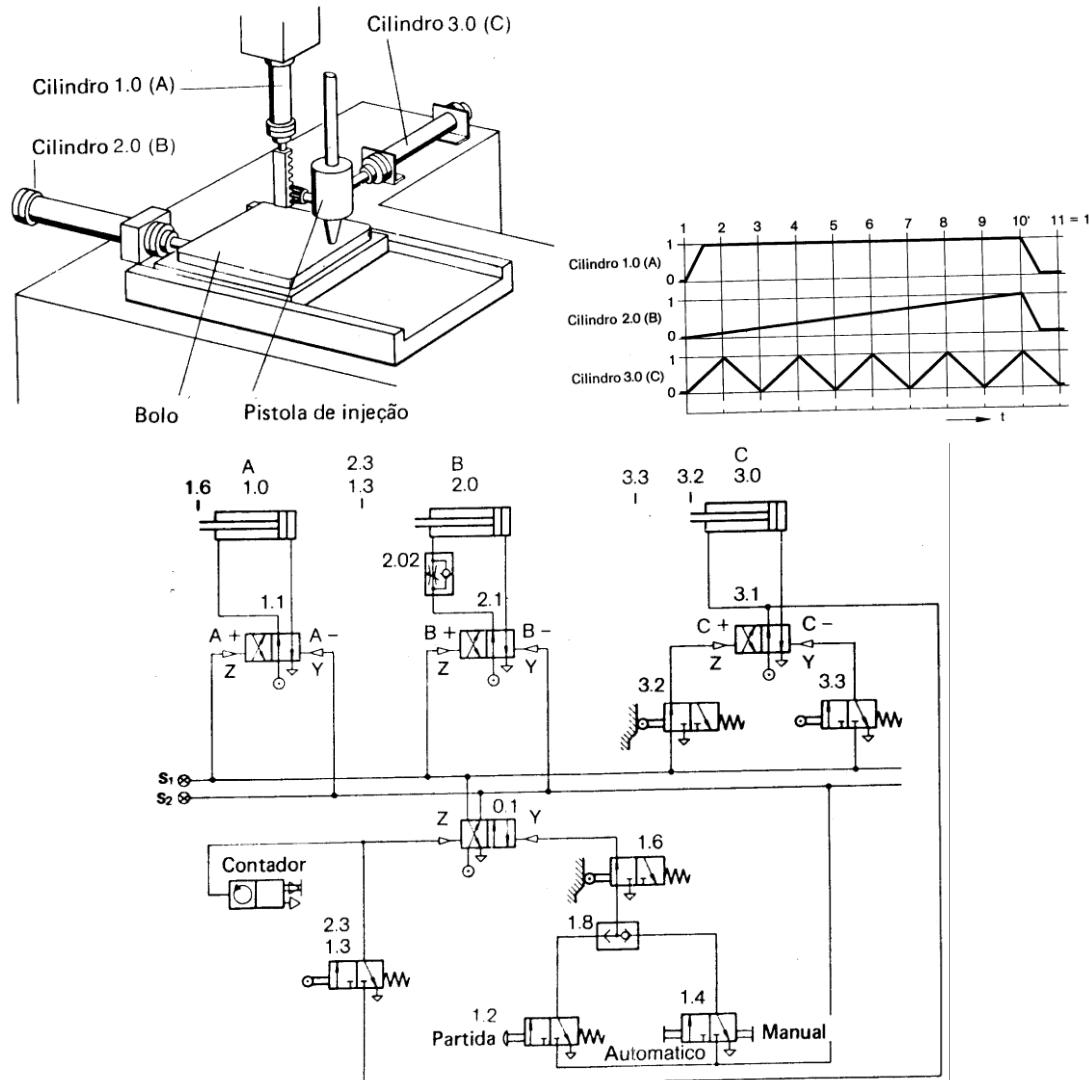


Figura 13.4 - Dispositivo de injeção para decoração de bolo e seu circuito pneumático.



## 14. Eletropneumática

Em eletropneumática o comando é executado por um circuito elétrico do tipo Controlador Lógico Programável (CLP) ou através de um microcomputador. Utiliza válvulas pneumáticas direcionais atuadas por solenóides (já descritas na seção 9.1.5) apenas para comandar diretamente os pistões. Na verdade o solenóide aciona um sistema pneumático que aciona a válvula. Os componentes (válvulas) que realizam o controle são substituídos por relés, comutadores de potência, interruptores, pressostatos (ver seção 9.4.3) e sensores elétricos. É recomendada para ambientes em que não há risco de explosão.

A figura 14.1 ilustra alguns elementos básicos de eletropneumática e seus símbolos. O botão fechador está normalmente aberto enquanto que o abridor está normalmente fechado. O comutador abre e fecha contatos ao mesmo tempo.

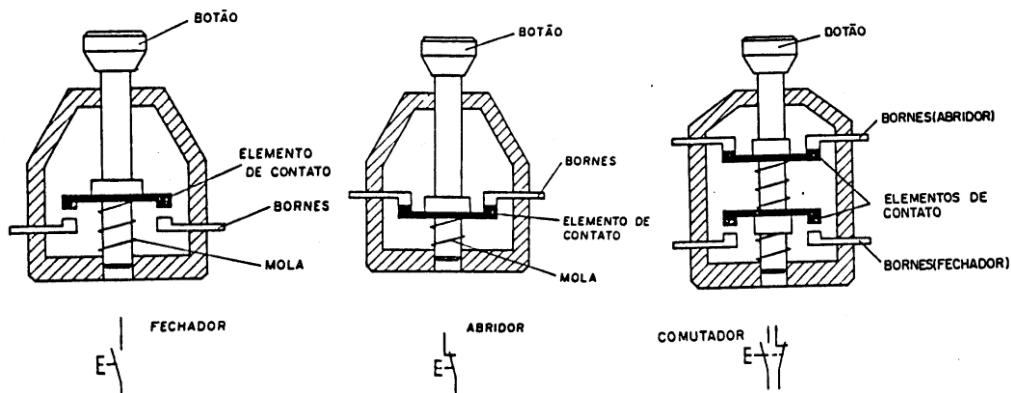


Figura 14.1 - Botões fechador, abridor e comutador.

Outro elemento muito usado é o relé. O relé consiste num elemento de comutação acionado eletromagneticamente como mostrado na figura 14.2. Note na figura que um relé pode ligar e desligar vários circuitos, pois podem existir várias chaves que são atuadas (mecanicamente) pela sua bobina.

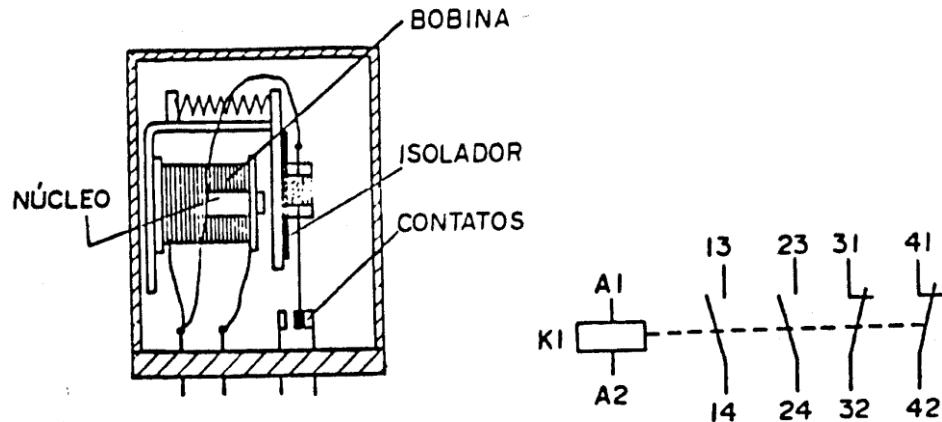


Figura 14.2 - Relé.

A figura 14.3 ilustra um circuito eletropneumático simples em que o interruptor S1 aciona o solenóide Y1 da válvula do pistão. Note o símbolo do solenóide da válvula. Os pólos + e - representam os pólos da rede elétrica.

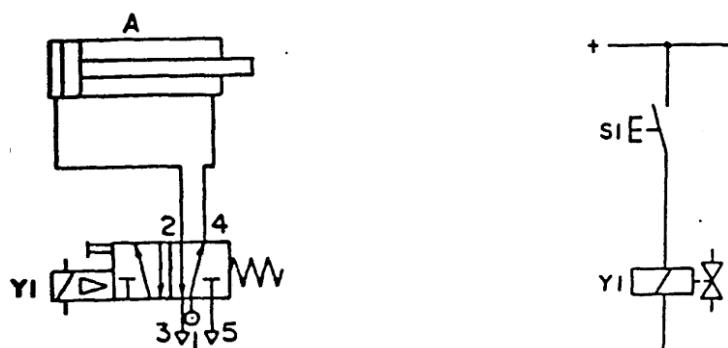


Figura 14.3 - Circuito eletropneumático simples.

No entanto, devido às altas correntes que são em geral necessárias para acionar a válvula o circuito de acionamento é separado do circuito de controle. Assim o interruptor S1 acionaria um relé de baixa corrente K1 que acionaria o solenóide Y1 como mostrado na figura 14.4.

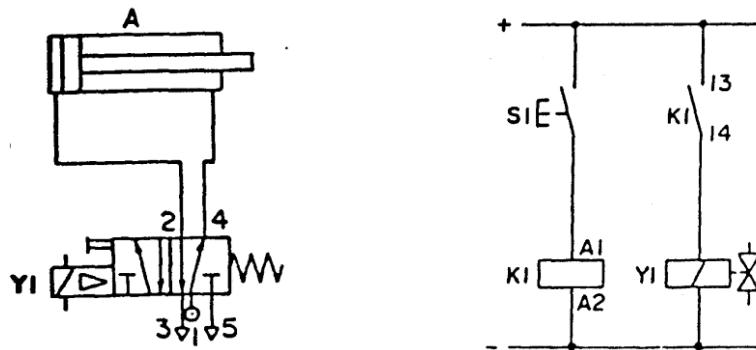


Figura 14.4 - Circuito de controle e de potência.

A figura 14.5 ilustra um circuito eletropneumático que comanda um cilindro de dupla ação acionada por uma válvula 5/2 vias. K1 e K2 são relés e Y1 e Y2 os solenóides das bobinas. Note que agora temos apenas interruptores elétricos (S1, S2 e S3).

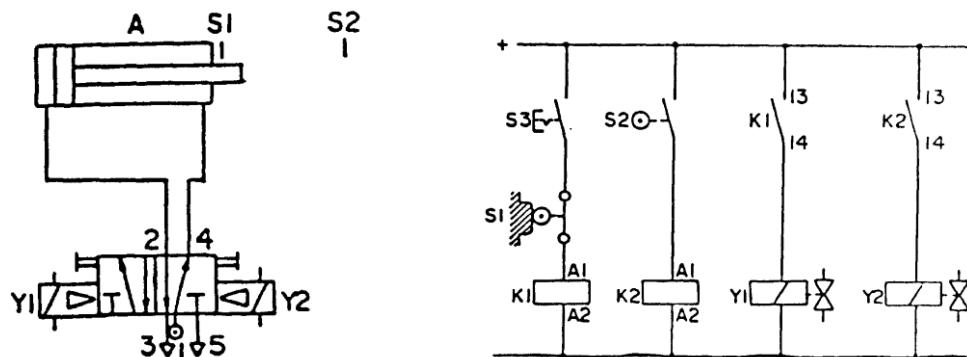


Figura 14.5 - Circuito eletropneumático.

A figura 14.6 ilustra dois circuitos em que o relé se mantém ligado ao ser acionado somente desligando quando acionado o botão desliga. Ao lado temos um exemplo de aplicação. O circuito é chamado "ligar dominante" quando ao pressionar simultaneamente os botões liga e desliga o circuito liga, e "desligar dominante" caso contrário.

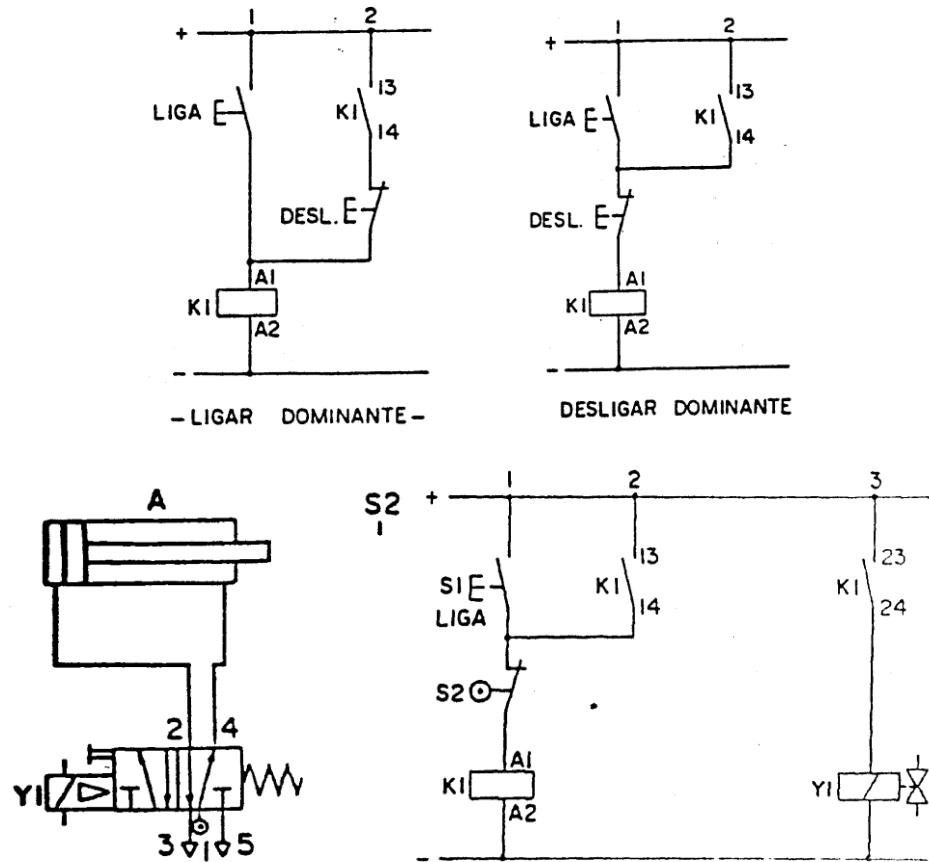


Figura 14.6 - Circuitos ligar e desligar dominante e exemplo de circuito.

O projeto dos circuitos eletropneumáticos segue o mesmo processo que os circuitos pneumáticos, podendo se usar os dois métodos (intuitivo e passo-a-passo). A figura 14.7 ilustra um circuito eletropneumático que executa a seqüência direta A+B+A-, projetado usando o método intuitivo. Aqui também há problemas com sobreposição de sinais e para seqüências indiretas devemos usar o método passo-a-passo.

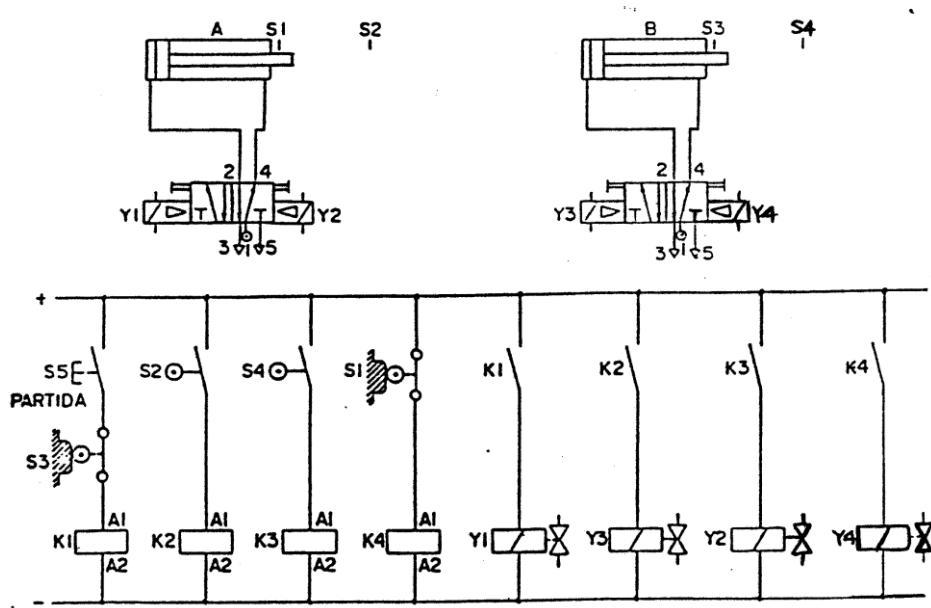


Figura 14.7 - Circuito eletropneumático que realiza a seqüência direta A+B+A-B-.

No caso do método passo-a-passo cada evento do circuito será realizado pelo sub-círculo ilustrado na figura 14.8.

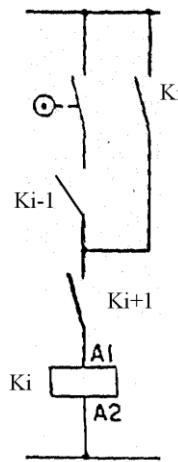


Figura 14.8 - Subcírculo responsável por um evento da seqüência no método passo-a-passo.

Assim, note que cada relé  $K_i$  se mantém ligado,arma o subcírculo do evento seguinte e desarma o subcírculo do evento anterior. A figura 14.9 ilustra um circuito eletropneumático que comanda a seqüência indireta A+B+C+C-A-B-.

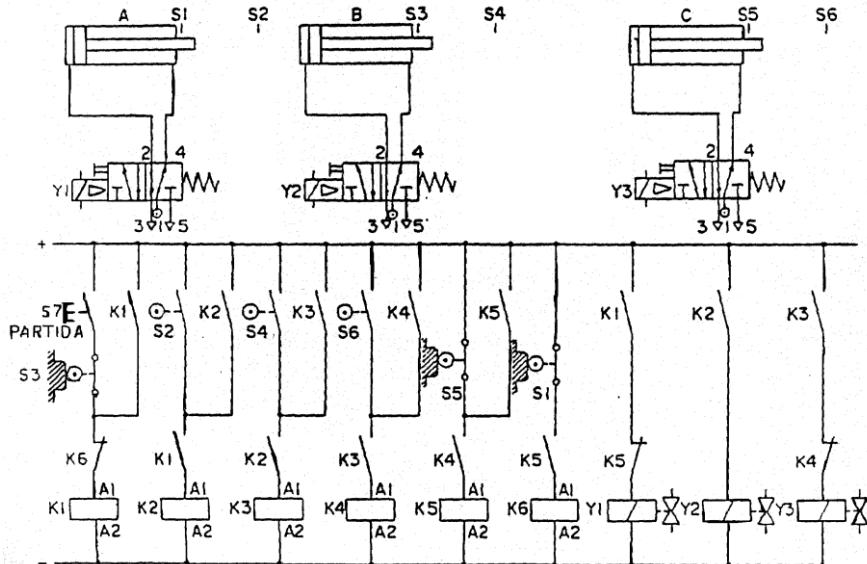


Figura 14.9 - Circuito eletropneumático que comanda a seqüência A+B+C+C-A-B-.

Note que, como no circuito pneumático o último subcircuito deve estar ligado para que o circuito possa ser iniciado, por isso é necessário o botão de rearme mostrado.



## 15. Sensores Pneumáticos

São em geral *sensores de presença* (veja também a seção 9), podendo ser usado em alguns casos para verificar dimensões de peças. Substituem os sensores elétricos de presença em locais que há risco de explosão. Os sensores pneumáticos são baseados em 3 princípios básicos:

- Princípio de reflexão;
- Princípio de barreira de ar;
- Princípio pressostático;

A figura 15.1 ilustra esses 3 princípios.

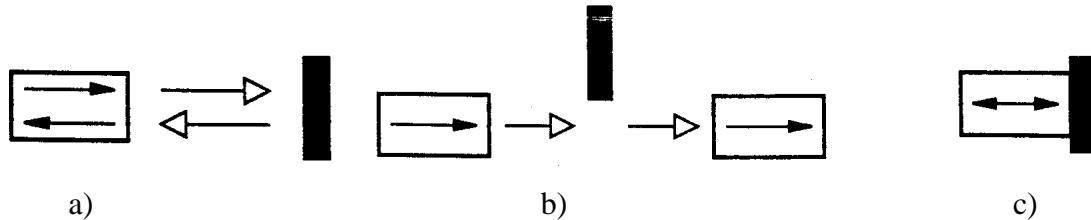


Figura 15.1- Princípios de reflexão (a), barreira de ar (b) e pressostático (c), respectivamente.

### 15.1 Sensor de Reflexão

A figura 15.1.1 ilustra esse tipo de sensor e seu símbolo.

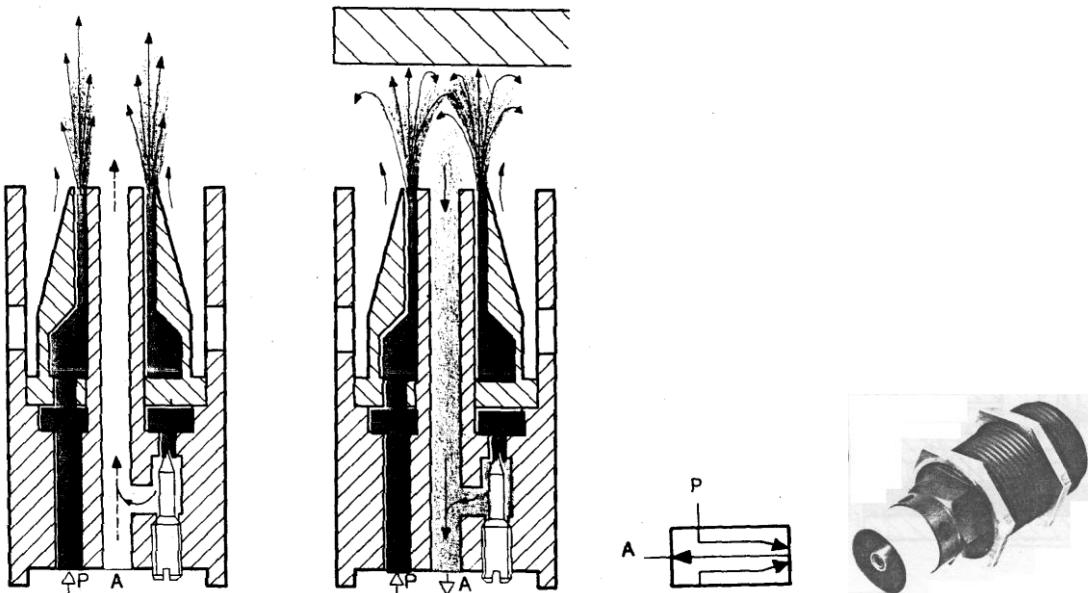


Figura 15.1.1 - Sensor de reflexão e seu símbolo.

O jato de ar que sai do bocal em forma anular, na ausência de obstáculos, gera uma pressão negativa no canal central pelo efeito "Venturi", ou seja, que a pressão do ar escoando em alta velocidade é menor do que a pressão do ar em baixa velocidade. Aproximando-se um objeto, pela reflexão do ar, a pressão no canal central passa a ser positiva. Se o objeto chegar a vedar o bocal a pressão no canal central será a mesma pressão do canal anular graças a pequena comunicação lateral entre eles. Com uma pressão de alimentação de 0,1 a 0,5 bar o sinal de saída situa-se entre 0,5 a 2 mbar, sendo portanto necessário um amplificador. A curva característica que descreve o comportamento anterior está ilustrada na figura 15.1.2.

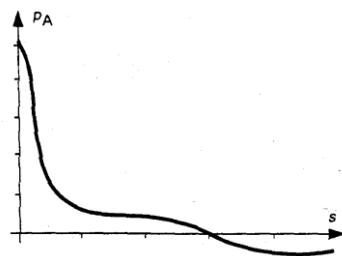


Figura 15.1.2 - Curva característica do sensor pneumático.



A figura 15.1.3 ilustra curvas características mais detalhadas do sensor de reflexão não somente variando a distância axial, mas também a distância radial.

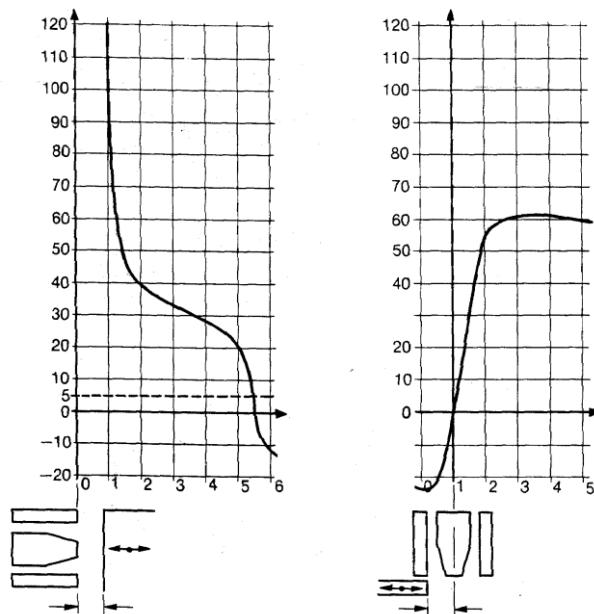


Figura 15.1.3 - Curvas características para a distância radial e axial.

A figura 15.1.4 ilustra a montagem desse sensor num circuito pneumático em que um cilindro é acionado toda vez que o sensor detecta a presença de uma peça. Como o sensor é alimentado com uma baixa pressão é necessário uma válvula redutora de pressão na alimentação e uma amplificação na saída do sensor.

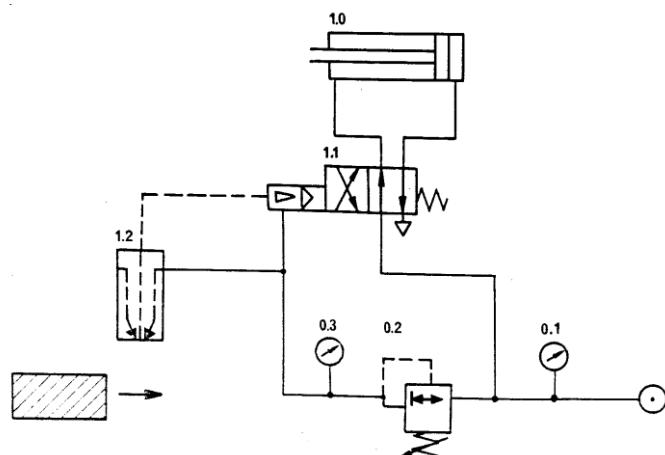


Figura 15.1.4 - Exemplo de circuito pneumático com o sensor.



## 15.2 Barreira de ar

São compostas de um bico emissor e um bico receptor que permitem detectar a presença de objetos entre eles como mostra a figura 15.2.1. No caso mais simples o bico receptor é um elemento passivo, no entanto para diminuir a sensibilidade para evitar influências externas, alimenta-se também o bico receptor. Esses sensores são em geral sensíveis à interferências externas.

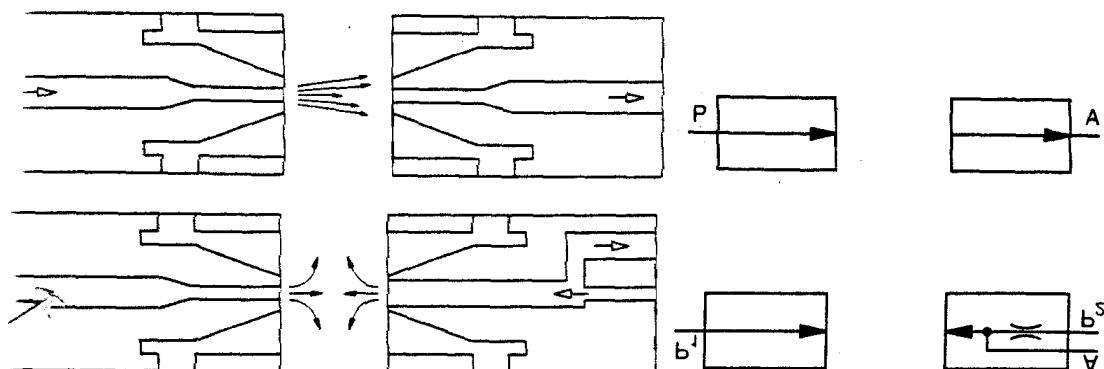


Figura 15.2.1 - Sensor barreira de ar com bico receptor passivo e alimentado e seus respectivos símbolos.

A figura 15.2.2 ilustra o funcionamento de um sensor com o bico receptor alimentado. Ambos os bicos emitem um jato de ar e portanto há um sinal de pressão em A. Quando um objeto é colocado entre os bicos o sinal em A desaparece. O sensor é alimentado com uma pressão de 0,1 a 0,5 bar, sendo o sinal de saída gerado da ordem de 0,5mbar, sendo portanto necessário um amplificador. As distâncias detectáveis estão em até 80mm.

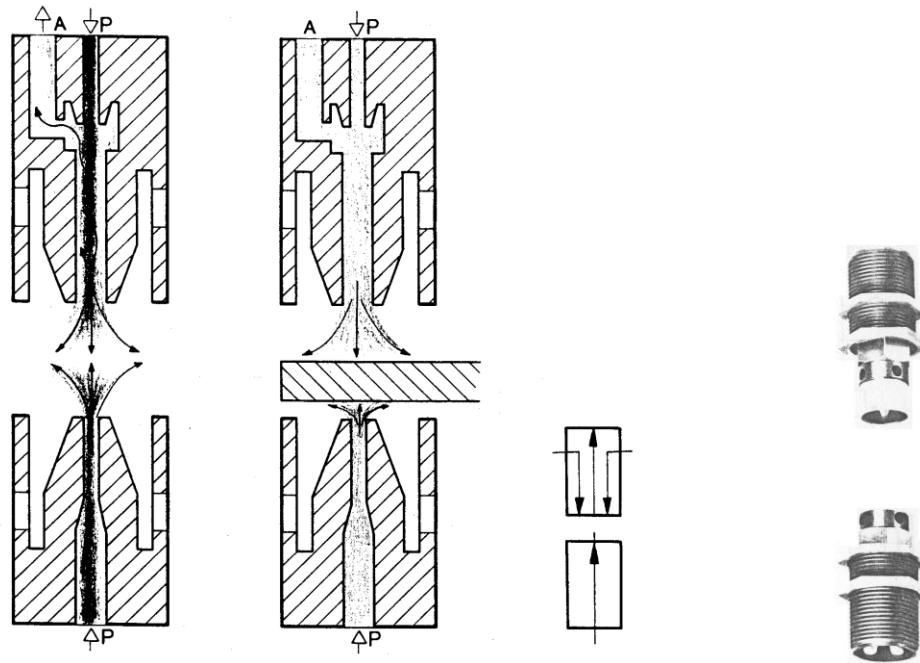


Figura 15.2.2 - Funcionamento do sensor.

A figura 15.2.3 ilustra uma montagem desse tipo de sensor chamada "garfo" e seu respectivo símbolo. Nesse caso, o bico sensor e receptor são alojados no mesmo corpo.

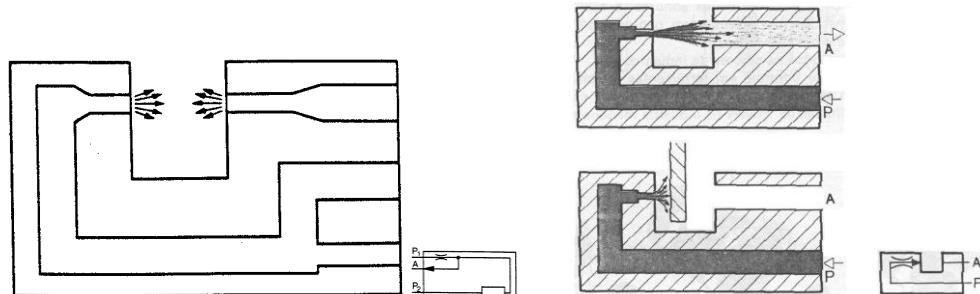


Figura 15.2.3 - Montagem garfo.

São aplicados na detecção de peças finas, leitura de código de barra (no caso "rasgos" numa chapa), etc...



A figura 15.2.4 ilustra um circuito pneumático simples que emprega esse tipo de sensor. No caso um cilindro é acionado quando ocorre a detecção de uma peça. Como o sensor é alimentado com uma baixa pressão é necessário uma válvula redutora de pressão na alimentação e uma amplificação na saída do sensor.

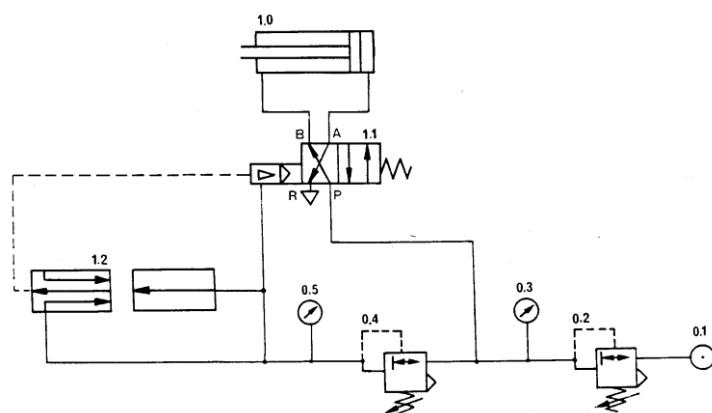


Figura 15.2.4 - Exemplo de circuito pneumático com o sensor.

### 15.3 Sensores e interruptores pressostáticos

O princípio é similar ao dos sensores anteriores, no entanto podem ser alimentado com pressão normal e neste caso não necessitam de amplificação posterior.

#### Bico pressostático

A figura 15.3.1 ilustra esse tipo de sensor e seu símbolo.

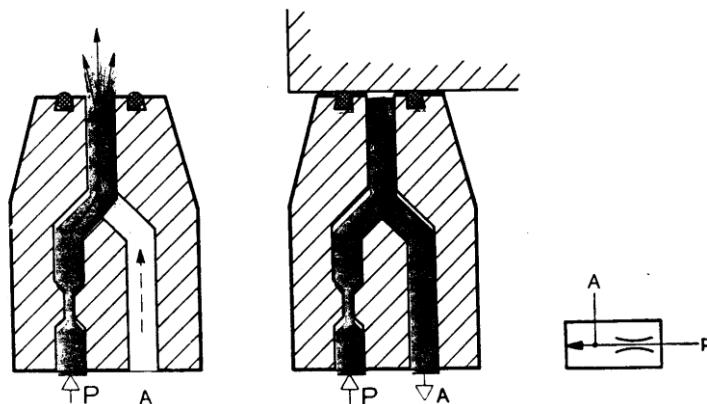


Figura 15.3.1 - Sensor tipo bico pressostático.



Pelo efeito do fluxo de ar que sai livremente do bico, cria-se uma pressão negativa no canal decomando (efeito "Venturi"). Cobrindo-se parcialmente o canal de saída, gera um incremento de comando que pode chegar à pressão de alimentação, caso a obstrução do bico seja total. Com um projeto adequado e um estrangulamento na alimentação pode-se utilizar a pressão normal tornando supérfluo o uso de amplificadores com um consumo reduzido de ar.

### Interruptor pressostático

A figura 15.3.2 ilustra esse tipo de sensor e seu símbolo. O princípio é similar ao anterior, no entanto agora, há uma válvula 3/2 vias que comuta quando o canal de comando é obstruído.

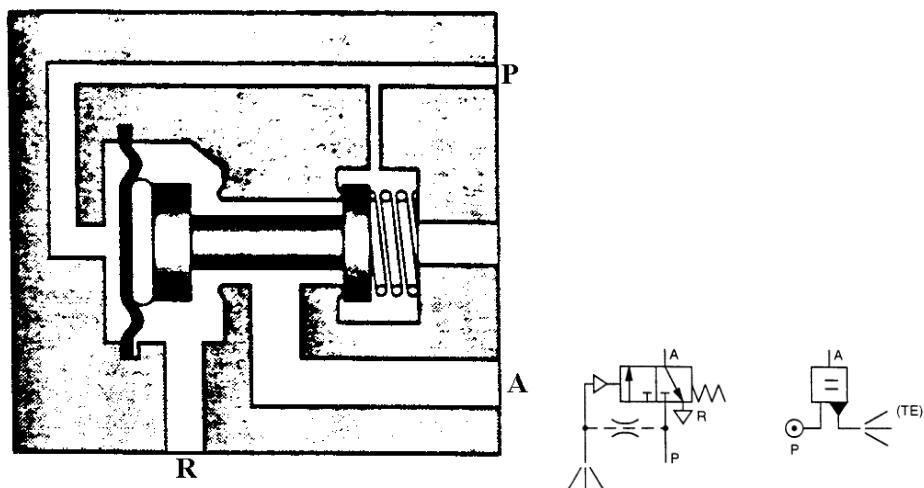


Figura 15.3.2 - Interruptor pressostático.

A vantagem dos sistemas pressostáticos reside na utilização da pressão normal que possibilita um sinal de comando de valor elevado, dispensando assim amplificadores e válvulas redutoras de pressão.



## **16. Bibliografia**

1. Hasebrink, J.P, "Manual de Pneumática - Fundamentos", Vol.1 Parte 1, Rexroth - Divisão Pneumática, Diadema, SP, Brasil, 1990.
2. Meixner, H. e Kobler, R., "Introdução à Pneumática", Livro Didático, FESTO Didactic, São Paulo, SP, Brasil, 1977.
3. "Manutenção de Instalações e Equipamentos Pneumáticos", Livro Didático, FESTO Didactic, São Paulo, SP, Brasil, 1977.
4. Moreira, I. S., "Técnicas de Comando Pneumático", SENAI-SP, São Paulo, SP, Brasil, 1991.