



ENGENHEIRO ELÉTRICO/ INSTRUMENTAÇÃO

ATUADORES



Ministério de
Minas e Energia



ENGENHEIRO ELÉTRICO / INSTRUMENTAÇÃO ATUADORES

© PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.
Todos os direitos reservados e protegidos pela Lei 9.610, de 19.2.1998.

É proibida a reprodução total ou parcial, por quaisquer meios, bem como a produção de apostilas, sem autorização prévia, por escrito, da Petróleo Brasileiro S.A. – PETROBRAS.

Direitos exclusivos da PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

Hermi, Helder Anibal
Revisão: Auteliano Antunes dos Santos Júnior
DPM-FEM-Unicamp
Atuadores, UNICAMP 2007.

103 p.:103il.

PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S.A.

Av. Almirante Barroso, 81 – 17º andar – Centro
CEP: 20030-003 – Rio de Janeiro – RJ – Brasil



ÍNDICE

Apresentação	10
1. Atuadores - Generalidades	11
2. Atuadores Elétricos	13
2.1 Motores elétricos	13
2.2 Motores de Corrente Contínua	14
2.3 Motores de Corrente Alternada	23
2.3.1 Motores Síncronos	23
2.3.2 Motores Assíncronos	24
2.3.3 Motores de Indução Monofásicos	25
2.3.4 Motores de Indução Trifásicos	26
2.4 Motores Elétricos Especiais	30
2.4.1 Servo-motores	30
2.4.2 Motores de passo	31
2.5 Questionário sobre atuadores elétricos	40
3. Atuadores Pneumáticos	41
3.1 Cilindros de movimento linear	40
3.1.1 Cilindros de simples ação	41
3.1.2 Cilindro de dupla ação	42
3.1.3 Cilindro com amortecimento	43
3.1.4 Cilindro de membrana	43
3.1.5 Cilindro telescópico	44
3.1.6 Cilindro com dupla haste ou haste passante	45
3.1.7 Cilindro em Tandem	45
3.1.8 Cilindro sem haste	46
3.1.9 Cilindros de múltiplas posições	46
3.2 Cilindro de movimento giratório	47
3.2.1 Cilindro Rotativo com cremalheira	47
3.2.2 Cilindro Rotativo palheta	48
3.2.3 Cilindro de cabos	48
3.3 Tipos de fixação dos cilindros	49
3.4 Cálculo da força do cilindro	49
3.5 Flambagem da haste	50
3.6 Controle da velocidade	51
3.7 Motores pneumáticos	51
3.7.1 Motor de palhetas	51
3.7.2 Motores de pistão	52
3.8 Turbomotores	53
3.8.1 Características dos Turbomotores	53
3.9 Elementos Especiais	54
3.9.1 Sistemas hidropneumáticos	54
3.9.2 Conversores de pressão	54
3.9.3 Variador de pressão hidropneumático	54
3.9.4 Unidade de avanço hidropneumática	55
3.9.5 Alimentador hidropneumático de avanço compassado	56
3.10 Mesa giratória	57
3.11 Válvulas Pneumáticas	58
3.11.1 Válvulas direcionais	58
3.11.2 Simbologia das válvulas	59
3.11.3 Definições das posições	59
3.11.4 Identificação das conexões	60
3.11.5 Posições e conexões	60
3.11.6 Forma de acionamento	62

3.12 Válvulas de assento	63
3.13 Válvula de assento prato de 3/2, NF	64
3.13.1 Válvula de 3/2 vias, com acionamento pneumático	65
3.13.2 Válvula de 3/2 vias acionada por rolete	65
3.13.3 Válvula de 3/2 vias servo-comandada por rolete	66
3.13.4 Válvulas corredeças	66
3.13.4.1 Válvula corredeça longitudinal	66
3.13.4.2 Válvulas de 3/2 NF, acionamento manual	68
3.13.4.3 Válvula de 3/2 NA, acionamento por ar comprimido	68
3.13.4.4 Válvula corredeça giratória	69
3.13.5 Válvula de 3/2 vias acionamento por solenóide	70
3.13.6 Válvula de 3/2 vias acionamento duplo solenóide	71
3.14 Válvulas de bloqueio	71
3.14.1 Válvula de retenção	72
3.14.2 Válvula de retenção pilotada	72
3.15 Válvula alternadora ("OU")	72
3.16 Válvula de simultaneidade ("E")	73
3.17 Válvula de escape rápido	74
3.18 Expulsor pneumático	74
3.19 Válvulas controladoras de vazão	75
3.19.1 Válvula de fluxo	75
3.19.2 Válvula reguladora de fluxo unidirecional	75
3.19.3 Válvula de Regulagem da velocidade	76
3.20 Válvulas de pressão	76
3.20.1 Válvula reguladora de pressão	76
3.20.2 Válvula limitadora de pressão	78
3.20.3 Válvula de seqüência (pressostato)	79
3.21 Válvulas especiais	79
3.21.1 Válvula de tempo	79
3.22 Representações de grupos e movimentos	81
3.23 Representação dos elementos	82
3.23.1 Definição das posições dos elementos (VDI 3260)	82
3.23.2 Representação simbólica dos elementos	83
3.24 Questionário sobre atuadores pneumáticos	84
4. Atuadores Hidráulicos	85
4.1 Força do Cilindro	86
4.2 Curso do Cilindro	86
4.3 Volume do Cilindro	86
4.4 Velocidade da Haste	87
4.5 Guarnições	87
4.6 Dreno da Guarnição	88
4.7 Choque Hidráulico	88
4.8 Amortecimentos	88
4.9 Estilo de Montagem do Cilindro	89
4.10 Tipos de Cargas de Cilindro	89
4.11 Tubo de Parada	90
4.12 Tipos de Cilindros Hidráulicos	91
4.13 Atuadores Rotativos	94
4.13.1 Osciladores Hidráulicos	94
4.13.2 Oscilador de Palheta	95
4.13.3 Motores Hidráulicos	95
4.14 Motores de Engrenagem	97
4.15 Motor Tipo Gerotor	98
4.16 Motores de Pistão	99
4.17 Considerações finais sobre Atuadores Hidráulicos	99
4.18 Questionário sobre atuadores hidráulicos	101
Bibliografia	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Motor de corrente contínua com dois pólos.	15
Figura 2 - Motor de corrente contínua com 2 pólos e 4 bobinas no rotor.	16
Figura 3 - Princípio de funcionamento de motores CC.....	17
Figura 4 - Ligações elétricas do motor de corrente contínua.....	19
Figura 5: Curva característica de torque do motor CC série.	19
Figura 6: Curva velocidade em função da corrente de armadura no motor CC série.....	20
Figura 7 - Curva torque x corrente de armadura.....	21
Figura 8 - Velocidade x corrente de armadura.	21
Figura 9 - Ajuste de velocidade através do fluxo do motor.	22
Figura 10 – Gráfico de relação entre torques e cargas em um motor elétrico.	23
Figura 11 - Rotor “Gaiola de Esquilo”	24
Figura 12 - Motor de Indução Monofásico de Dois Pólos.	25
Figura 13 - Motor de Indução Monofásico.	25
Figura 14 - Esquemas de ligação do motor de indução monofásico.	26
Figura 15 - Princípio de funcionamento elétrico do motor CA trifásico.....	27
Figura 16 - Esquemas de Ligação do Motor de Indução Trifásico.	28
Figura 17 - Torque e Corrente de um Motor de Indução Trifásico.	29
Figura 18 - Motor de passo de relutância variável, que possui três enrolamentos.	31
Figura 19 - Motor de 30° por passo.	32
Figura 20 – Exemplo de Motor de Passo Unipolar.	33
Figura 21 - Motor de Passo Bipolar.	34
Figura 22 – Esquema para o Motor Multifase.	35
Figura 23 - Exemplo básico do bloco lógico + eletrônico.	37
Figura 24 – Exemplo de passo simples.	37
Figura 25 - Circuito eletrônico para controle lógico de motores de passo.	38
Figura 26 – Exemplo de passo alternativo.	38
Figura 27 – Circuito eletrônico para controle lógico de motores de passo.	38
Figura 28 - Circuito eletrônico para controle lógico de direção de motor de passo.....	39
Figura 29 - Cilindro de simples ação, de êmbolo..	41
Figura 30 - Cilindro de ação simples. Detalhes mecânicos	42
Figura 31 - Cilindro de dupla ação.	42
Figura 32 - Cilindro com amortecimento.	43
Figura 33 - Cilindro de membrana.....	44
Figura 34 - Cilindro de membrana plana.	44
Figura 35 - Cilindro telescópio.	45
Figura 36 - Cilindro de dupla haste (ou haste passante).	45
Figura 37 - Cilindro em Tandem.....	46
Figura 38 - Cilindro sem haste..	46
Figura 39 - Cilindros de múltiplas posições.	47
Figura 40 - Cilindro Rotativo com cremalheira..	48
Figura 41 - Cilindro rotativo palheta.	48
Figura 42 - Cilindro de cabos.	49
Figura 43 - Tipos de fixação.	49
Figura 44 -: Motor de palhetas.	52
Figura 45 - Motor a pistão, radial..	52
Figura 46 - Motor a pistão, axial.	53
Figura 47 - Conversor de pressão..	55
Figura 48 - Intensificador de pressão.	55
Figura 49 - Unidade de avanço hidropneumática.	56
Figura 50 - Unidade de avanço hidropneumática com acionamento giratório.	56
Figura 51 - Alimentador de avanço compassado.	57

Figura 52 - Esquema para a mesa giratória.	58
Figura 53 - Válvula de assento esférico.	63
Figura 54 - Válvula de assento prato.	64
Figura 55 - Válvula de assento prato de 3/2, normalmente fechada	64
Figura 56 - Ligação comando direto com válvula de assento prato de 3/2, normal fechada	65
Figura 57 - Válvula de 3/2 vias, com acionamento pneumático.	65
Figura 58 - Válvula de 3/2 vias acionada por rolete	66
Figura 59 - Válvula de 3/2 vias servo-comandada por rolete	59
Figura 60 - Válvula corredeira longitudinal	60
Figura 61 - Ligação comando indireto com Válvula corredeira longitudinal.	68
Figura 62 - Válvulas de 3/2, normalmente fechada, acionamento manual.	68
Figura 63 - Válvula de 3/2, normalmente aberta, acionamento por ar comprimido	69
Figura 64 - Ligação comando direto com válvula de 3/2, normalmente aberta.	69
Figura 65 - Válvula corredeira giratória.	70
Figura 66 - Ligação comando direto com válvula corredeira giratória	70
Figura 67 - Válvula de 3/2 vias acionamento por solenóide.	71
Figura 68 - Válvula de 3/2 vias acionamento duplo solenóide.	71
Figura 69 - Válvula de retenção.	72
Figura 70 - Válvula de retenção pilotada.	72
Figura 71 - Válvula alternadora ("OU").	73
Figura 72 - Válvula de simultaneidade ("E").	73
Figura 73 - Válvula de escape rápido.	74
Figura 74 - Expulsor pneumático.	75
Figura 75 - Válvula de controle de fluxo bidirecional.	75
Figura 76 - Válvula de controle de fluxo unidirecional.	76
Figura 77 - Válvula reguladora de pressão com orifício de escape.	77
Figura 78 - Detalhes da válvula reguladora de pressão com orifício de escape.	77
Figura 79 - Válvula reguladora de pressão sem orifício de escape.	78
Figura 80 - Válvula limitadora de pressão	78
Figura 81 - Válvula de seqüência (pressostato)	79
Figura 82 - Válvula temporizadora Normal Fechada (N.F.).	80
Figura 83 - Válvula temporizadora Normal Aberta (N.A.).	81
Figura 84 - Definição de grupos.	82
Figura 85 - Sistema hidráulico de transmissão de força.	87
Figura 86 - Sistema de dreno da guarnição.	88
Figura 87 - Sistema de amortecimento para cilindros hidráulicos	89
Figura 88 - Tipos de Cargas de Cilindro	90
Figura 89 - Exemplos de tubos de parada.	91
Figura 90 - Cilindro de simples ação	91
Figura 91 - Cilindro com retorno com mola.	92
Figura 92 - Cilindro martelo.	92
Figura 93 - Cilindro de dupla ação.	92
Figura 94 - Cilindro de haste dupla	93
Figura 95 - Cilindro telescópico ou de múltiplo estágio	93
Figura 96 - Cilindro duplex contínuo ou cilindro Tandem	93
Figura 97 - Cilindro duplex	94
Figura 98 - Exemplo de Oscilador Hidráulico.	94
Figura 99 - Motor tipo palheta.	95
Figura 100 - Exemplos de mecanismos para extensão das Palhetas do Motor.	96
Figura 101 - Esquema para o Motor de Engrenagem.	97
Figura 102 - Motor tipo gerotor.	98
Figura 103 - Detalhe construtivo de motor de pistão.	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Comparação dos Diferentes Atuadores.	12
Tabela 2: Simbologia para válvulas em circuitos pneumáticos.	59
Tabela 3: Posições que uma válvula simples pode assumir.	59
Tabela 4: Identificação das vias das válvulas.	60
Tabela 5: Posições e símbolos.	61
Tabela 6: Tipos de acionamento.....	62
Tabela 7: Elementos no estado inicial.	83

APRESENTAÇÃO

Este curso visa familiarizar engenheiros e outros profissionais de nível superior com as principais tecnologias disponíveis aplicadas em atuadores. Tais tecnologias são normalmente utilizadas em sistemas mecatrônicos em geral. Ao longo do texto são descritos os principais atuadores elétricos, pneumáticos e hidráulicos, pormenorizando as suas principais características específicas.

O objetivo do tratamento adotado é capacitar o profissional dedicado ao projeto e manutenção em automação para atuar em uma vasta gama de processos automatizados modernos, que exigem sua constante atualização tecnológica.

1. ATUADORES – GENERALIDADES

Atuadores são elementos que produzem movimentos, atendendo a comandos que podem ser manuais ou automáticos. São usados em automação para entregar à planta a excitação necessária para seu funcionamento, na forma de energia adequada. Se o funcionamento da planta estiver baseado em algum movimento de uma de suas partes, serão necessários atuadores para fornecer energia mecânica para o movimento. Por exemplo, se a planta for um sistema térmico, será necessário um atuador que forneça energia térmica para atingir uma temperatura desejada.

Para geração de forças, movimentos e sinais existem tecnologias utilizadas dentro do contexto da automação, ligadas às disciplinas de mecânica, eletricidade, pneumática e hidráulica, além de outras.

Cada tecnologia tem suas próprias aplicações e características. Os atuadores hidráulicos se caracterizam por terem como fonte de energia um líquido que se desloca por um duto com uma pressão adequada, geralmente óleo ou água. Os atuadores pneumáticos têm como fonte de energia um gás pressurizado, geralmente ar comprimido. Os atuadores elétricos usam energia elétrica.

Em um mesmo circuito podemos utilizar uma ou mais técnicas, de acordo com as vantagens e desvantagens de cada uma. A tabela 1 mostra algumas características de cada técnica utilizada.

Tabela 1: Comparação dos Diferentes Atuadores.

	<u>Eletricidade</u>	<u>Hidráulica</u>	<u>Pneumática</u>
Vazamentos	Não há.	Existe com risco de contaminação.	Existe sem risco de contaminação
Influências Ambientais	Risco de curto circuito, sobrecargas e, conseqüentemente, incêndio. Insensível à temperatura.	Sensível em função da temperatura	Resistente à explosão, insensível à temperatura.
Reserva de energia	Em pequenas quantidades – baterias	Limitada, com ajuda de gases.	Fácil
Transmissão de energia	Limitada, com perda.	Velocidade do fluxo limitada (>100 m, v= 2 a 6m/s)	Velocidade do fluxo (>100 m v=20 a 40 m/s).
Velocidade de operação	Limitado no trabalho retilíneo	V = 0,5 m/s retilíneo	V = 1,5 m/s retilíneo
Força	Elevada Magnitude	Proteção contra sobrecarga. Forças elevadas podem ser geradas F<3000 KN a 600 bar de pressão. Em função do limite da pressão, não são executados trabalhos acima do limite.	Proteção contra sobrecarga. Forças limitadas por pressão F<30 KN a 6 bar de pressão. Em função do limite da pressão, não são executados trabalhos acima do limite.
Precisão	Precisão para +- 1µm é fácil de atingir	Precisão de +- 1µm.	Sem mudança de carga precisão de 1/10 mm.

2. ATUADORES ELÉTRICOS

2.1 Motores elétricos

A energia está disponível na natureza sob diversas formas, tais como mecânica, térmica, luminosa dentre as outras. No entanto, a energia mecânica é a mais conhecida e sobre a qual o homem tem mais domínio. A energia mecânica tal como está disponível na natureza, é de difícil utilização prática, além de ser uma energia variável no tempo. A forma de utilizá-la é pela sua conversão em energia elétrica através das máquinas elétricas conhecidas como geradores. A energia elétrica possui as vantagens de ser uma energia limpa, de fácil transporte e de fácil manuseio, podendo ser reconvertida em energia térmica, luminosa, eletromagnética, e também em energia mecânica. Quem efetua esta última transformação são as máquinas elétricas, conhecidas como motores. Portanto, o motor é um elemento de trabalho que converte energia elétrica em energia mecânica de rotação. Já o gerador é uma máquina que converte energia mecânica de rotação em energia elétrica.

Num motor elétrico, distinguem-se essencialmente duas peças: o estator, conjunto de elementos fixados à carcaça da máquina, e o rotor, conjunto de elementos fixados em torno do eixo, internamente ao estator. O rotor é composto de:

a) Eixo da Armadura, que é responsável pela transmissão de energia mecânica para fora do motor, pelo suporte dos elementos internos do rotor e pela fixação ao estator, por meio de rolamentos e mancais.

b) Núcleo da Armadura, composto de lâminas de Fe-Si, isoladas umas das outras, com ranhuras axiais na sua periferia para a colocação dos enrolamentos da armadura.

c) Enrolamento da Armadura, que são bobinas isoladas entre si e eletricamente ligadas ao comutador.

d) Comutador, que consiste em um anel com segmentos de cobre isolados entre si, e eletricamente conectados às bobinas do enrolamento da armadura.

O estator é composto de:

a) Carcaça, que serve de suporte ao rotor, aos pólos e de fechamento de caminho magnético.

b) Enrolamento de campo, composto por bobinas que geram um campo magnético intenso nos pólos.

c) Pólos ou sapatas polares, que distribuem o fluxo magnético produzido pela bobinas de campo.

d) Escovas, que são barras de carvão e grafite que estão em contato permanente com o comutador.

As máquinas elétricas possuem praticamente os mesmos elementos principais, porém com diferenças importantes entre eles. Às vezes, a bobina de armadura está no estator e não no rotor; a inversão também acontece com a bobina de campo. Outras, não possuem escovas. Outras ainda, não possuem bobina de armadura, e assim por diante. Porém, as designações apresentadas para os componentes são gerais e valem para a maioria das máquinas elétricas.

De forma geral os motores elétricos são classificados em:

1. Motores de Corrente Contínua
2. Motores Série
3. Motores Paralelo
4. Motores Composto ou Misto
5. Motores de Corrente Alternada
6. Motores Síncronos
7. Motores Assíncronos
8. Motores Especiais
9. Servo-motores
10. Motores de Passo
11. Universais

Todo o motor apresenta suas principais características elétricas escritas no lado externo de sua carcaça ou em uma placa de identificação. Os principais dados elétricos são: tipo de motor, tensão nominal, corrente nominal, frequência, potência mecânica, velocidade nominal, esquema de ligação, grau de proteção, temperatura máxima de funcionamento, fator de serviço, etc.

2.2 Motor de Corrente Contínua

A figura 1 mostra as partes internas de uma máquina de corrente contínua básica e sua representação. O motor de corrente contínua apresenta quatro terminais acessíveis, dois para as bobinas de campo (terminais 3 e 4) e dois para as bobinas de armadura (terminais 1 e 2). Em alguns motores de baixa potência, as bobinas de campo são substituídas por ímãs permanentes. Neste caso, o motor apresenta apenas dois terminais de acesso (terminais 1 e 2).

O princípio de funcionamento elementar de um motor de corrente contínua está baseado na força mecânica que atua sobre um condutor imerso num campo magnético, quando sobre ele circula uma corrente elétrica. Observe a figura 2. Na bobina 1, as forças são iguais e opostas, não produzindo nenhuma força de rotação (torque ou par binário), mas as bobinas 2, 3 e 4 têm sobre elas

uma força F_x , que causa um torque que impulsiona o rotor para girar. A rotação faz com que a bobina 1 assumira a posição da bobina 2, e então passe a exercer uma força no sentido da rotação também. Observe que, para este esquema funcionar, é necessário inverter o sentido da corrente da armadura a cada 180° , ou o torque resultante será nulo. O elemento que faz a comutação do sentido da corrente é o comutador.

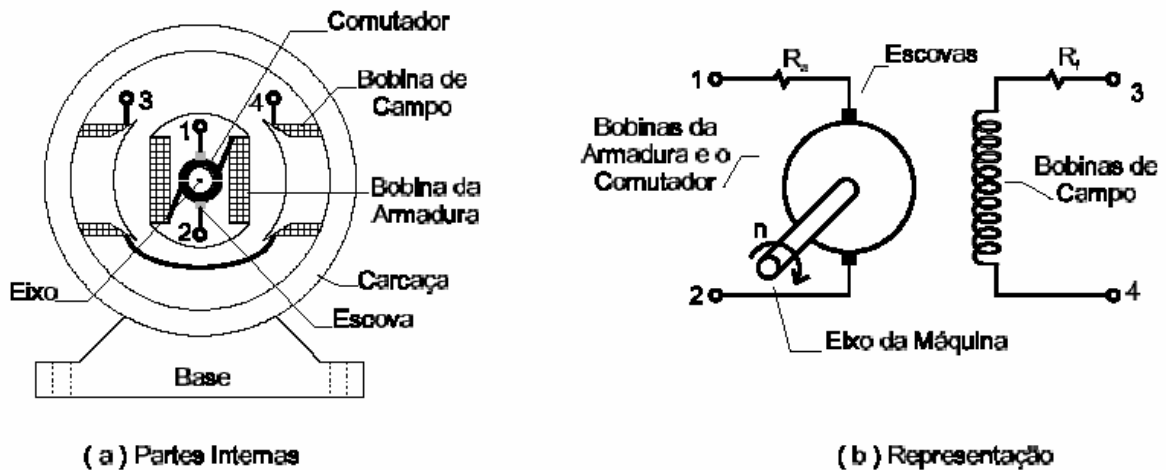


Figura 1 - Motor de corrente contínua com dois pólos.

É sabido que, quando um condutor está imerso num campo magnético, se deslocando com certa velocidade “ v ” dentro deste campo, é induzida uma corrente elétrica sobre ele. Observe que o sentido desta corrente elétrica é contrário ao sentido mostrado na figura 2. Por isso essa força eletromotriz induzida é chamada de Força-contra-eletromotriz induzida – f_{cem} - simbolizada por E_c . A equação fundamental do torque nos motores é dada por:

$$T = K_1 \cdot \phi \cdot I_a \quad (\text{N} \cdot \text{m}) \quad (1)$$

onde:

- ϕ = Fluxo magnético produzido pelos pólos;
- I_a = Corrente que circula pelas bobinas da armadura;
- K_1 = Constante construtiva do rotor das máquinas elétricas.

A f_{cem} gerada pelo movimento do motor é dada por:

$$E_c = K_2 \cdot \phi \cdot n \quad (\text{volts}) \quad (2)$$

onde:

- n = número de rotações por minuto;
- K_2 = constante construtiva do campo magnético.

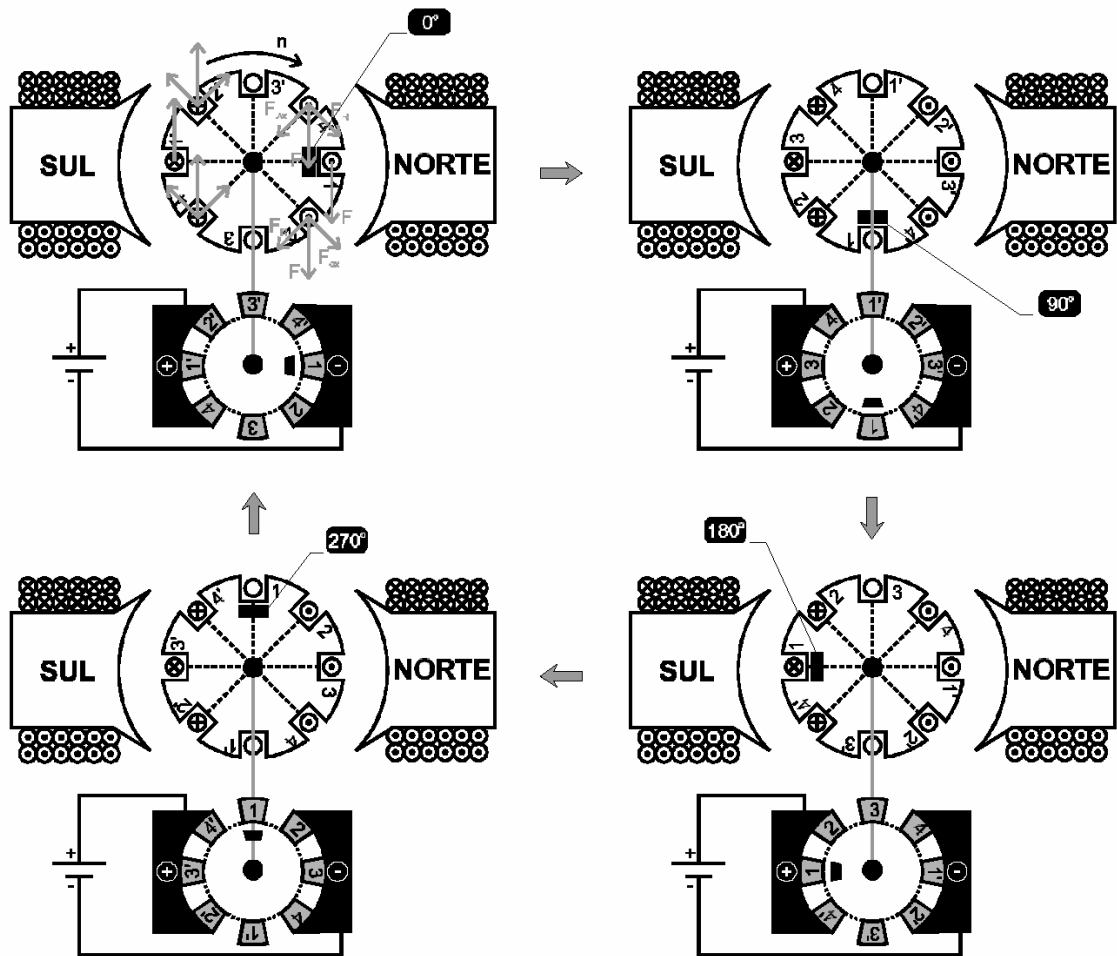


Figura 2 - Motor de corrente contínua com 2 pólos e 4 bobinas no rotor.

O fluxo magnético, por sua vez, depende da corrente de campo I_f , pela seguinte expressão:

$$\phi = K_3 \cdot I_f \quad (3)$$

Tanto as bobinas de campo como as bobinas de armadura apresentam uma resistência elétrica a passagem da corrente, chamadas aqui de R_f e R_a respectivamente.

Através da análise do circuito do rotor, pode-se concluir que:

$$\begin{aligned} V_a &= I_a R_a + E_c \\ E_c &= V_a - I_a R_a \end{aligned} \quad (4)$$

Como E_c varia com a velocidade e o fluxo, podemos substituir E_c na equação (2) e isolar a velocidade n (em rpm). Então:

$$n = \frac{V_a - I_a R_a}{K_2 \cdot \phi} \quad (5)$$

Esta equação é fundamental, pois demonstra que a velocidade do motor depende da tensão aplicada na armadura, da corrente na bobina e do valor do fluxo magnético. Importante se faz notar que a velocidade do motor tende ao infinito quando o fluxo tende a zero. Conseqüentemente, não se deve tirar, sob hipótese alguma, a corrente de campo, pois o motor “dispara”.

O funcionamento do motor de corrente contínua também pode ser baseado na ação de forças magnéticas sobre o rotor, geradas pela interação do campo magnético criado pelas bobinas de campo com o campo magnético criado pelas bobinas da armadura. Observa-se que o comutador possui a função de inverter o sentido da corrente na bobina da armadura em 90° e 270° dando continuidade ao movimento rotativo do motor.

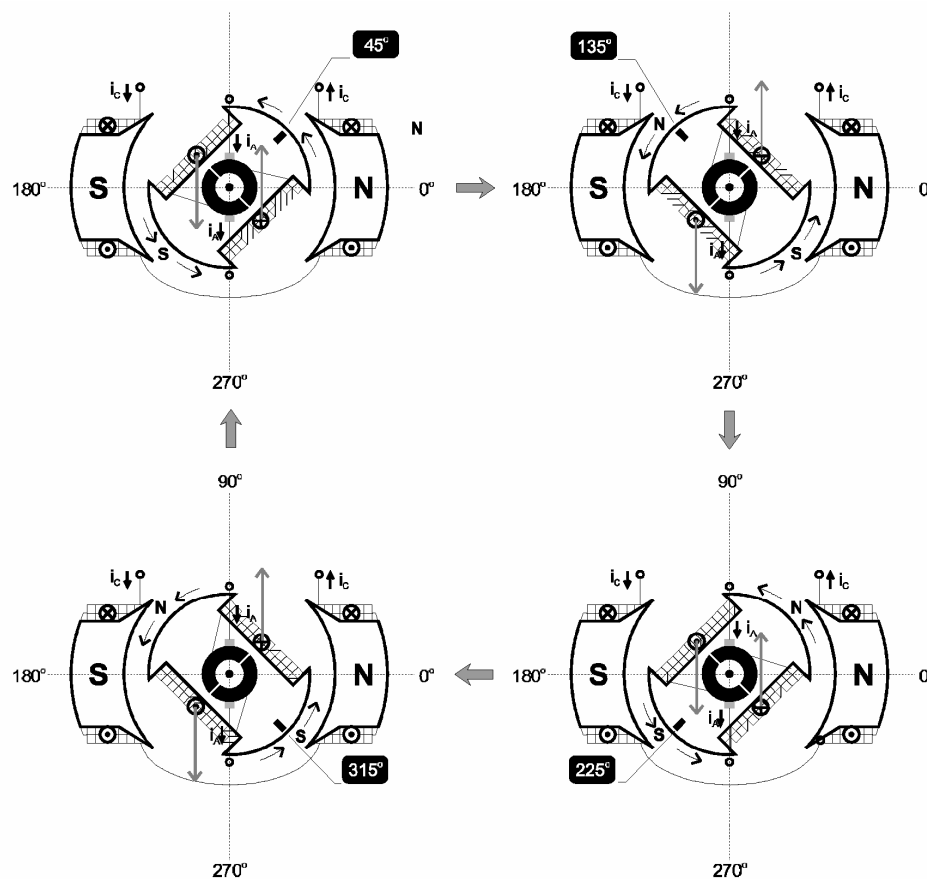


Figura 3 - Princípio de funcionamento de motores CC.

Como esquematizado na figura 3, a energia elétrica é fornecida aos condutores do enrolamento da armadura pela aplicação de uma tensão elétrica em seus terminais pelo anel comutador (coletor), fazendo com que se circule uma corrente elétrica nesse enrolamento, que produz um campo magnético no enrolamento da armadura.

Como o corpo do estator é constituído de materiais ferromagnéticos, ao aplicarmos tensão nos terminais do enrolamento de campo da máquina, temos a presença de campos magnéticos no mesmo e, portanto, a atuação de pólos magnéticos (Norte e Sul) espalhados por toda a extensão do estator.

Pela atuação do anel comutador, que tem como função alternar o sentido de circulação da corrente no enrolamento da armadura, quando aplicamos uma tensão no comutador com a máquina parada, este transfere a tensão ao enrolamento da armadura, fazendo com que circule uma corrente pelo mesmo, o que produz um campo magnético.

A orientação desse campo, ou seja, as posições dos pólos norte e sul permanecem fixas. Simultaneamente temos uma tensão elétrica aplicada no enrolamento de campo no estator. Assim, ao termos a interação entre os campos magnéticos da armadura no rotor e do campo no estator, os mesmos tentarão se alinhar, ou seja, o pólo norte de um dos campos tentará se aproximar do pólo sul do outro.

Como o eixo da máquina pode girar, caso os campos da armadura e do estator não estejam alinhados, surgirá um binário de forças que produzirá um torque no eixo, fazendo o mesmo girar. Ao girar, o eixo move o anel comutador que é montado sobre este. O movimento do anel comutador muda o sentido de aplicação da tensão, o que faz com que a corrente circule no sentido contrário, mudando o sentido do campo magnético produzido.

Assim, ao girar, o anel comutador muda a posição dos pólos norte e sul do campo da armadura e, como o campo produzido pelo enrolamento de campo no estator fica fixo, temos novamente a produção do binário de forças que mantém a mudança dos pólos e, conseqüentemente, o movimento do eixo da máquina.

Tipos de Motores de Corrente Contínua

Os motores CC são divididos de acordo com o tipo de conexão entre as bobinas do rotor e do estator. Se forem conectados em série, são chamados de Motor Série. Se em paralelo, são chamados de Motor Paralelo. Se a conexão for mista, são chamados de Motor Misto ou Composto. A figura 4 mostra a conexão série, a conexão paralelo e a conexão independente na qual tanto o enrolamento da armadura como o do estator são ligados à fontes de tensão independentes uma da outra. Neste tipo de conexão a velocidade da máquina pode ser ajustada tanto pelo ajuste da tensão da armadura como pela tensão de campo. Esta conexão é utilizada principalmente no acionamento de bombas, compressores, tornos, bobinadeiras e máquinas têxteis.

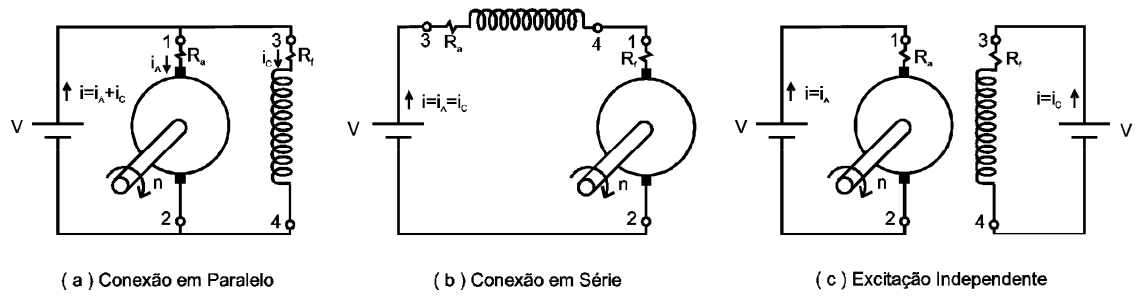


Figura 4 - Ligações elétricas do motor de corrente contínua.

Motor CC Série

Neste tipo de motor, a corrente que circula pelo campo é a mesma que circula pela armadura. Como o torque é proporcional ao fluxo magnético, que por sua vez é proporcional à corrente de campo, concluímos que neste motor o torque é dado por:

$$T = K \cdot I_a^2 \quad (6)$$

O torque apresenta uma relação parabólica com a corrente de armadura. A corrente de armadura é grande na partida, já que E_c é zero, pois não há movimento do rotor. Conclui-se, portanto, que o torque de partida do motor série é muito grande.

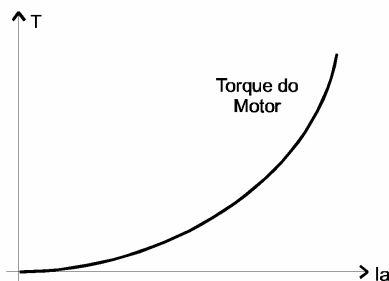


Figura 5: Curva característica de torque do motor CC série.

Devido a esta característica, este tipo de motor é utilizado para acionar trens elétricos, metrô, elevadores, ônibus e automóveis elétricos, etc. Este motor é conhecido como motor universal, por poder funcionar em corrente alternada. Porém, sua aplicação só é viável economicamente para pequenos motores de fração de CV. A velocidade do motor série é dada por, conforme representado na figura 6:

$$n = \frac{V_a - I_a (R_a + R_f)}{K \cdot I_a} \quad (7)$$

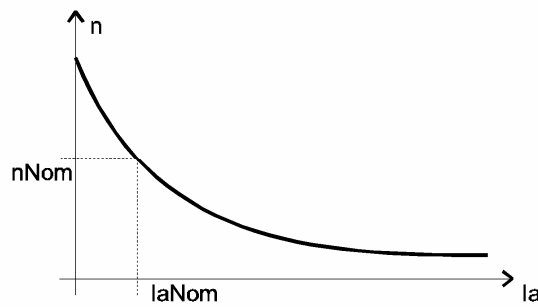


Figura 6: Curva velocidade em função da corrente de armadura no motor CC série.

Portanto, no motor série a vazio, com baixa corrente de armadura, a velocidade tende a ser alta, o que é indesejável. Assim, este tipo de motor deve partir com uma carga mecânica acoplada ao seu eixo. Também se percebe que este motor nunca vai disparar, pois a sua velocidade não depende da corrente de campo: se a corrente de armadura for a zero, não há torque e sua velocidade cai a zero também.

Motor Paralelo ou Shunt

No caso do motor Shunt, a corrente de armadura somada à corrente de campo fornece a corrente da fonte de alimentação do motor. Nesse caso, a tensão aplicada na armadura é a mesma que é aplicada no campo. Dessa forma, o fluxo magnético produzido pelo campo é praticamente constante, já que I_F permanece praticamente constante. Então, o torque do motor é função apenas da corrente de armadura.

Para a inversão do sentido de rotação nos motores de corrente contínua, basta inverter as conexões das bobinas de campo (trocar o terminal 3 pelo 4) ou inverter as conexões da bobina da armadura (trocar o terminal 1 pelo 2). Caso o motor seja de ímã permanente, basta inverter os terminais da armadura. A relação entre o torque e a corrente é dada pela equação (8).

$$T = K \cdot I_a \quad (8)$$

A curva Torque x Corrente de armadura é mostrada na figura 7.

Neste tipo de motor, o torque de partida não é tão alto quanto no motor série, portanto não deve ser usado em cargas que exigem alto torque de partida. A velocidade do motor paralelo depende de I_a , já que o fluxo é constante, pela equação:

$$n = \frac{V_a - I_a R_a}{K\phi} \quad (9)$$

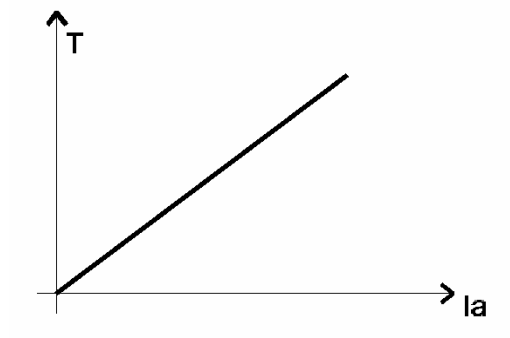


Figura 7 - Curva torque x corrente de armadura.

Então, se a corrente de armadura for grande (na partida), a velocidade do motor é pequena e cresce à medida que aumenta a E_c (que por sua vez diminui I_a), até alcançar o seu valor nominal. Este motor não tem problemas de excesso de velocidade na partida sem carga. O gráfico da figura 8 mostra a velocidade em função da corrente de armadura.

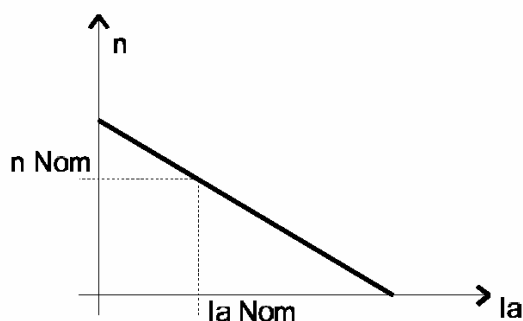


Figura 8 - Velocidade x corrente de armadura.

Inversão no Sentido de Rotação e Controle de Velocidade

Para inverter o sentido de rotação de qualquer motor CC é necessário inverter a corrente de armadura em relação a corrente de campo. Deve-se inverter somente uma delas; a inversão em ambos os circuitos manterá o mesmo sentido de rotação.

No momento da inversão, o motor que está girando num sentido, entra num processo de frenagem (freio) até alcançar a velocidade zero e depois começa a girar no sentido contrário. Essa etapa de frenagem é muito importante para trens, elevadores e guindastes, que necessitam de força para a frenagem.

A principal aplicação dos motores de corrente contínua é o acionamento de máquinas com controle preciso de velocidade. Os métodos mais utilizados para este fim são:

- Ajuste da tensão aplicada na armadura do motor;

- Ajuste da corrente nas bobinas de campo, ou seja, controle do fluxo magnético do motor;
- Combinação dos anteriores.

O controle de velocidade pode ser realizado através de um conversor estático CC ou por meio de um reostato, como mostra a figura 9. Neste caso, se controla a velocidade através do ajuste da corrente das bobinas de campo.

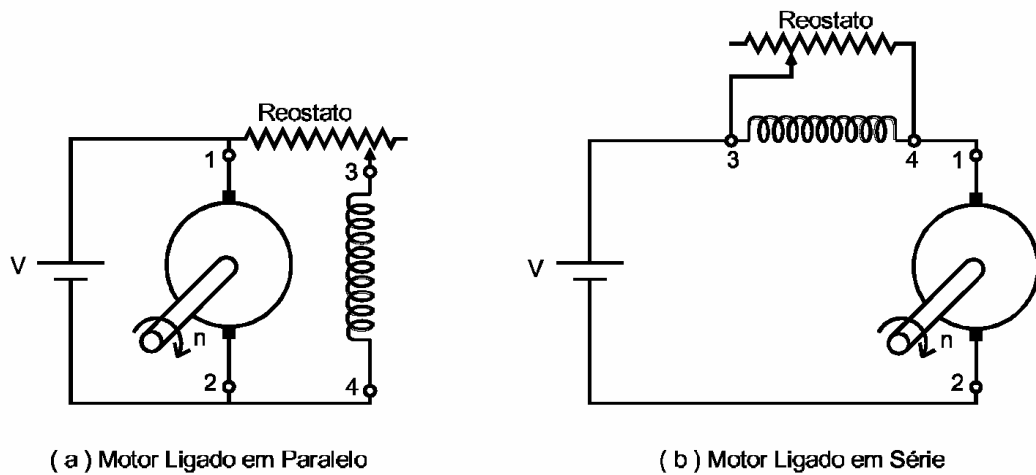


Figura 9 - Ajuste de velocidade através do fluxo do motor.

Torque do Motor e Resistente

O torque do motor é a medida do esforço necessário para fazer girar um eixo, e é dado pela equação:

$$T = F \cdot \text{raio} \quad (\text{N.m}) \quad (10)$$

No caso de qualquer motor, o torque de partida deve ser maior do que o torque resistente acoplado ao eixo. Após certo tempo depois que o motor partiu, na velocidade nominal, há o encontro das curvas de torque do motor e do torque resistente. Na curva mostrada na figura 10, pode ser observado que, quando a carga mecânica no eixo varia, o torque motor varia junto. Conseqüentemente, a velocidade de rotação do motor varia. Por exemplo, se a carga mecânica diminui, o torque do motor também diminui e a velocidade aumenta, estabilizando num novo regime. No gráfico da figura 10, pode ser observado o comportamento, tanto para cargas lineares como para cargas quadráticas.

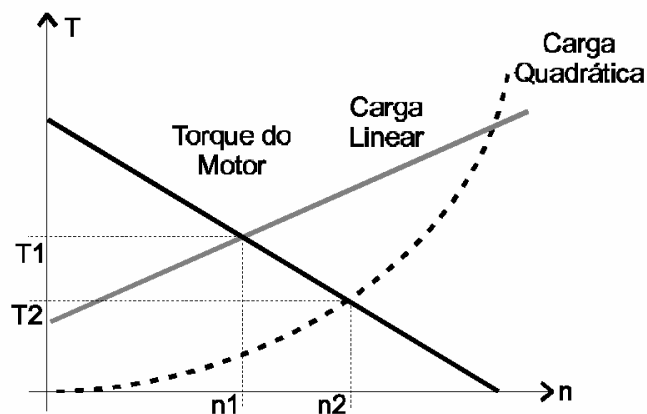


Figura 10 – Gráfico de relação entre torques e cargas em um motor elétrico.

2.3 Motores de Corrente Alternada

Neste tipo de motor, o fluxo magnético do estator é gerado nas bobinas de campo pela corrente alternada da fonte de alimentação monofásica ou trifásica. Portanto, trata-se de um campo magnético cuja intensidade varia continuamente e cuja polaridade é invertida periodicamente. Quanto ao rotor, há dois casos a considerar, que são os Motores Síncronos e os Motores Assíncronos.

2.3.1 Motores Síncronos

No motor síncrono, o rotor é constituído por um ímã permanente ou bobinas alimentadas em corrente contínua, mediante anéis coletores. Neste caso, o rotor gira com uma velocidade diretamente proporcional a frequência da corrente no estator e inversamente proporcional ao número de pólos magnéticos do motor. São motores de velocidade constante e são empregados em casos onde essa constância é importante. São utilizados somente para grandes potências devido ao seu alto custo de fabricação.

A equação (11) define a velocidade síncrona n_s deste tipo de motor:

$$n_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (11)$$

onde:

- . n_s : velocidade síncrona (rpm)
- . f : frequência da corrente do rotor (Hz)
- . p : número de pólos magnéticos do motor

2.3.2 Motores Assíncronos

No motor assíncrono ou de indução, o rotor possui vários condutores conectados em curto-circuito, no formato de uma “gaiola de esquilo”, conforme mostra a figura 11.

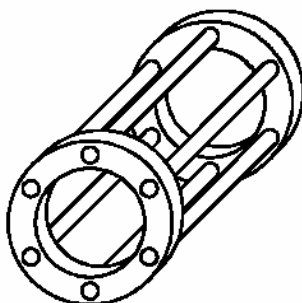


Figura 11 - Rotor “Gaiola de Esquilo”

A partir da análise da figura 12, pode-se verificar que o campo magnético variável no estator induz correntes senoidais nos condutores da gaiola do rotor. Estas correntes induzidas, por sua vez, criam um campo magnético no rotor que se opõe ao campo indutor do estator (Lei de Lenz). Como os pólos de mesmo nome se repelem, há uma força no sentido de giro no rotor. O rotor gira com uma velocidade n um pouco inferior à velocidade síncrona, isto é, a velocidade da corrente do campo. Como é um pouco inferior, diz-se que este motor é assíncrono, isto é, sem sincronia.

Este motor não consegue partir, isto é, acelerar desde a velocidade zero até a nominal. As forças que atuam nas barras curto-circuitadas se opõem uma à outra, impedindo o giro. Então, na partida, utiliza-se uma bobina de campo auxiliar, defasada de 90 graus das bobinas de campo principais, que cria um campo magnético auxiliar na partida. Assim, o fluxo resultante inicial está defasado em relação ao eixo das abscissas, produzindo um torque de giro (par binário). Após a partida, não há mais a necessidade do enrolamento auxiliar, pois a própria inércia do rotor mantém o giro.

A diferença em valores percentuais entre a velocidade síncrona e a velocidade do motor de indução é denominada de escorregamento, simbolizada pela letra S . O escorregamento dos motores de indução é variável em função da carga aplicada sobre o motor: é mínimo a vazio (sem carga) e máximo com a carga nominal. O escorregamento S dos motores de indução é expresso através da equação:

$$S = \frac{n_s - n}{n_s} \times 100 \quad (12)$$

onde n representa a velocidade do eixo do motor (rpm).

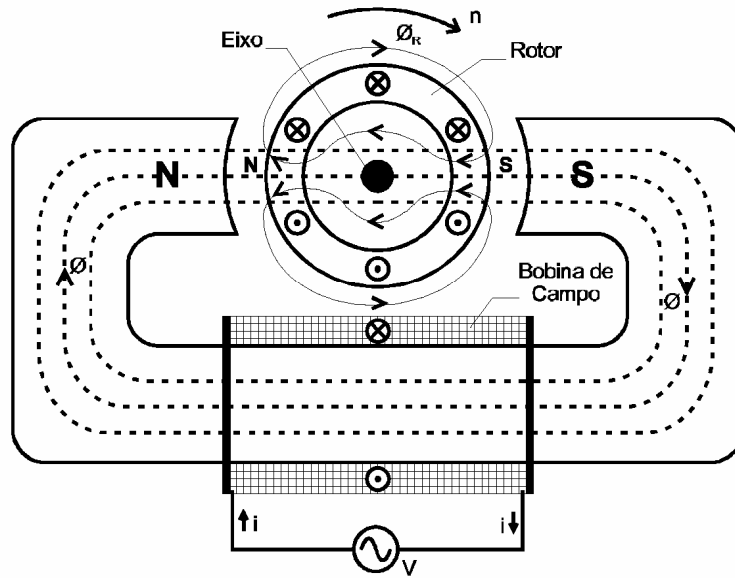


Figura 12 - Motor de Indução Monofásico de Dois Pólos.

Nota-se, através da análise das equações (11) e (12), que a velocidade dos motores síncronos e assíncronos pode ser controlada através do ajuste do valor da frequência da corrente nas bobinas do estator. Este tipo de acionamento é realizado através de um conversor estático de frequência.

Ao contrário dos motores síncronos e de corrente contínua, o motor assíncrono ou de indução é amplamente utilizado nas indústrias pela sua simplicidade construtiva, pequena necessidade de manutenção e baixo custo. Os motores de indução podem ser monofásicos ou trifásicos.

2.3.2 Motores de Indução Monofásicos

Conforme representado na figura 13, o motor de indução monofásico é um dispositivo elétrico de pequena ou média potência, geralmente menor que 5 CV. Para a produção do conjugado de partida, o motor de indução monofásico necessita de um segundo enrolamento de partida auxiliar (E_a) defasado de 90° do enrolamento de trabalho (E_t).

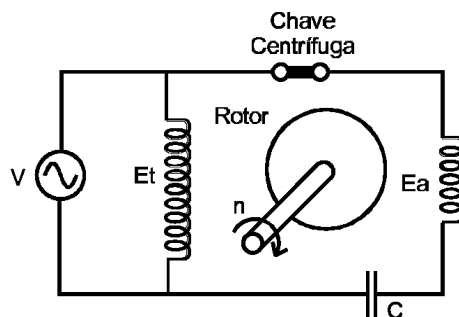


Figura 13 - Motor de Indução Monofásico.

O resultado da ação das correntes nos enrolamentos de trabalho e auxiliar é um campo magnético girante no estator, que faz o motor partir. Após a partida, o enrolamento auxiliar é desligado através de uma chave centrífuga, que opera a cerca de 75% da velocidade síncrona. O conjugado de partida, neste caso, é moderado.

Para aumentar o conjugado de partida é usado um capacitor ligado em série com o enrolamento auxiliar e a chave centrífuga. Esta técnica é utilizada para cargas em equipamentos com elevada resistência na partida, tais como compressores, bombas, equipamentos de refrigeração, etc.

Os motor de indução monofásicos comumente usados no Brasil apresentam seis terminais acessíveis, sendo quatro para os dois enrolamentos de trabalho E_t (1,2,3 e 4), bobinas projetadas para tensão de 127 V, e dois para o circuito auxiliar de partida (5 e 6), também projetado para a tensão de 127 V. A figura 14 mostra o esquema de ligação do motor de indução monofásico para as tensões de alimentação de 127 e 220 V fase-neutro.

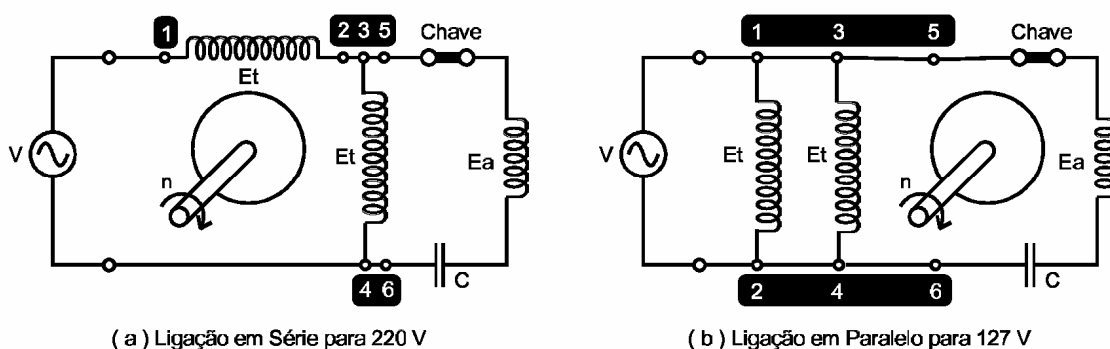


Figura 14 - Esquemas de ligação do motor de indução monofásico.

Em alguns motores de baixa potência, o circuito auxiliar de partida é substituído por espiras curto-circuitadas, chamadas de bobinas de arraste. Neste caso, a máquina apresenta dois ou quatro terminais para as bobinas de trabalho.

Para a inversão do sentido de rotação no motor de indução monofásico basta inverter as conexões do circuito auxiliar, ou seja, trocar o terminal 5 pelo 6. No motor com bobina de arraste não é possível inverter o sentido de rotação.

2.3.3 Motores de Indução Trifásicos

São motores elétricos de pequena, média ou grande potência, que não necessitam de circuito auxiliar de partida, ou seja, são mais simples, menores e mais leves que o motor de indução monofásico de mesma potência. Por isso este tipo de motor apresenta um custo menor. A figura 15 mostra o princípio de funcionamento do campo girante.

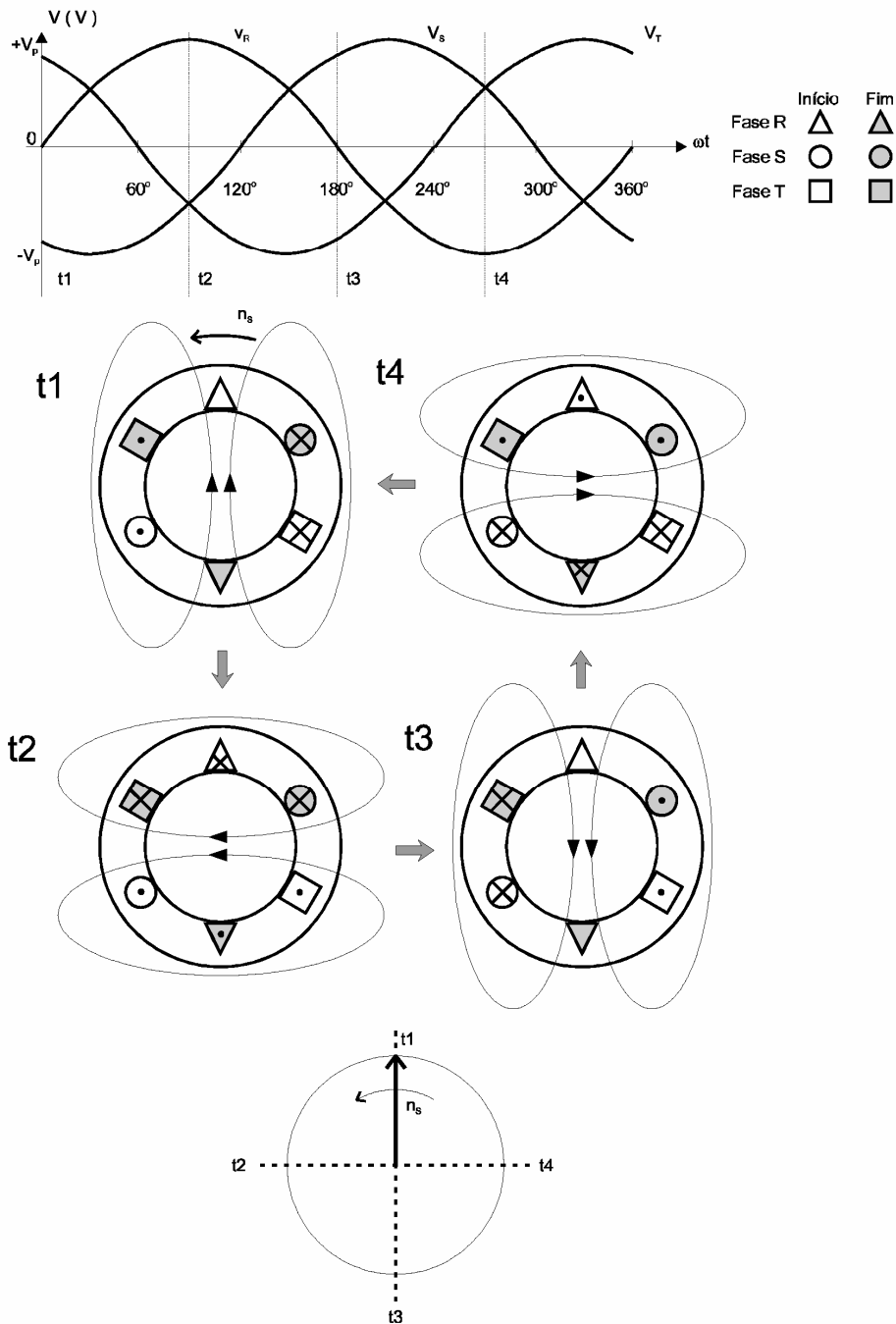


Figura 15 - Princípio de funcionamento elétrico do motor CA trifásico.

O motor de indução trifásico comumente usado no Brasil apresenta seis terminais acessíveis, dois para cada enrolamento de trabalho E_i . A tensão de alimentação destas bobinas é projetada para 220V. Para o sistema de alimentação 220/127V-60Hz este motor deve ser ligado em delta; para o sistema 380/220V-60Hz o motor deve ser ligado em estrela, conforme mostra a figura 16.

É fundamental para a partida com a chave estrela - triângulo que o motor tenha a possibilidade de ligação em dupla tensão, ou seja, em 220 / 380V, em 380/660V ou 440/760V. Os motores deverão ter no mínimo seis bornes de ligação. A partida estrela-triângulo poderá ser usada quando a curva de

conjugados do motor é suficientemente elevada para poder garantir a aceleração da máquina com a corrente de partida na ligação triângulo. Também a curva do conjugado é reduzida na mesma proporção.

Por este motivo, sempre que for necessária uma partida estrela-triângulo, deverá ser usado um motor com curva de conjugado elevado.

Antes de se decidir por uma partida estrela-triângulo, será necessário verificar se o conjugado de partida será suficiente para operar máquina. O conjugado resistente da carga não poderá ultrapassar o conjugado de partida do motor, nem a corrente no instante da mudança para triângulos poderá ser de valor inaceitável. Existem casos onde se tem um alto conjugado resistente, para os quais este sistema de partida não pode ser usado.

Se a partida for em estrela, o motor acelera a carga até aproximadamente 85% da rotação nominal. Neste ponto, a chave deverá ser ligada em triângulo. Neste caso, a corrente, que era de aproximadamente a nominal, ou seja, 100%, salta repentinamente para 320%, o que não é uma vantagem.

Na ligação Y, o motor acelera a carga até 95% da rotação nominal. Quando a chave é ligada em D, a corrente que era de aproximadamente 50%, sobe para 170%, ou seja, praticamente igual a da partida Y. Neste caso a ligação estrela-triângulo apresenta vantagem, porque se fosse ligado direto, absorveria da rede 600% da corrente nominal. A chave estrela-triângulo em geral só pode ser empregada em partidas da máquina em vazio, isto é, sem carga. Somente depois de ter atingido a rotação nominal, a carga poderá ser aplicada.

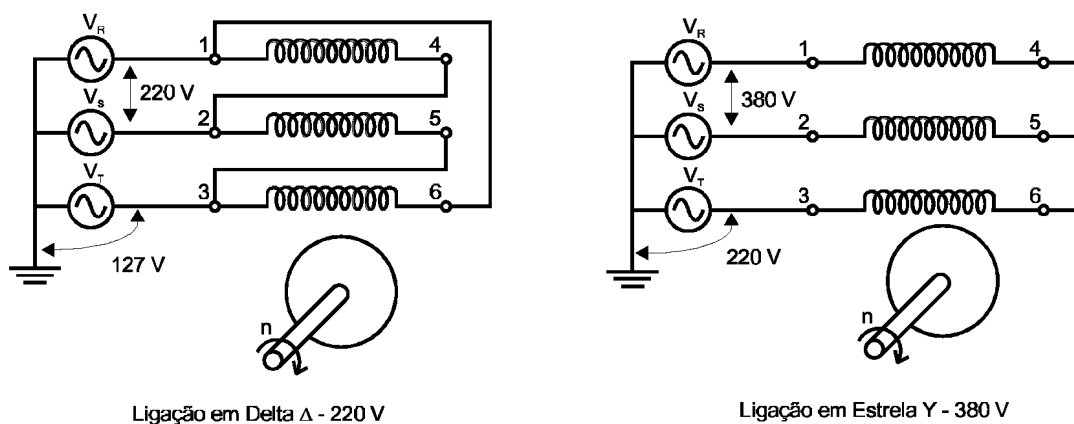


Figura 16 - Esquemas de Ligação do Motor de Indução Trifásico.

Para a inversão no sentido de rotação nos motores de indução trifásicos basta inverter duas das conexões do motor com as fontes de alimentação.

A potência elétrica P_E absorvida da rede para o funcionamento do motor é maior que a potência mecânica P_M fornecida no eixo especificado pelo fabricante, pois existe um determinado rendimento η do motor a ser considerado. Este rendimento pode ser calculado por:

$$\eta = \frac{P_M}{P_E} = \frac{P_M}{\sqrt{3} \cdot V_L \cdot i_L \cdot F_p} \quad (13)$$

A potência mecânica no eixo P_M do motor (em W) está relacionada ao momento de torção M ou conjugado (em N.m) e à velocidade do rotor n (em rpm), através da seguinte operação.

$$P_M = \frac{2\pi}{60} \cdot n \cdot M \quad (14)$$

A figura 17 mostra as curvas do torque do motor, torque da carga e da corrente absorvida pelo mesmo, ambas em função da velocidade do rotor.

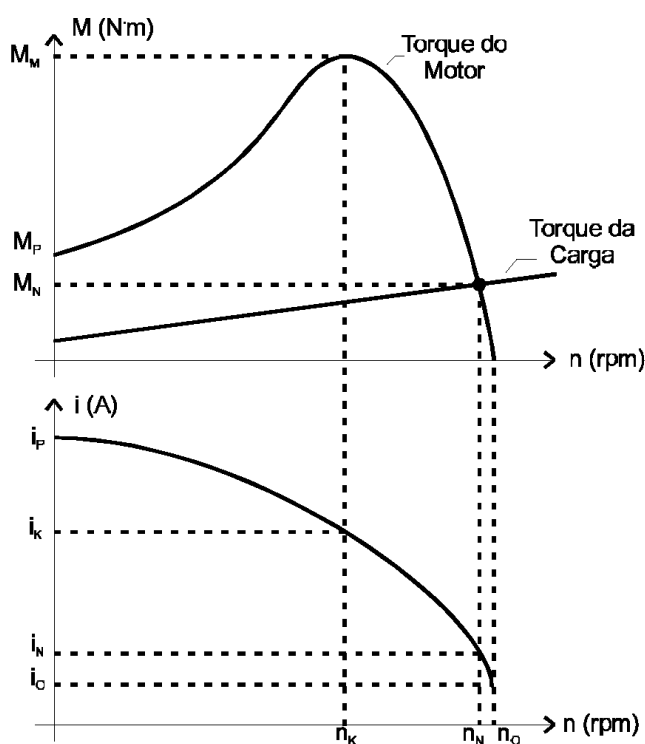


Figura 17 - Torque e Corrente de um Motor de Indução Trifásico.

Sem acionar nenhuma carga no eixo, em vazio, o motor fornece uma pequena potência mecânica, somente para vencer os atritos. O torque do motor neste caso é próximo de zero, a corrente i_o também é mínima e a velocidade do rotor é máxima (n_o), mas inferior a velocidade síncrona n_s .

No motor, ao acionar uma carga nominal em seu eixo, a corrente aumenta para o valor nominal i_N e a velocidade diminui até o valor nominal n_N , para o qual o torque do motor é igual ao torque de carga.

Pode-se aumentar a carga no eixo do motor (torque de carga) além da carga nominal, procedimento que compromete a vida útil da máquina, até o ponto onde o torque do motor é máximo M_M . Nesse caso, a velocidade do motor irá diminuir para n_K e a corrente irá aumentar para i_K .

Importante se faz observar que na partida, velocidade igual a zero, o motor de indução absorve uma corrente muito elevada (i_p) da ordem de até dez vezes a corrente i_N . Seu torque de partida (M_p) é baixo, dificultando com isso o acionamento de cargas que necessitam de um alto torque para partirem, como por exemplo: esteiras transportadoras carregadas.

2.4 Motores Elétricos Especiais

Os motores especiais são máquinas construídas para serem aplicadas no controle preciso de posição e velocidades de processos. São motores mais rápidos que os convencionais e seus enrolamentos são dimensionados para suportarem correntes momentâneas elevadas. Já o rotor de uma máquina especial é projetado com uma pequena inércia, isto é, com diâmetro reduzido e grande comprimento.

2.4.1 Servo-motores

Em geral, o servo-motor é uma máquina síncrona composta por uma parte fixa (o estator) e outra móvel (o rotor). O estator é bobinado como no motor elétrico convencional. Porém, apesar de utilizar alimentação trifásica, não pode ser ligado diretamente à rede, pois utiliza uma bobinagem especialmente confeccionada para proporcionar altos torques ao sistema. O rotor é composto por ímãs permanentes dispostos linearmente e um gerador de sinais (resolver) instalado para fornecer sinais de velocidade e posição.

De um servo-motor são exigidos: dinâmica, controle de rotação, torque constante e precisão de posicionamento. As características mais desejadas nos servo-motores são o torque constante em larga faixa de rotação (até 4.500 rpm), uma larga faixa de controle da rotação e variação (até 1:3000) e alta capacidade de sobrecarga (3 x Torque nominal). Estas características são facilmente obtidas através do modo de controle CFC (Current Flux Control), especialmente desenvolvido para a otimização de servo-motores nos servo-conversores da linha MOVIDRIVE, MOVIDRIVE compact e MOVIDYN.

Os servo-motores são classificados em Servo-motores CC e Servo-motores CA:

- Nos Servo-motores CC, o estator é formado por ímãs permanentes e pelas escovas e o rotor é constituído pelas bobinas da armadura e pelo comutador. O controle da velocidade ou posição se dá através da regulação da corrente das bobinas da armadura.
- Nos Servo-motores CA: O estator é formado pelas bobinas de campo, que são alimentadas por uma fonte trifásica. O rotor é constituído por ímãs permanentes. O controle da velocidade ou posição se dá através da regulação da frequência das correntes nas bobinas de campo.

O motor exemplificado na figura 19 é de 30° por passo. O eixo desse motor possui quatro dentes e os enrolamentos ficam em volta, formando seis pólos enrolados em volta de dois pólos opostos. Com o enrolamento número 1 energizado, o dente do eixo marcado com X é atraído para o pólo desse enrolamento. Se a corrente através do enrolamento um for cortada e o enrolamento dois for ligado, o motor irá se mover 30° (sentido horário) até que o pólo marcado com Y se alinhe com o pólo dois.

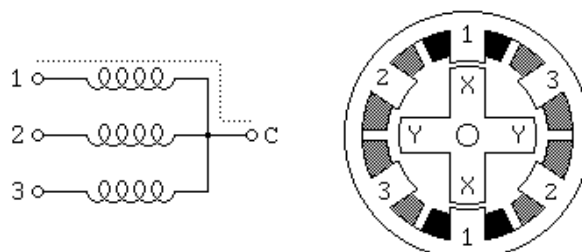


Figura 19 - Motor de 30° por passo.

Para girar esse motor continuamente, é aplicada energia nos três enrolamentos em seqüência. Usando lógica positiva, onde 1 significa corrente passando através do enrolamento do motor, a seqüência a seguir irá girar o motor ilustrado na figura 19 no sentido horário, 24 passos ou 2 revoluções.

Enrolamento	1	1001001001001001001001
Enrolamento	2	0100100100100100100100100
Enrolamento	3	0010010010010010010010010
tempo		--->

Há ainda motores de passo de relutância variáveis com quatro e cinco enrolamentos, possuindo cinco ou seis fios. O princípio de controle desses motores é o mesmo do de três enrolamentos, mas é importante trabalhar com a ordem correta de energização dos enrolamentos, para que o motor gire satisfatoriamente.

Motores de Passo Unipolares

Motores de passo, tanto magnético permanente quanto híbridos, com 5 ou 6 fios, são geralmente esquematizados como mostra a figura 20, com um fio central em cada um dos enrolamentos. Na prática, usualmente o fio central é ligado ao pólo positivo da bateria e os dois finais de cada enrolamento são levados ao pólo negativo, de forma alternada, para reverter a direção do campo magnético proveniente dos enrolamentos.

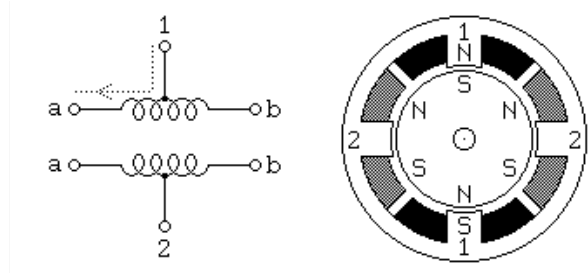


Figura 20 – Exemplo de Motor de Passo Unipolar.

A seção do motor mostrada na figura 20 é de 30° por passo, magnético permanente ou híbrido. A diferença entre esses dois tipos de motores é irrelevante neste nível de complexidade. O enrolamento número 1 do motor é distribuído entre a parte de cima e a de baixo do pólo do estator, enquanto o enrolamento 2 é distribuído entre a esquerda e a direita dos pólos do motor. O eixo é um magnético permanente com seis pólos, três pólos sul e três pólos norte, colocados em torno da circunferência.

Para uma faixa angular alta, o eixo provavelmente terá que ter mais pólos. O motor de 30° por passo na figura é um dos tipos mais comuns de motores de magnético permanente, entretanto, motores com 15 e 7,5° por passo são facilmente encontrados. Motores de passo de magnético permanente com alta precisão, como 1,8° por passo, também são fabricados. Motores híbridos são construídos em série de 3,6 e 1,8° por passo, com capacidade de até 0,72° por passo. Como mostrado na figura, a corrente circulando do fio central do enrolamento 1 até o terminal faz com que a parte superior do pólo do estator seja pólo Norte; consequentemente a parte inferior torna-se pólo Sul. Isso atrai o eixo para a posição mostrada na figura. Se a energia do enrolamento 1 for desligada e o enrolamento 2 for energizado, o eixo irá girar 30°, ou um passo.

Para girar o motor continuamente, simplesmente se aplica corrente nos dois enrolamentos em seqüência. Assumindo 1 como lógico positivo, isto é energizando o enrolamento do motor, as seguintes seqüências de controle irão girar o motor da figura 20 no sentido horário, 24 passos ou 4 revoluções.

Enrolamento 1a 1000100010001000100010001

Enrolamento 1b 00100010001000100010001000100

Enrolamento 2a 01000100010001000100010001000

Enrolamento 2b 00010001000100010001000100010

Tempo --->

Enrolamento 1a 11001100110011001100110011001

Enrolamento 1b 00110011001100110011001100110

Enrolamento 2a 01100110011001100110011001100

Enrolamento 2b 10011001100110011001100110011

Tempo --->

Terminal 1a +---+---+---+--- +---+---+---+---
Terminal 1b ---+---+---+---+ ---+---+---+---+
Terminal 2a -+---+---+---+--- -+---+---+---+---
Terminal 2b ---+---+---+---+--- +---+---+---+---
tempo --->

É importante notar que essas seqüências são idênticas as do motor unipolar, mas com uma forma representativa diferente.

Para distinguir um motor bipolar de um unipolar de quatro fios, mede-se a resistência entre os terminais. É importante observar que alguns motores do tipo magnético permanente possuem quatro enrolamentos independentes, organizados em duplas de pares. Em cada uma, se os enrolamentos são conectados em série, o resultado pode ser um motor de passo bipolar de alta voltagem. Se eles estiverem conectados em paralelo, o resultado pode ser um motor de passo bipolar de baixa voltagem. Se eles forem conectados em série com um fio central, o resultado pode ser usado como um motor de passo unipolar de baixa voltagem.

Motores Multifases

Um tipo menos comum de motores de passo magnético permanente possui seus enrolamentos ligados de forma cíclica, com um pequeno enrolamento ligando o centro de cada par de enrolamentos, formando um círculo. O modelo mais comum nessa categoria usa cabeamento de 3-fases e 5-fases. O controle eletrônico requer metade de um circuito H-bridge para cada terminal do motor. Esses motores podem gerar mais torque do que um outro motor do mesmo tamanho, porque todos ou todos exceto um dos enrolamentos são energizados a cada turno de passos. Alguns motores de 5-fases possuem resoluções altas, da ordem de 0.72° por passo (500 passos por revolução).

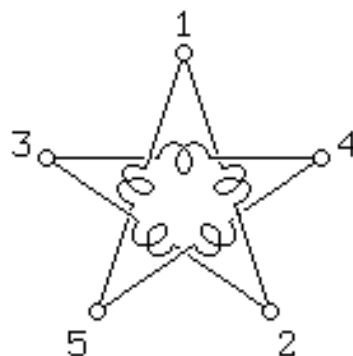


Figura 22 – Esquema para o Motor Multifase.

Com um motor de 5-fases, existem 10 passos básicos que se repetem em cada ciclo, como é mostrado a seguir:

Terminal 1 +++-----+++++-----++
Terminal 2 ---+++++-----+++++---
Terminal 3 +------+++++-----+++++
Terminal 4 ++++++-----+++++-----
Terminal 5 -----+++++-----+++++-
tempo --->

Neste caso, como no caso dos motores bipolares, cada terminal é conectado hora no positivo, hora no negativo da bateria.

É importante observar que, a cada passo, somente um terminal muda de polaridade. Essa mudança remove a força gerada em um enrolamento anexado no terminal (porque ambos os terminais do enrolamento em questão estão na mesma polaridade) e aplica força em um enrolamento que não sofria a força anteriormente. Em um motor com a geometria mostrada na figura 22, essa seqüência de controle irá girar o motor por duas revoluções. Para distinguir um motor de 5-fases de outro motor com cinco fios se observa que se a resistência entre dois terminais consecutivos do motor de 5-fases é R, a resistência entre terminais não-consecutivos será 1,5 R.

Alguns motores de 5-fases possuem cinco enrolamentos separados, num total de dez comandos. Esses podem ser conectados na configuração estrela mostrada na figura 21, usando cinco metades de um H-bridge, ou cada enrolamento pode ser controlado pelo seu próprio H-bridge.

Controle lógico de um Motor de Passo

Os motores de passo se comportam de forma diferente de outros motores DC. Primeiramente, eles não podem girar livremente quando alimentados da forma clássica. Para isso, é necessário fazer como os seus próprios nomes sugerem: usar passos.

Um circuito responsável por converter sinais de passo e de direção em comandos para os enrolamentos do motor é o controle lógico. Ele recebe os sinais de passos e a direção, e gera os sinais para que o motor gire.

Após esta fase de controle lógico, é preciso que o Controle Eletrônico que se encarregue de fornecer a corrente elétrica requerida pelos enrolamentos do motor. Um exemplo básico do bloco lógico + eletrônico pode ser visto na figura 23:

Pode-se gerar os sinais lógicos de duas maneiras distintas: Por *Hardware* e por *Software*. Se forem usados microcontroladores, a geração será feita tanto pelo *Software* (o programa) como pelo *Hardware*(o próprio microcontrolador).

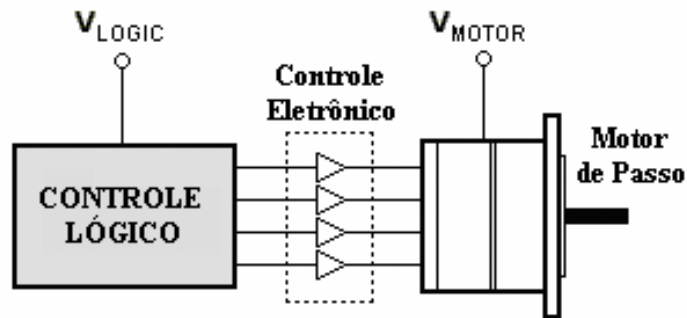


Figura 23 - Exemplo básico do bloco lógico + eletrônico, onde V_{LOGIC} é a fonte de alimentação do controle lógico e V_{MOTOR} é a tensão requerida pelo motor.

Controle por Hardware

O controle lógico por *Hardware* é simples e eficiente quando se trabalha com Passo-Completo. Para gerar o Meio-Passo é aconselhável utilizar o controle por *Software*. O controle lógico dos motores de passo serve para qualquer tipo de motor: Unipolar, Bipolar, Magnético Permanente, etc. O que se diferencia são os tipos de passo. O tipo de passo mais simples é descrito na figura 24. Para gerá-lo pode ser usado um circuito integrado contador como o CD4017, seguindo o circuito descrito na figura 25, ligando os seus terminais 1A, 1B, 2A, 2B ao controle eletrônico.

sentido horário de rotação ↓	Index	1a	1b	2a	2b
	1	1	0	0	0
	2	0	1	0	0
	3	0	0	1	0
	4	0	0	0	1
	5	1	0	0	0
	6	0	1	0	0
	7	0	0	1	0
	8	0	0	0	1

Figura 24 – Exemplo de passo simples.

Uma forma de passo alternativo, que consome mais energia, mas fornece muito mais torque, é descrita na figura 26.

Este tipo de passo trabalha alimentando duas bobinas de cada vez. Para gerar esses sinais podem ser usados vários circuitos, os mais comuns usam dois flip-flops, como o descrito na figura 27.

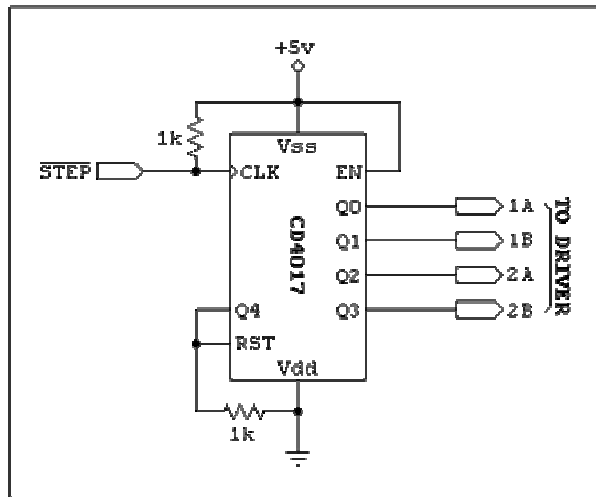


Figura 25 - Circuito eletrônico para controle lógico de motores de passo.

sentido horário de rotação

Index	1a	1b	2a	2b
1	1	0	0	1
2	1	1	0	0
3	0	1	1	0
4	0	0	1	1
5	1	0	0	1
6	1	1	0	0
7	0	1	1	0
8	0	0	1	1

↓

Seqüência alternada de passos

Figura 26 – Exemplo de passo alternativo.

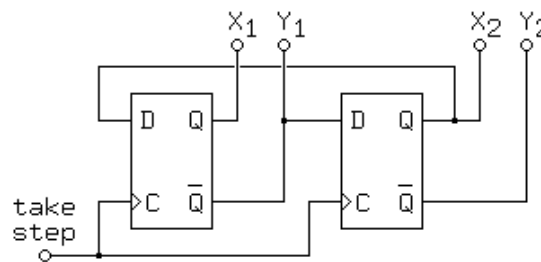


Figura 27 – Circuito eletrônico para controle lógico de motores de passo.

O tipo de circuito mostrado na figura 27 não oferece o controle de direção. Para resolver este problema são colocadas portas lógicas que controlam a direção, como descrito no circuito da figura 28. Com isso, fica fácil definir a direção e os passos do motor.

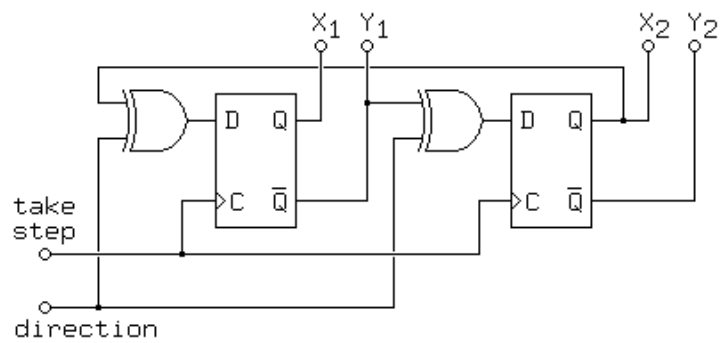


Figura 28 - Circuito eletrônico para controle lógico de direção de motor de passo.

2.5 Questionário sobre atuadores elétricos

1. Descreva quais as principais diferenças apresentadas entre os atuadores elétricos, hidráulicos e pneumáticos.
2. Descreva o funcionamento dos motores de corrente contínua.
3. Quais os tipos de motores de corrente contínua mais utilizados? Especifique as principais características e utilização de cada um.
4. Quanto aos motores de corrente alternada, qual a diferença entre motores síncronos e motores assíncronos?
5. Explique o princípio de funcionamento dos motores de indução monofásicos.
6. Como funciona o sistema de ligação estrela-triângulo na alimentação de motores de Indução Trifásicos?
7. O que são servo-motores? Quais são as principais aplicações destes dispositivos eletromecânicos?
8. Quais são os principais tipos de motores de passo que existem? Descreva as principais características de construção e funcionamento.

3. ATUADORES PNEUMÁTICOS

Nos atuadores pneumáticos a energia pneumática é transformada em energia mecânica e, em seguida, em movimentos e forças através da utilização de elementos pneumáticos chamados cilindros. Esses movimentos podem ser lineares ou rotativos.

3.1 Cilindros de movimento linear

Os movimentos lineares são produzidos pelos cilindros de simples e dupla ação.

3.1.1 Cilindros de simples ação

Os cilindros de simples ação realizam trabalho recebendo ar comprimido em apenas um de seus lados. Portanto, são adequados para a realização de trabalho em um só sentido. O movimento de avanço é, em geral, o mais utilizado. O retorno a sua posição normal é realizado por molas ou força externa.

Cilindros de simples ação de êmbolo

Nesse tipo de cilindro, a força da mola é calculada para que se possa repor o êmbolo à posição inicial. Em cilindros de simples ação com mola, o curso do êmbolo é limitado pelo comprimento desta. Por esta razão fabricam-se cilindros de simples ação com comprimento de curso até 100 mm aproximadamente. A figura 29 mostra um esquema desse tipo de cilindro, com a representação usual, logo abaixo. Neste caso, o ar sob pressão é admitido na câmara, deslocando a haste para a direita. Com o alívio da pressão, a mola restaura a posição inicial da haste. A inversão do sentido do movimento de atuação também é possível, dependendo das características do projeto.

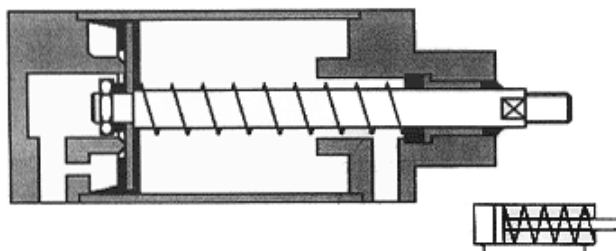
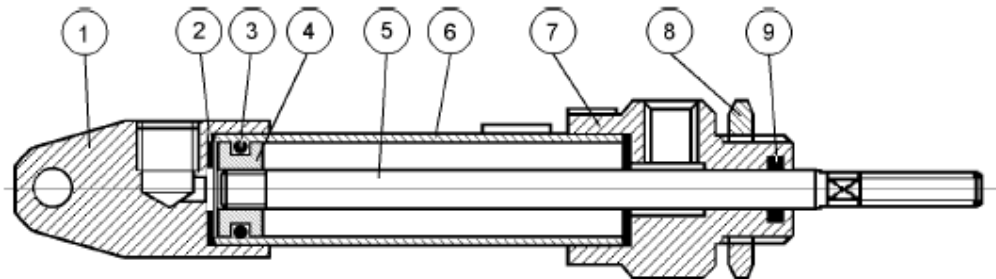


Figura 29 - Cilindro de simples ação, de êmbolo.

Cilindros como esses são utilizados principalmente para fixar, expulsar, prensar, elevar, alimentar, etc. A figura 30 mostra alguns detalhes mecânicos de um cilindro de ação simples. Exemplos de materiais utilizados são listados, embora haja um sem número de combinações possíveis para a construção desses elementos.



- | | |
|--|---------------------------------|
| 01 - cabeçote traseiro: latão | 06 - tubo: latão |
| 02 - anel de encosto: buna - N | 07 - cabeçote dianteiro: latão |
| 03 - guarnição O'ring: buna - N | 08 - porca: latão |
| 04 - êmbolo: latão | 09 - guarnição O'ring: buna - N |
| 05 - haste: aço SAE 1045 cromado ou aço inox | |

Figura 30 - Cilindro de ação simples. Detalhes mecânicos.

3.1.2 Cilindros de dupla ação

Os cilindros de dupla ação realizam trabalho recebendo ar comprimido em ambos os lados. Desta forma realizam trabalho nos dois sentidos, tanto no avanço quanto no retorno.

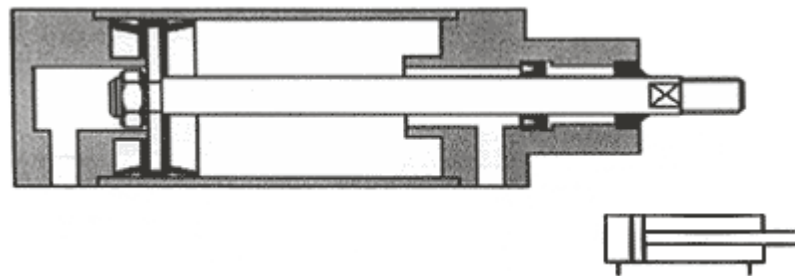


Figura 31 - Cilindro de dupla ação.

Esses cilindros são utilizados onde o trabalho de “empurrar” é tão importante e necessário quanto o de puxar. O curso do êmbolo é limitado e é muito importante levar em consideração a deformação por flexão e flambagem na sua utilização em processos que exijam precisão.

3.1.3 Cilindros com amortecimento

Quando volumes grandes e pesados são movimentados por um cilindro, este deve possuir um sistema de amortecimento para evitar impactos repentinos, gerando danos. Antes de alcançar a posição final, um mecanismo de amortecimento interrompe o escape livre do ar, deixando somente uma pequena passagem, geralmente regulável.

Por meio da restrição do escape de ar cria-se uma contrapressão que, para ser vencida, absorve parte da energia e resulta em perda de velocidade do êmbolo até chegarem aos sensores de fim de curso. Invertendo o movimento do êmbolo, o ar entra sem impedimentos pela válvula de retenção e o êmbolo pode, com força e velocidade total, retornar ou avançar, dependendo da situação.

Os cilindros podem ter amortecimentos em ambos os lados dos movimentos, isto é, podem controlar o movimento nos finais de curso de avanço e retorno. A figura 32 mostra um esquema da exaustão do cilindro com a válvula que permite o amortecimento.

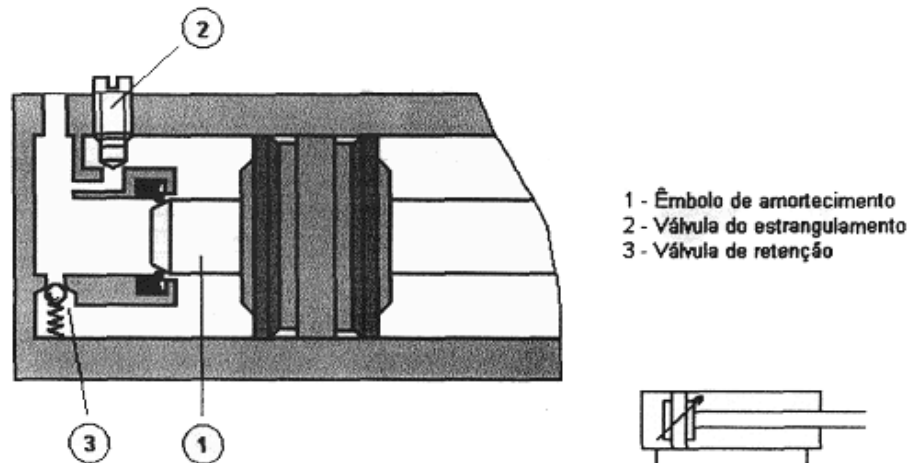


Figura 32 - Cilindro com amortecimento.

3.1.4 Cilindros de membrana

Este tipo de cilindro é acionado por intermédio de uma membrana que pode ser de borracha, de material sintético ou metálico, assumindo a função do êmbolo. A haste do êmbolo é fixada no centro da membrana e não há vedação deslizante.

Cilindro de membrana convencional

Nos cilindros convencionais, quando submetidos à pressão, a membrana projeta-se na direção de atuação do cilindro, movimentando a haste para fora. A membrana faz a mesma função de êmbolo. Os cursos dos cilindros estão entre 50 e 80 mm e têm como vantagem o fato de oferecerem menor atrito. O retorno pode ser auxiliado por mola, embora a membrana faça essa função normalmente. A figura 33 apresenta esse tipo de cilindro.

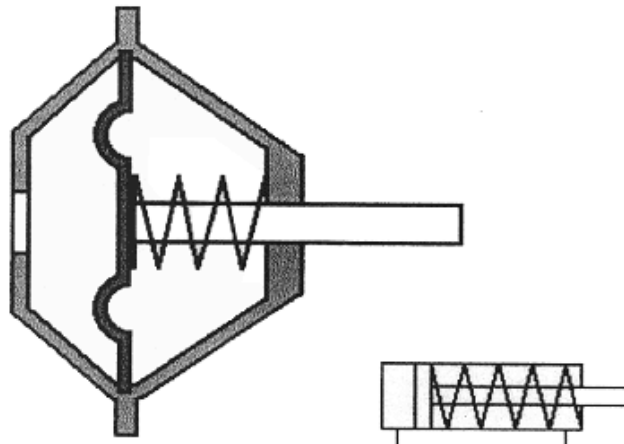


Figura 33 - Cilindro de membrana.

Cilindro de membrana plana

Nesse caso, em ação contrária existe somente a força elástica da membrana. A vantagem da membrana está na redução do atrito. Porém a limitação da força nestes casos se torna uma desvantagem. Estes elementos são aplicados na fabricação de ferramentas e dispositivos, rebitar e fixar peças em lugares estreitos, etc. Esse tipo de cilindro é mostrado na figura 34.

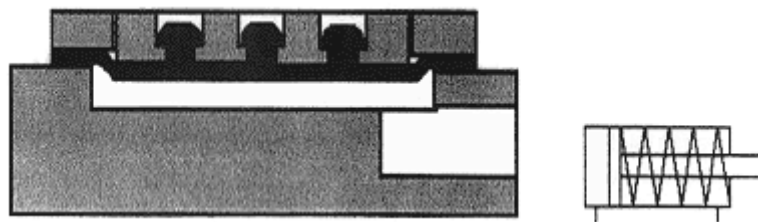


Figura 34 - Cilindro de membrana plana.

3.1.5 Cilindro telescópico

Um cilindro telescópico é composto de vários cilindros montados em série, um dentro do outro. É utilizado para lugares de pequenas dimensões de comprimento, mas produz um curso longo. Normalmente é utilizado na hidráulica, não sendo muito utilizado na pneumática devido a grande

dificuldade de vedação. Nesse caso, a força produzida é proporcional à área do menor dos cilindros acionado, dado que os demais causam apenas o efeito telescópico, aumentando o curso.

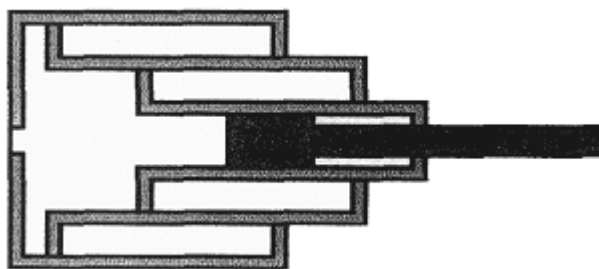


Figura 35 - Cilindro telescópico.

3.1.6 Cilindros com dupla haste ou haste passante

O cilindro de dupla haste ou haste passante pode realizar trabalho em ambos os sentidos ao mesmo tempo. Devido às suas características, pode ser utilizado em aplicações onde o uso dos cilindros de ação simples e dupla não é adequado. A figura 36 mostra esse tipo de cilindro.

Os cilindros de dupla haste possuem diversas vantagens, dentre as quais:

- A haste é melhor guiada devido ao fato de possuir dois mancais. Isto também possibilita suportar uma pequena carga lateral;
- Os elementos sinalizadores podem ser montados na parte livre da haste do êmbolo;
- As forças de avanço e retorno são iguais devido à mesma área de aplicação de pressões em ambas as faces do êmbolo.

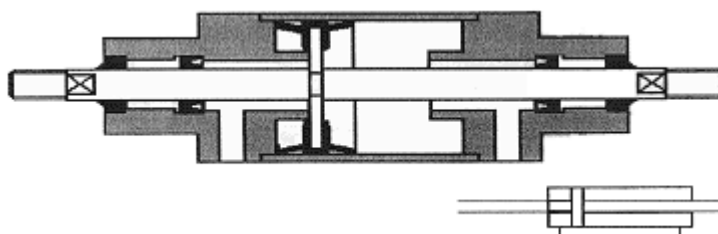


Figura 36 - Cilindro de dupla haste (ou haste passante).

3.1.7 Cilindros em Tandem

Neste tipo são usados dois cilindros de ação dupla, os quais formam uma só unidade. Desta forma, com duas pressões em suas respectivas câmaras agindo nos êmbolos, a força é a resultante da soma das forças dos cilindros. Este cilindro, mostrado na figura 37, é usado para obter grandes forças em lugares onde não há espaço suficiente para utilização de cilindros com maior diâmetro.

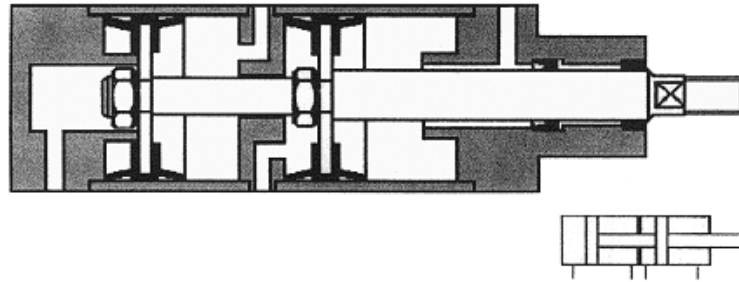


Figura 37 - Cilindro em Tandem.

3.1.8 Cilindro sem haste

De tipo construtivo moderno, esse elemento pneumático linear de dupla ação é constituído de um corpo cilíndrico e de um êmbolo sem haste. O êmbolo do cilindro pode ser movido livremente, de acordo com a atuação pneumática.

O êmbolo é equipado com um conjunto de ímãs permanentes em anel. Dessa forma é produzido um acoplamento magnético entre o carro e o êmbolo. Assim que o êmbolo for movido pelo ar comprimido, o carro acompanha o movimento. O componente da máquina a ser movimentado deve ser montado no carro. Esse tipo de cilindro, mostrado na figura 38, é utilizado especificamente para cursos muito longos, em torno de 10 metros. A força de acoplamento com o carro é limitante da capacidade de acionamento do cilindro.

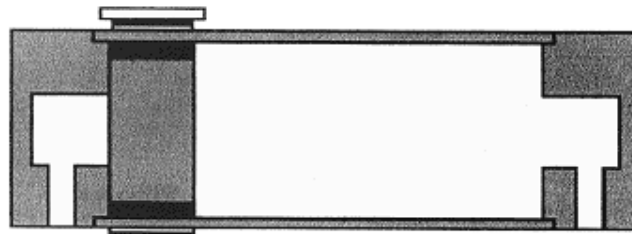


Figura 38 - Cilindro sem haste.

3.1.9 Cilindros de múltiplas posições

Este tipo de cilindro é formado por dois cilindros de dupla ação, de diferentes comprimentos de curso, unidos por suas câmaras traseiras. Com estes cilindros, é possível obter cursos maiores em um pequeno espaço físico. Neste caso, pode-se obter até quatro posições definidas, conforme mostrado na figura 39 para um caso específico.

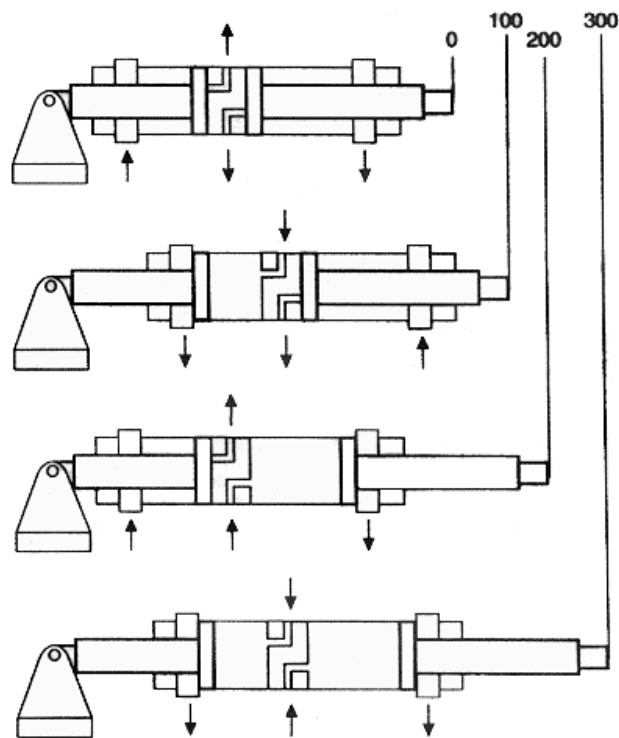


Figura 39 - Cilindros de múltiplas posições.

3.2 Cilindros de movimento giratório

Os cilindros rotativos transformam movimento linear de um cilindro comum em movimento rotativo de rotação limitada.

3.2.1 Cilindros Rotativos com cremalheira

Neste tipo de cilindro, a haste do êmbolo tem um perfil dentado (cremalheira), mostrada na figura 40. Esta cremalheira aciona uma engrenagem, transformando o movimento linear num movimento rotativo à esquerda ou direita, sempre de acordo com o sentido do curso. Os campos de rotação mais usuais são de 45°, 90°, 180°, 290°, até 720°. Um parafuso de regulagem possibilita a determinação do campo de rotação parcial, dentro do total.

O torque depende da pressão de trabalho, do diâmetro do êmbolo e da relação de transmissão. Esse cilindro é utilizado para virar peças, curvar tubos, regular instalações de ar condicionado, no movimento de válvulas de fechamento e válvulas borboleta, etc.

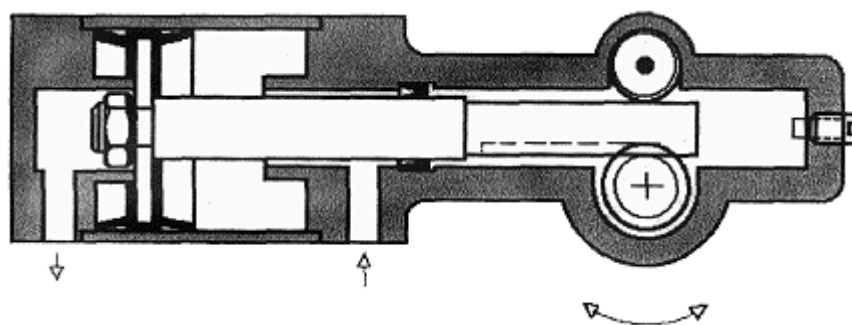


Figura 40 - Cilindro Rotativo com cremalheira.

3.2.2 Cilindro Rotativo de Palheta

Como cilindros os rotativos já descritos, nos cilindros de aletas giratória também é possível um movimento angular limitado. O movimento angular raramente vai além de 180° . Esses elementos são adequados para robótica e manuseio de material onde houver falta de espaço, na abertura e fechamento de válvulas de grande porte e na rotação de peças ou dispositivos. A figura 41 mostra um esquema do elemento. Neste, quando o ar é admitido sob pressão em sua câmara, aciona a palheta, que funciona com um êmbolo. O ar sob pressão atua sobre a palheta e esta gira o eixo ao qual está presa, realizando o movimento.

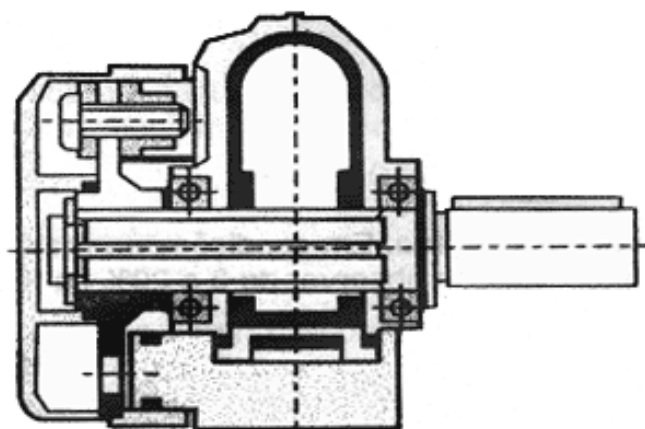


Figura 41 - Cilindro rotativo palheta.

3.2.3 Cilindros de cabos

Trata-se de um cilindro de ação dupla em que cada lado do êmbolo está fixado um cabo, guiado por rolos (figura 42). Este cilindro trabalha tracionado. É utilizado em abertura e fechamento de portas, onde são necessários grandes cursos com pequenas dimensões de construção.

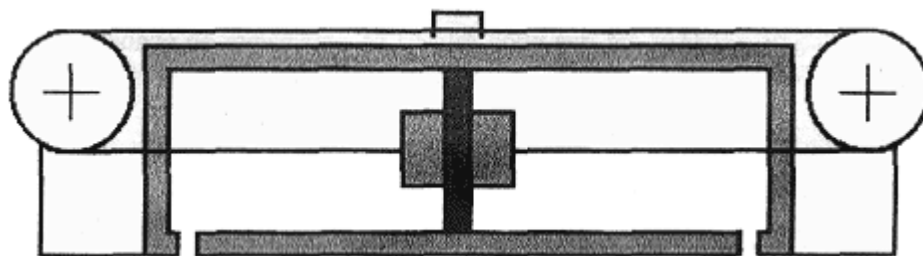


Figura 42 - Cilindro de cabos.

3.3 Tipos de fixação dos cilindros

A posição que o cilindro deve ser instalado numa máquina ou dispositivo determina o tipo de fixação que será usado. A figura 43 mostra os tipos mais comuns. Conforme mostra a figura, essas fixações podem ser em superfícies horizontais ou verticais, com um ou mais apoios, móveis ou não, além de outras.

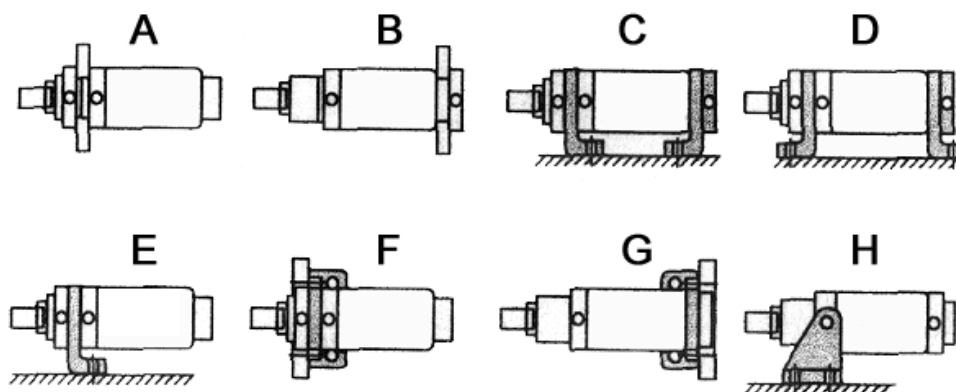


Figura 43 - Tipos de fixação.

3.4 Cálculo da força do cilindro

A força realizada pelo cilindro depende da pressão do ar, do diâmetro do êmbolo e da resistência de atrito dos elementos de vedação. A fórmula básica para cálculo da força é:

$$F_t = A \cdot p \quad (15)$$

onde:

F_t = Força teórica no êmbolo	(N)
A = Superfície útil do êmbolo	(cm ²)
p = pressão de trabalho	(kPa, 105 N/m ² , bar)

A resistência de atrito deve ser considerada. Em condições normais de trabalho (faixa de pressão de 400 a 800 kPa ou 4 a 8 bar), esta resistência pode absorver de 3 a 20% da força calculada.

- *Cilindro de simples ação:*

$$F_n = A \cdot p - (F_r - F_f) \quad (16)$$

Onde:

$$F_n = \text{Força efetiva do êmbolo} \quad (\text{N})$$

$$A = \text{Superfície útil do êmbolo} \quad (\text{cm}^2)$$

$$F_r = \text{resistência de atrito} \quad (\text{N}) \text{ (3-20\% de } F_f)$$

$$F_f = \text{Força da mola} \quad (\text{N})$$

- *Cilindro de dupla ação:*

Avanço:

$$F_n = A \cdot p - F_r \quad (17)$$

Retorno:

$$F_n = A_1 \cdot p - F_r \quad (18)$$

Cálculo da área:

$$A = (D^2 \cdot 3,1416 / 4) = r^2 \cdot 3,1416 \quad (19)$$

onde:

$$A_1 = \text{Superfície útil do êmbolo} = (D^2 - d^2) \cdot 3,1416 / 4 \quad (\text{cm}^2)$$

$$D = \text{Diâmetro do cilindro} \quad (\text{cm}^2)$$

$$d = \text{Diâmetro da haste} \quad (\text{cm}^2)$$

3.5 Flambagem da haste

Algumas aplicações requerem cilindros de cursos longos. Se existir uma carga de compressão axial aplicada na haste, é preciso assegurar que os parâmetros de comprimento, diâmetro e carga estejam dentro dos limites de segurança para evitar a flambagem da haste.

O curso em cilindros pneumáticos normais não deve ser superior a 2000 mm. Na pneumática, os cilindros de diâmetros elevados e cursos longos não são aconselháveis. Em cursos longos a carga mecânica sobre a haste do êmbolo e nos mancais é grande, podendo causar flambagem. Para evitá-la é necessário determinar o diâmetro da haste corretamente, utilizando os conceitos de Resistência dos Materiais.

3.6 Controle da velocidade

A velocidade depende da carga, da pressão do ar, do comprimento da tubulação entre a válvula e o cilindro, bem como da vazão da válvula de comando e a carga contra a qual o cilindro está trabalhando. A velocidade é também influenciada pelo amortecimento nos fins de curso.

Quando a haste de êmbolo está na faixa de amortecimento, a alimentação de ar passa através de um regulador de fluxo unidirecional e provoca diminuição momentânea da velocidade.

A velocidade do êmbolo em cilindros normais varia entre 0,1 a 1,5 m/s. Com cilindros especiais (cilindros de impacto) podem ser alcançadas velocidades de até 10 m/s,.

A velocidade normal do cilindro pode ser reduzida ou aumentada. Uma pequena válvula pode reduzir a velocidade, assim como uma válvula maior pode aumentá-la. Um limitador pode ser usado na passagem de ar nos orifícios de entrada dos cilindros. A velocidade também pode ser controlada regulando o ar em exaustão.

Utilizando uma válvula que permite a saída rápida do ar da câmara do cilindro, a velocidade de movimento pode ser aumentada em até 50%, apenas com a eliminação da contrapressão.

3.7 Motores pneumáticos

Através de motores pneumáticos podem ser executados movimentos rotativos de forma ilimitada. A grande característica destes motores é a alta rotação que podem atingir, alcançando até 500.000 rpm em equipamentos de uso odontológico. Os motores pneumáticos não produzem faíscas e não propagam fogo. Em caso de sobrecarga, simplesmente param sem maiores danos.

3.7.1 Motor de palhetas

São geralmente simples e pequenos, conseqüentemente leves. A princípio, tem seu funcionamento inverso aos compressores de palhetas. Por meio de pequena quantidade de ar, as palhetas são movimentadas girando um rotor. Estes motores têm geralmente entre três e dez palhetas (figura 44).

A rotação do rotor varia de 3000 a 8500 rpm e a faixa de potência em pressão normal, é de 0,1 a 17 kW (0,1 a 24 CV).

Os motores pneumáticos de palhetas eliminam o risco de faíscas, muito importante em ambientes que estão sujeitos à exposição a produtos e/ou gases inflamáveis. São controlados por engrenagens ou por orifício regulador de vazão ou por válvula reguladora de pressão e vazão. São empregados particularmente em guinchos pneumáticos, misturadores industriais, ventiladores, utilizados em usinas, minerações, além de outros equipamentos.

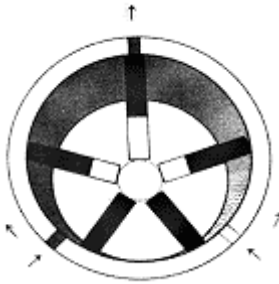


Figura 44 -: Motor de palhetas.

3.7.2 Motores de pistão

Este tipo construtivo está subdividido em motores de pistão radial (figura 45) e axial. Por intermédio de pistões em movimento radial, o êmbolo, através de uma biela, aciona o eixo do motor. Para que seja garantido um movimento sem choques e oscilações são necessários vários pistões. A potência dos motores depende da pressão de entrada, número de pistões, área dos pistões e do curso destes. Eles podem executar movimentos em ambos os sentidos, com rotação horária e anti-horária.

A rotação máxima está fixada em 5000 rpm e a faixa de potência em pressão normal, varia entre 1,5 a 19 kW (2 a 25 CV).

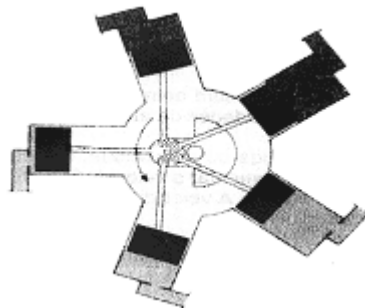


Figura 45 - Motor a pistão, radial.

Uma importante característica dos motores pneumáticos de pistão é o fato de serem ideais em aplicações envolvendo *fator de partida* (torque) elevado. Outra característica é a necessidade de que os motores radiais de pistão trabalhem com seu eixo na posição horizontal. É importante também a instalação de um lubrificador na linha de ar, o mais próximo possível do motor.

O funcionamento do motor axial (figura 46) é similar ao do motor radial. Um disco oscilante transforma a força de cinco cilindros, axialmente posicionados, em movimento giratório. Dois pistões são alimentados simultaneamente com ar a cada instante. Com isso se obtém um movimento de inércia equilibrado.

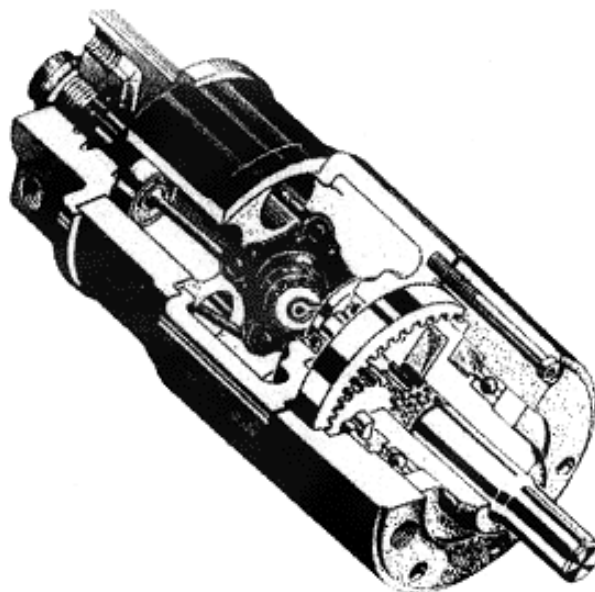


Figura 46 - Motor a pistão, axial.

Em ambos os casos, além de projetos especiais, suas aplicações são as mesmas que as aplicações dos motores de palheta.

3.8 Turbomotores

Turbomotores são usados para realizar trabalhos leves (baixo torque), pois sua velocidade de giro é muito alta. Podem ser utilizados em equipamentos dentários em até 500.000 rpm. O princípio de funcionamento é inverso ao dos turbo-compressores.

3.8.1 Características dos Turbomotores

- ▶ Regulagem sem escala de rotação e do momento de rotação;
- ▶ Possibilidade de grande variação da rotação;
- ▶ Construção leve e pequena;
- ▶ Seguro contra sobrecarga e contra explosão;
- ▶ Insensível à poeira, água, calor e frio;
- ▶ Conservação e manutenção simples;
- ▶ Sentido de rotação fácil de inverter.

3.9 Elementos Especiais

Em muitos casos, os cilindros pneumáticos não permitem velocidades constantes e uniformes de trabalho. Para a realização de trabalhos que requeiram tais características, foram desenvolvidos dispositivos especiais, com comportamentos especiais. Esses dispositivos são usados para avanço ou retorno de ferramentas com movimentos lentos e precisos. São utilizados em furadeiras, tornos, fresadoras, etc.

3.9.1 Sistemas hidropneumáticos

Acionamentos pneumáticos de ferramentas são usados quando há necessidade de movimentos rápidos, porém a força fica limitada em aproximadamente 30.000 N. Além deste limite os cilindros pneumáticos não são economicamente viáveis.

Também há restrição quando há necessidade de movimentos lentos e constantes de avanço ou retorno. A utilização de um acionamento puramente pneumático não é possível. A compressibilidade do ar, vantajosa em muitos casos, aqui é desfavorável.

Como opção aos sistemas puramente pneumáticos, utiliza-se os hidráulicos. Os resultados das unidades hidráulicas de ação, associadas ao comando pneumático, são: elementos pneumáticos de comando simples, velocidades uniformes e grandes forças com cilindros de diâmetro pequeno.

O trabalho é realizado pelos cilindros pneumáticos e o controle das velocidades de trabalho é feito através de cilindros hidráulicos. Estes elementos são utilizados freqüentemente para furar, fresar, tornear e em prensas e dispositivos de fixação.

3.9.2 Conversores de pressão

O conversor de pressão é uma combinação de sistemas que utiliza óleo e ar comprimido. Com a entrada do ar comprimido num reservatório com óleo, este flui para a câmara posterior de cilindro, deslocando-o (figura 47). A velocidade pode ser controlada através de uma válvula reguladora de fluxo. O cilindro terá uma velocidade lenta, controlada e uniforme. O retorno é feito com ar comprimido na outra câmara de cilindro, exaurindo o óleo do lado posterior.

3.9.3 Variador de pressão hidropneumático

O intensificador de pressão (figura 48) consiste em duas câmaras de pressão com áreas diferentes. Na primeira câmara (esquerda) é introduzido o ar comprimido que empurra o êmbolo do cilindro, deslocando o óleo da segunda câmara. O óleo chega a uma válvula reguladora de fluxo e de lá para o elemento de trabalho.

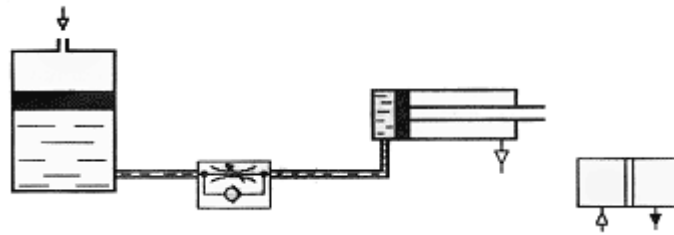


Figura 47 - Conversor de pressão.

A diferença das áreas dos êmbolos produz um aumento da pressão do óleo. As relações de multiplicação inicial da pressão mais comuns são: 4:1, 8:1, 16:1 e 32:1. A pressão recomendada é no máximo de 1000 kPa (10 bar).

Como a pressão que o óleo suporta é relativamente elevada, para alcançar uma força de magnitude elevada pode-se usar um pequeno cilindro de trabalho.

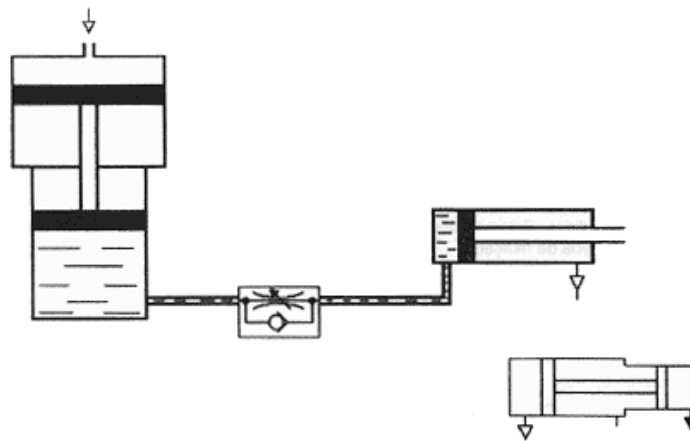


Figura 48 - Intensificador de pressão.

3.9.4 Unidade de avanço hidropneumática

A unidade de avanço hidropneumática consiste de um cilindro pneumático e um cilindro hidráulico a óleo, com circuito fechado, além de uma válvula de regulação de fluxo unidirecional que controla a velocidade na parte hidráulica (figura 49).

Uma haste (trave) une as hastes dos cilindros. No acréscimo de pressão do cilindro pneumático, o êmbolo do cilindro de freio hidráulico e a haste de comando são arrastados através da trave. O comando de inversão se dá diretamente através da haste de comando ou por sinal remoto. Uma variação se dá quando a saída é o movimento giratório, com a haste do cilindro pneumático acionando uma cremalheira (figura 50).

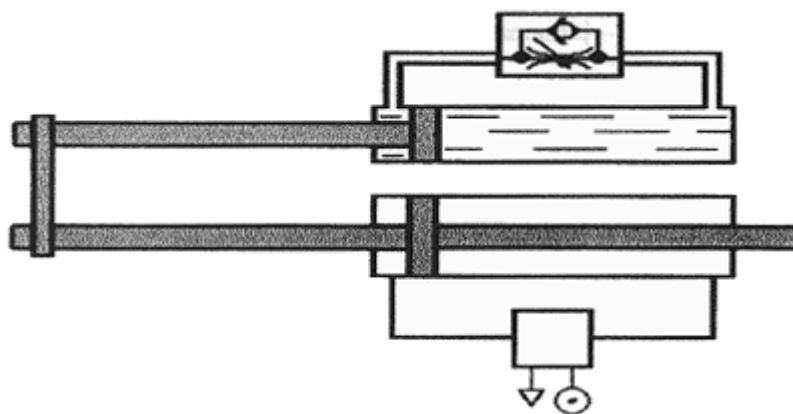


Figura 49 - Unidade de avanço hidropneumática.

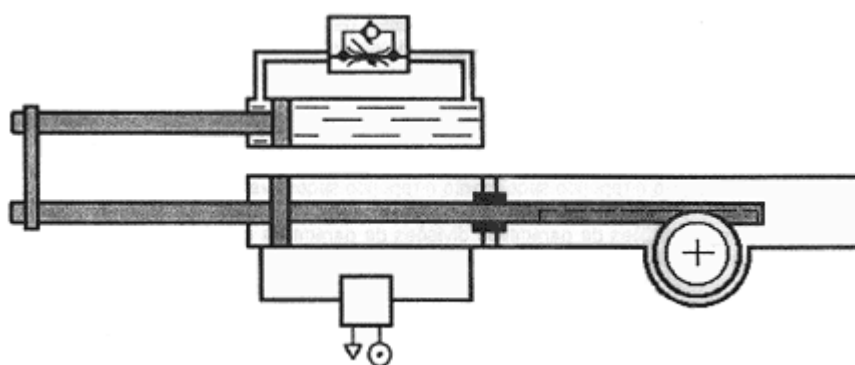


Figura 50 - Unidade de avanço hidropneumática com acionamento giratório.

3.9.5 Alimentador hidropneumático de avanço compassado

A tarefa desta unidade é transportar vários tipos de materiais, de forma compassada e em ciclos contínuos, principalmente chapas e fitas em bobinas, em prensas, serras ou outros tipos de máquinas.

Esta unidade consiste em um corpo base, no qual está alojado um cilindro de dupla ação de dois eixos-guia para a pinça de transporte (figura 51). Esta, por sua vez, é fixada à haste do cilindro, e a uma outra garra, esta de fixação, sobre o corpo base. As garras consistem em dois cilindros de membrana de simples ação e de dois suportes colocados em sentidos opostos aos cilindros. A unidade possui batentes com amortecedores pneumáticos e parafusos micrométricos de regulagem.

O material a ser transportado deve ter no máximo 200 mm de largura e 2 mm de espessura. Em condições ideais de utilização, pode-se obter precisão de transporte da ordem de 0,02 a 0,05 mm.

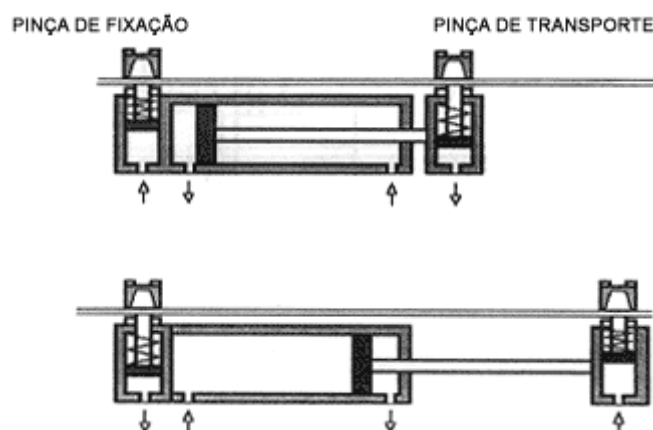


Figura 51 - Alimentador de avanço compassado.

3.10 Mesa giratória

Em muitos processos de trabalho são necessários movimentos de avanço circular. Nestes casos, são usadas mesas giratórias de avanço compassado, mostradas na figura 52. Na mesa giratória existe um cilindro pneumático que, comandado por uma válvula, executa o ciclo dos movimentos.

Para a transformação do movimento retilíneo em movimento circular compassado, é utilizado o movimento do cilindro pneumático ligado a uma mesa com cremalheira, empurrando-a para frente provocando giro da mesa. No retorno do cilindro pneumático, uma trava prende a mesa de forma que não haja giro no sentido contrário. Em seguida o movimento é repetido, sucessivamente.

Com placas e pinos intercambiáveis conseguem-se divisões de parada da mesa em 4, 6, 8, 12 e 24. A precisão na divisão atinge até 30 segundos de arco (0,02 mm em 30 mm de diâmetro).

A mesa giratória é usada em máquinas operatrizes para obtenção de máscaras para furacões, furos periféricos, fresagem de dentes e outras operações, com precisão elevada. É apropriada para furadeiras, rosqueadeiras ou máquinas de ciclo automático. Também podem ser usadas para rosquear, furar, rebitar, soldar a ponto, etc.

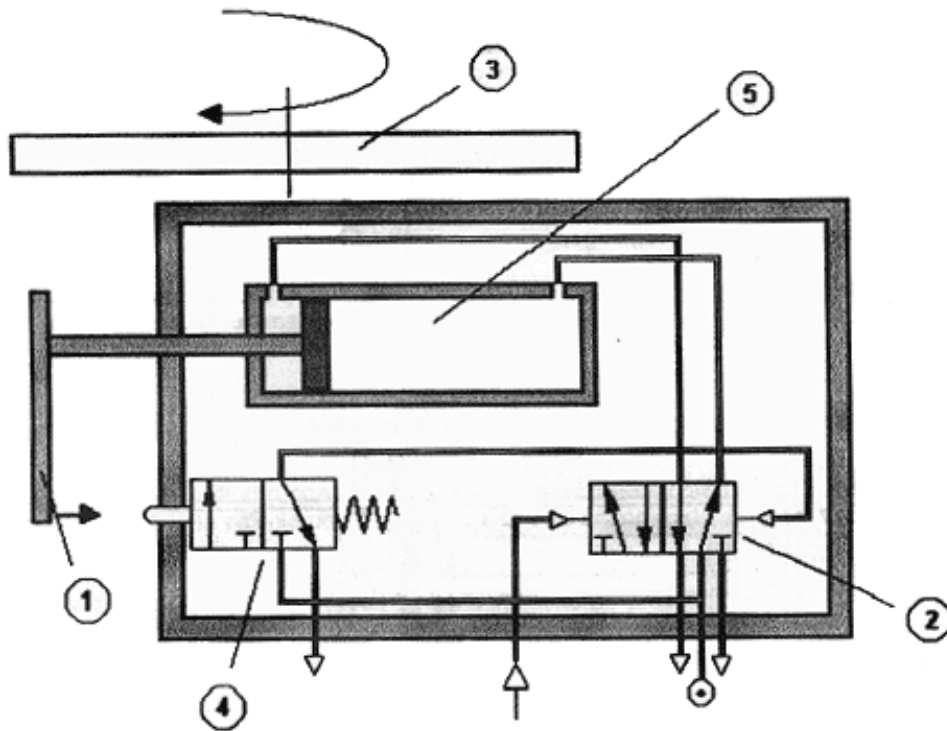


Figura 52 - Esquema para a mesa giratória, onde: (3) representa a mesa giratória; (5) representa o cilindro pneumático, (2) e (4) representam as válvulas direcionais e (1) representa sistema de pilotagem da válvula direcional (4).

3.11 Válvulas Pneumáticas

Em circuitos pneumáticos onde, em sua grande maioria, são utilizados elementos que produzem movimentos, se faz necessária a utilização de elementos de sinal e de comando. Esses elementos influenciam diretamente no processo dos trabalhos.

As válvulas são elementos de comando para partida, parada e regulação. Elas controlam também a pressão e a vazão do ar.

As válvulas são regidas pela norma DIN/ISO 1219, conforme recomendação da CETOP (Comissão Europeia de Transmissões Óleo-hidráulica e Pneumática).

3.11.1 Válvulas direcionais


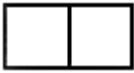


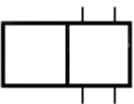
São elementos que influenciam no trajeto do fluxo de ar, isto é, são usadas para dar sentido e bloqueio ao fluxo do ar comprimido.

3.11.2 Simbologia das válvulas

Assim como para todos os outros elementos pneumáticos, as válvulas também são representadas através de símbolos, o que permite a identificação de sua função em circuitos.

Estes símbolos dão idéia somente da função da válvula e não da sua construção (válido para qualquer fabricante). A tabela 2 mostra os símbolos principais.

Tabela 2: Simbologia para válvulas em circuitos pneumáticos.

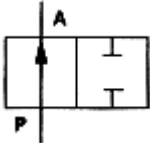
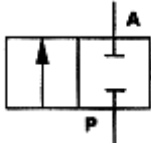
Definições	Símbolo
As posições das válvulas são representadas por quadrados.	
O número de quadrados unidos indica o número de posições que a válvula pode assumir.	
As setas indicam o sentido do fluxo.	
Os bloqueios são representados por "Ts"	
As conexões de entrada e saída serão representadas por traços externos, que indicam a posição de repouso da válvula. O número de traços indica o número de vias.	

3.11.3 Definições das posições

Define-se como "posição de repouso" aquela condição em que, através de molas, por exemplo, os elementos móveis da válvula são posicionados enquanto a mesma não está sofrendo a ação do ar comprimido, ou seja, não está sendo atuada.

A posição de "partida" ou "inicial" é a designação que se dá àquela que os elementos móveis da válvula assumem após montagem na instalação e a ligação da pressão de rede e com a qual começa o programa de trabalho previsto. A tabela 3 mostra a posição inicial e a de repouso.

Tabela 3: Posições que uma válvula simples pode assumir.

Posição inicial	Posição de repouso
	

3.11.4 Identificação das conexões

Um sistema de numeração é usado para designar as conexões das válvulas direcionais, de acordo com a norma DIN 24.300/ISO 559911. A prioridade é dada para um sistema de letras. Ambos os sistemas de designação estão apresentados na tabela 4.

Tabela 4: Identificação das vias das válvulas.

Conexão	DIN 24.300	ISSO 559911
Pressão - Entradas	A, B, C, D	2, 4, 6
Pressão – Saídas	P	1
Escapes (respiros)	R, S, T	3, 5, 7
Comandos (conexões de pilotagem)	X, Y, Z	12, 14, 16

3.11.5 Posições e conexões

A denominação de uma válvula depende do número de vias (conexões) e do número das posições de comando. O primeiro número indica quantidade de vias e o segundo número indica a quantidade de posições de comando da válvula. As conexões de pilotagem não são consideradas como vias. As posições das principais válvulas estão mostradas na tabela 5.

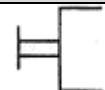


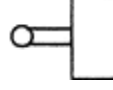



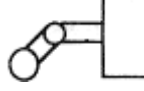


Tabela 5: Posições e símbolos.

Designação	Composição	Símbolo
2/2	2 vias por 2 posições; normalmente aberta	
2/2	2 vias por 2 posições; normalmente fechada	
3/2	3 vias por 2 posições; normalmente fechada	
3/2	3 vias por 2 posições; normalmente aberta	
3/3	3 vias por 3 posições; centro fechado	
4/2	4 vias com 2 posições; de P para B e A para R	
4/3	4 vias por 3 posições; centro fechado	
4/3	4 vias por 3 posições; centro aberto para exaustão	
5/2	5 vias com 2 posições; de P para B e A para R	
5/3	5 vias por 3 posições; centro fechado	

3.11.6 Forma de acionamento

A comutação das válvulas direcionais depende de acionamentos externos, que podem ser: mecânicos, elétricos, pneumáticos ou ainda combinados. Os símbolos dos elementos de acionamento estão apresentados na tabela 6.

Tabela 6: Tipos de acionamento.

Acionamento	Símbolo
Geral	
Alavanca	
Pedal	
Roleta	
Pneumático	
Botão	
Mola	
Gatilho (roleta escamoteável)	
Solenóide	
Servo piloto	

3.12 Válvulas de assento

As válvulas de assento são vedadas por esfera, prato ou cone. As vedações das válvulas são feitas de maneira muito simples, geralmente com elementos elásticos. As válvulas de sede possuem poucas peças de desgastes e têm, portanto, uma longa vida útil. Elas são insensíveis à sujeira. A força de acionamento deve ser relativamente alta, necessária para vencer a força da mola de reposição (quando existir).

Válvula de assento esférico

A construção das válvulas de sede esférica é muito simples e, portanto, de preço vantajoso. Estas válvulas se caracterizam por suas reduzidas dimensões.

Nesse tipo de válvula (figura 53), uma mola força a esfera contra a sede evitando que o ar comprimido passe do orifício de pressão P para o orifício de trabalho A. Pelo acionamento da haste da válvula, afasta-se a esfera da sede. Para isto, é necessário vencer a força da mola e a força do ar comprimido. O acionamento pode ser realizado manual ou mecanicamente.

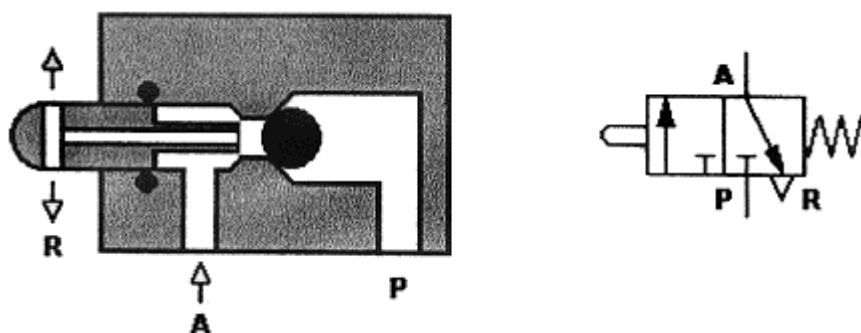


Figura 53 - Válvula de assento esférico.

Válvula de assento de prato

Essas válvulas são construídas e baseadas no princípio de sede esférica (figura 54). Elas têm uma vedação simples e eficiente. O tempo de comutação é curto. Um pequeno movimento de prato libera uma grande área de passagem do fluxo do ar. Também estas, como as de sede esférica, são insensíveis à sujeira e têm uma vida útil adequada.

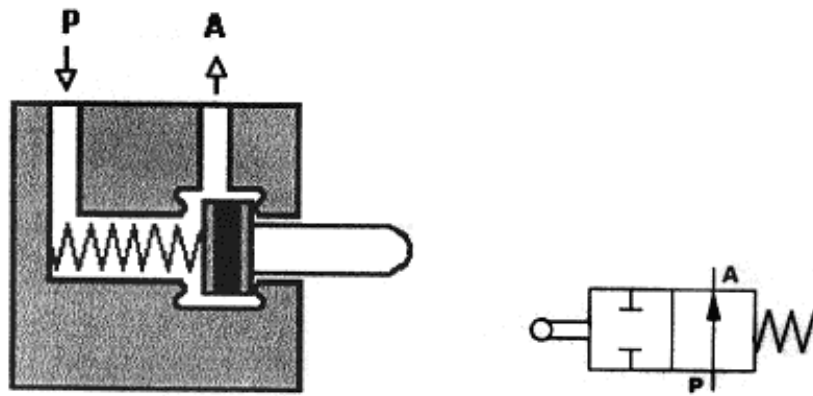


Figura 54 -: Válvula de assento prato.

3.13 Válvula de assento prato de 3/2, NF.

As válvulas direcionais de 3/2 vias são utilizadas para comandar cilindros de simples ação ou como emissores de sinal para pilotar outras válvulas de comando.

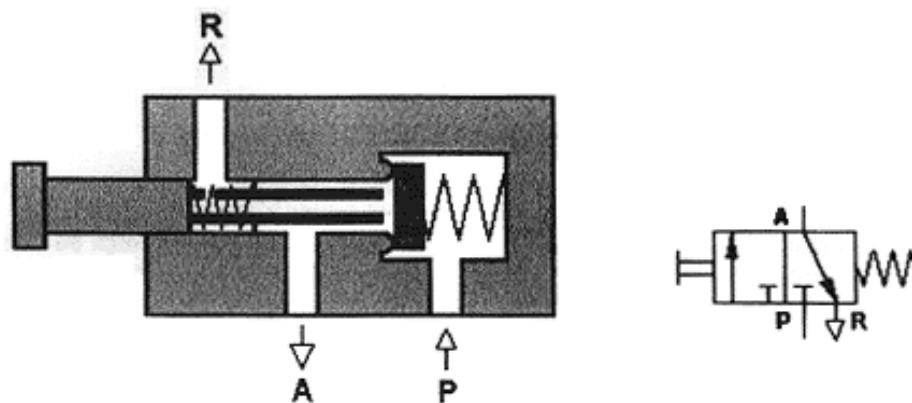


Figura 55 - Válvula de assento prato de 3/2, normalmente fechada.

- **Exemplo de aplicação - Comando direto**

A figura 56 mostra um exemplo de aplicação da válvula de assento prato 3/2, NF, no comando direto.

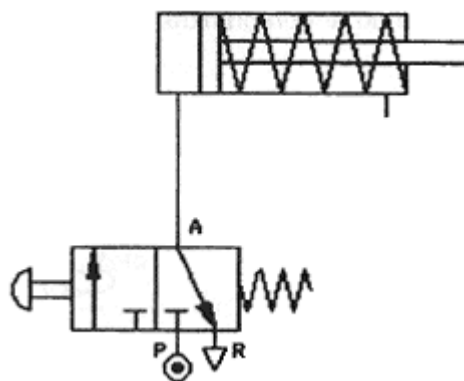


Figura 56 - Ligação comando direto com válvula de assento prato de 3/2, normal fechada.

3.13.1 Válvula de 3/2 vias, com acionamento pneumático.

As válvulas com acionamento pneumático são acionadas através de um êmbolo de comando (figura 57). O ar comprimido na conexão Z desloca o eixo da válvula contra a mola de retorno. Os orifícios P e A são interligados. Após a retirada do sinal de comando Z, o êmbolo de comando é deslocado novamente à posição inicial por intermédio da mola. O prato fecha a via de P para A. O ar da saída A pode fluir através de RA. A pressão mínima de acionamento é de 2,8 bar no tamanho de 1/8".

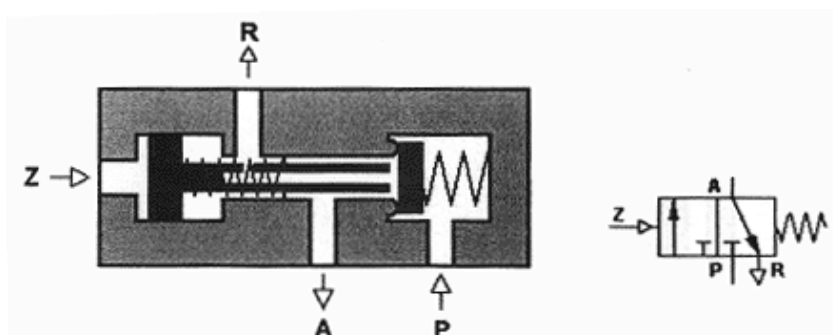


Figura 57 - Válvula de 3/2 vias, com acionamento pneumático.

3.13.2 Válvula de 3/2 vias acionada por rolete

A força de acionamento de uma válvula é geralmente determinante na sua utilização. A força de acionamento da válvula de 3/2 vias acionada por rolete (figura 58) é relativamente grande, pois tem que ser vencida a força da mola e da pressão.

Ao ser acionado o rolete, o came de acionamento é deslocado, o que desloca o assento do prato, permitindo a passagem de ar de P para A.

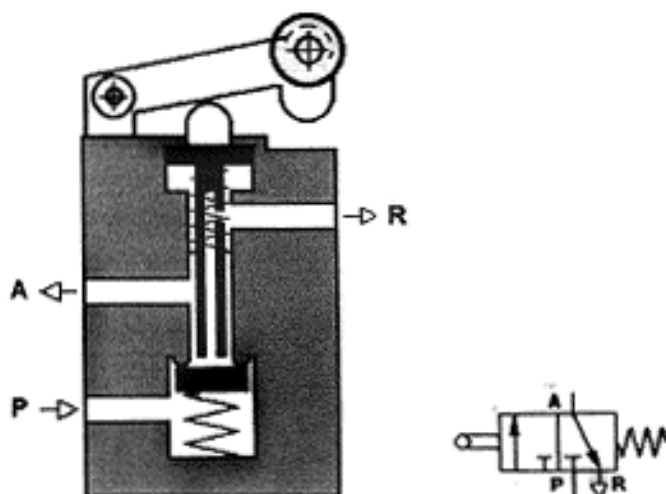


Figura 58 - Válvula de 3/2 vias acionada por rolete.

3.13.3 Válvula de 3/2 vias servo-comandada por rolete

Para reduzir a força de atuação do comando mecânico em válvulas direcionais, é utilizado o sistema de servo-comando. A força de acionamento deste tipo de válvula, no tamanho de 1/8", é de 1,8 N numa pressão de trabalho de 600 kPa (6 bar).

O tipo construtivo desta válvula permite sua utilização como válvula normal fechada ou aberta. Para a inversão, devem ser mudadas as posições do cabeçote de acionamento em 180° e a entrada da pressão.

A válvula é pilotada através de uma pequena passagem com o canal de alimentação P (figura 59). Acionando a alavanca do rolete, a válvula de servo-comando é aberta. O ar comprimido flui para o êmbolo da válvula principal e movimenta o prato para baixo interligando P com A.

3.13.4 Válvulas corredeiras

As conexões de ligação das válvulas corredeiras são interligadas e fechadas por carretéis corredeiros, comutadores corredeiros ou discos giratórios.

3.13.4.1 Válvula corredeira longitudinal

Trata-se das válvulas de 5/2 e 3/2 vias, que têm um pistão (carretel) como elemento de comando, que seleciona as ligações mediante seu movimento longitudinal (figura 60). A força de

acionamento é pequena, pois não é necessário vencer a pressão do ar ou da mola, ambas inexistentes.

Neste tipo de válvula são possíveis todos os tipos de acionamentos: manual, mecânico, elétrico e pneumático. O mesmo é válido também para o retorno à posição inicial. O curso é consideravelmente mais longo do que as válvulas de assento, assim como os tempos de comutação.

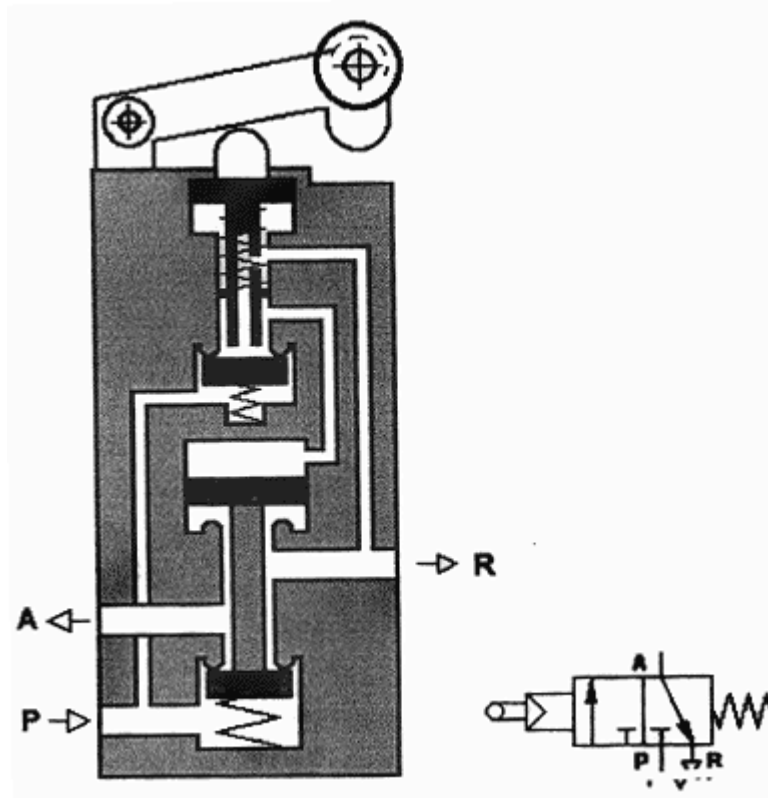


Figura 59 - Válvula de 3/2 vias servo-comandada por rolete.

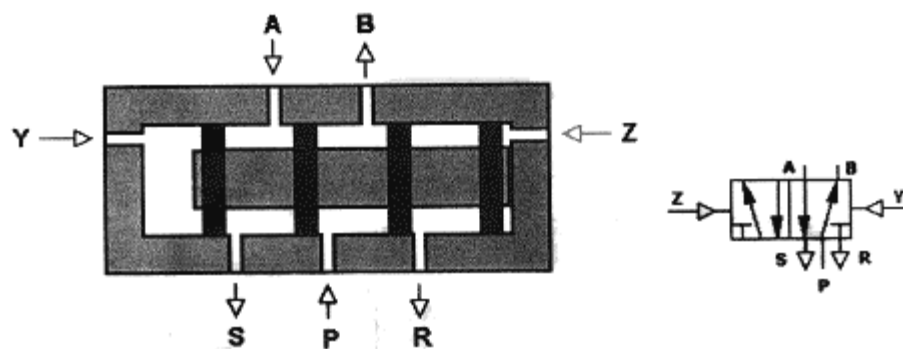


Figura 60 - Válvula corredeira longitudinal.

- **Exemplo de aplicação da válvula corredeira longitudinal**

A figura 61 mostra um exemplo de circuito para o comando indireto, utilizando válvula corredeira longitudinal.

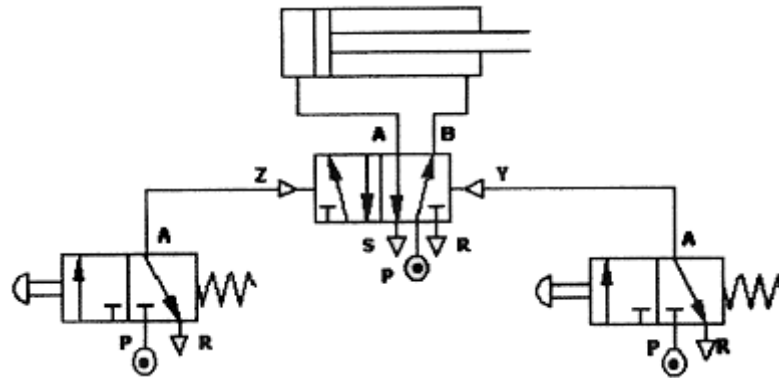


Figura 61 - Ligação comando indireto com Válvula corredeira longitudinal.

3.13.4.2 Válvulas de 3/2, NF, acionamento manual.

A figura 62 mostra uma válvula corredeira de 3/2, NF, com acionamento manual.

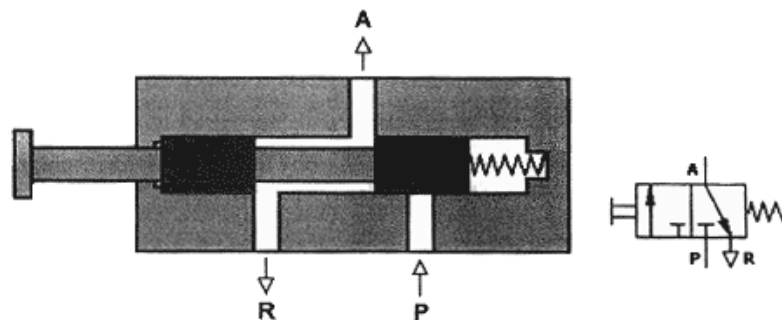


Figura 62 - Válvulas de 3/2, normalmente fechada, acionamento manual.

3.13.4.3 Válvula de 3/2, NA, acionamento por ar comprimido.

A figura 63 mostra uma válvula corredeira de 3/2, NF, com acionamento por ar comprimido.

- **Exemplo de aplicação**

A figura 64 mostra um exemplo de circuito para o comando indireto, utilizando válvula 3/2, normalmente aberta, acionada por ar comprimido.

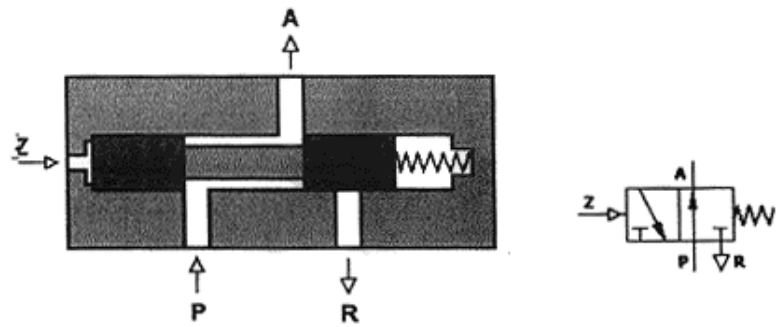


Figura 63 - Válvula de 3/2, normalmente aberta, acionamento por ar comprimido.

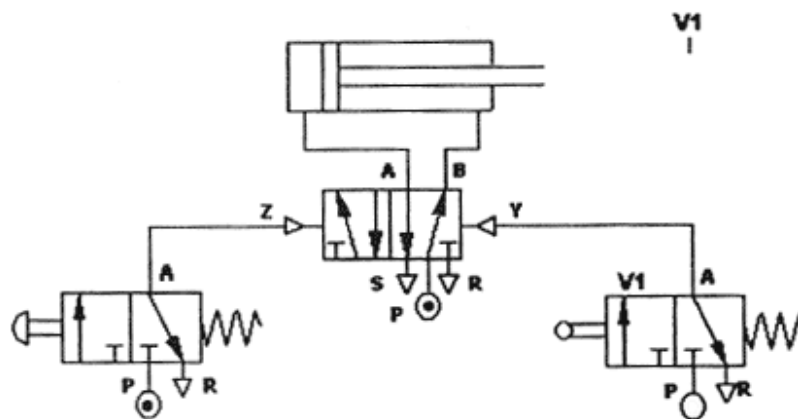


Figura 64 - Ligação comando direto com válvula de 3/2, normalmente aberta, acionamento por ar comprimido.

3.13.4.4 Válvula corredeira giratória

Estas válvulas são geralmente de acionamento manual ou por pedal. Geralmente são fabricadas como válvulas direcionais de 3/3 vias ou 4/3 vias (figura 65). Mediante o deslocamento rotativo de duas corredeiras, pode ser feita a comutação dos canais entre si.

Na posição central fechada, o êmbolo do cilindro pode parar em qualquer posição do seu curso, porém essas posições intermediárias não são fixadas com exatidão. Isso ocorre devido à compressibilidade do ar, que ao variar a carga na haste também varia sua posição.

- **Exemplo de aplicação da válvula corredeira giratória**

A figura 66 mostra um exemplo de circuito para o comando direto, utilizando válvula corredeira giratória.

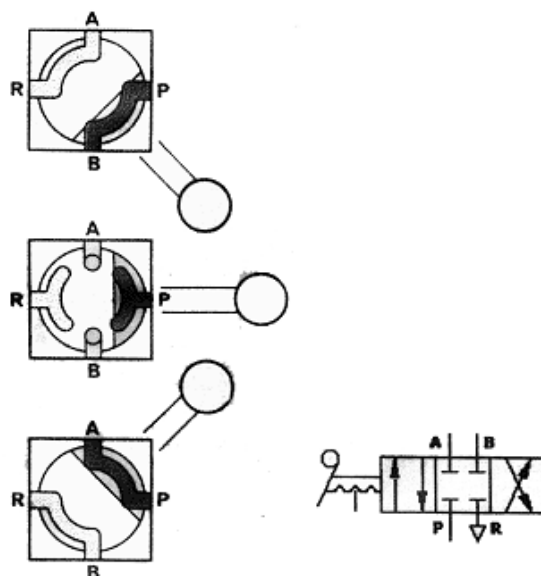


Figura 65 - Válvula corredeira giratória.

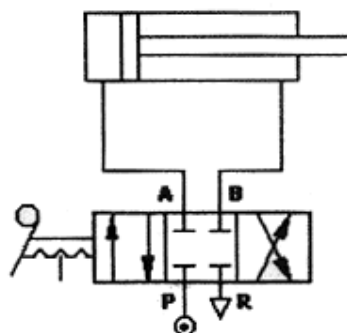


Figura 66 - Ligação comando direto com válvula corredeira giratória.

3.13.5 Válvula de 3/2 vias acionamento por solenóide

As válvulas com acionamento por solenóide (figura 67) são utilizadas onde o sinal de comando parte de um timer elétrico, de uma chave de fim de curso elétrica, de um pressostato ou aparelho eletrônico. São usadas em comandos onde as distâncias são relativamente grandes e o tempo de comutação curto.

São divididas em dois grupos de comando: o direto e o indireto. As de comando direto são usadas apenas para baixa vazão de ar e as de comando indireto para comando a longa distância e de alta vazão.

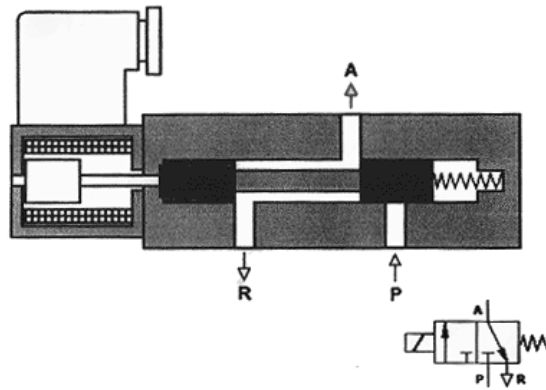


Figura 67 - Válvula de 3/2 vias acionamento por solenóide.

3.13.6 Válvula de 3/2 vias acionamento duplo solenóide

A figura 68 mostra uma variação na válvula solenóide, neste caso com acionamento duplo, sem mola.

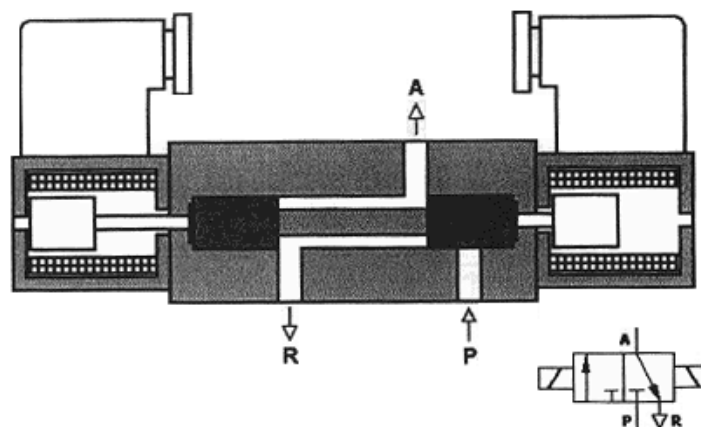


Figura 68 - Válvula de 3/2 vias acionamento duplo solenóide.

3.14 Válvulas de bloqueio

São elementos que bloqueiam a passagem preferencialmente em um só sentido, permitindo a passagem livre em direção contrária. A pressão do lado de entrada atua sobre o elemento vedante e permite com isso uma vedação perfeita da válvula.

3.14.1 Válvula de retenção

Essas válvulas (figura 69) impedem completamente a passagem de ar em uma direção. O fechamento pode ser feito por cone, esfera, placa ou membrana.

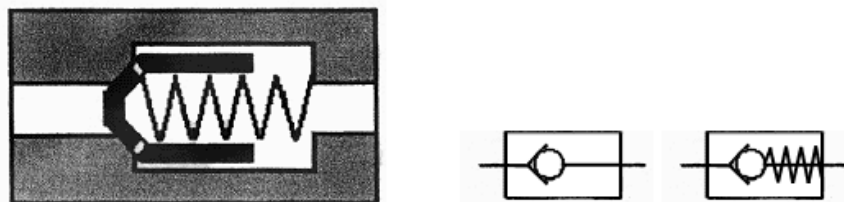


Figura 69 - Válvula de retenção.

3.14.2 Válvula de retenção pilotada

Na válvula de retenção pilotada (figura 70) existe a possibilidade de anular o bloqueio no sentido bloqueado por meio de um sinal de comando, numa conexão adicional de pilotagem. Com isso, a válvula opcionalmente permite fluxo nos dois sentidos.

O funcionamento se dá pelo dimensionamento adequado das relações de áreas e a pressão utilizada é a mesma ou mesmo de menor valor, atuando no êmbolo de acionamento.

Esta válvula pode ser usada em paradas intermediárias de cilindros pneumáticos. O bloqueio pode ocorrer caso haja uma queda de pressão. O desbloqueio é realizado por um sinal pneumático proveniente de uma outra válvula.

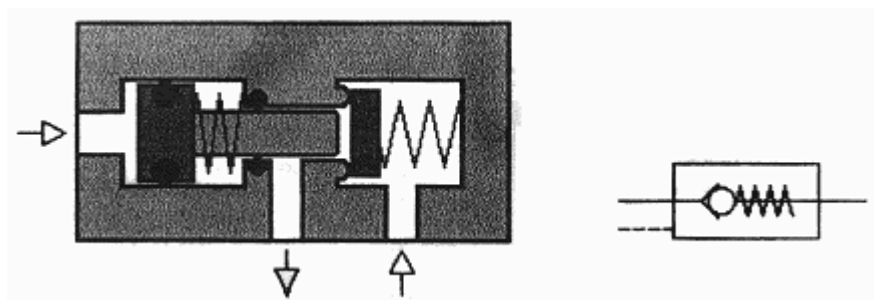


Figura 70 - Válvula de retenção pilotada.

3.15 Válvula alternadora (“OU”)

Estas válvulas são chamadas também de elemento “OU” e selecionam sinais emitidos por válvulas de “sinais” provenientes de diversos pontos, impedindo o escape de ar por uma segunda válvula.

A válvula possui duas entradas X e Y e uma saída A (figura 71). Quando o ar comprimido entra em X, a esfera bloqueia a entrada Y e o ar passa de X para A. Em sentido contrário, quando o ar passa de Y para A, a entrada X fica bloqueada. Quando o ar retorna, quer dizer, quando um lado de um cilindro ou de uma válvula entra em exaustão, a esfera permanece na posição em que se encontrava antes do retorno do ar.

Com pressões iguais e havendo coincidência de sinais em X e Y, prevalece o sinal que chegar primeiro. Em caso de pressões diferentes, a pressão maior fluirá para A. As válvulas alternadoras são empregadas quando há necessidade de enviar sinais de lugares diferentes a um único ponto de comando.

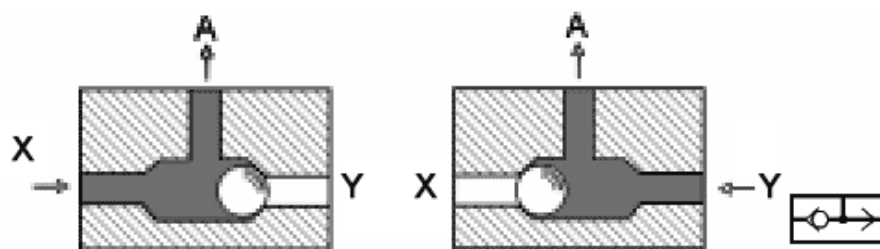


Figura 71 - Válvula alternadora ("OU").

3.16 Válvula de simultaneidade ("E")

Também chamada de elemento "E", esta válvula é utilizada para combinar sinais de diferentes pontos para execução de uma ação ou tarefa. Possui duas entradas X e Y e uma saída A (figura 72). O ar comprimido pode passar unicamente quando houver pressão em ambas as entradas. Um sinal de entrada em X ou Y impede a passagem do fluxo de ar para A, em função do desequilíbrio das forças que atuam sobre a peça móvel.

Quando as pressões nas entradas são iguais, aquela que chegou por último é a que fornece ar à saída A. Se os sinais de entrada são de pressões diferentes, a maior bloqueia um lado da válvula e a pressão menor chega até a saída A. São utilizadas em comandos de bloqueio, funções de controle e operações lógicas.

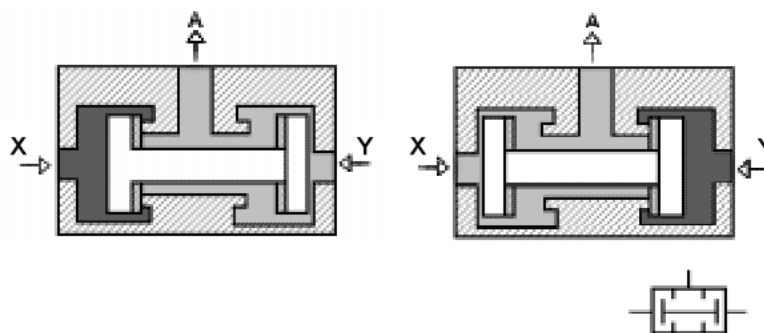


Figura 72 - Válvula de simultaneidade ("E").

3.17 Válvula de escape rápido

Estas válvulas são usadas para aumentar a velocidade dos êmbolos dos cilindros. Tempos de retorno elevados, especialmente em cilindros de simples ação, podem ser eliminados dessa forma.

A válvula é dotada de uma conexão de entrada P, uma de escape R e uma saída A. Quando a pressão é aplicada em P, a junta desloca-se contra o assento e veda o escape R e o ar circula até a saída A. Quando a pressão em P deixa de existir, o ar que agora retorna pela conexão A movimenta a junta contra a conexão P, provocando seu bloqueio (figura 73). Dessa forma, o ar pode escapar por R rapidamente para a atmosfera, evitando com isso que o ar de escape seja obrigado a passar por uma canalização longa e de diâmetro pequeno até a válvula de comando. Para que haja melhor proveito dessa característica, é recomendável colocar o escape rápido diretamente no cilindro ou o mais próximo possível do mesmo.

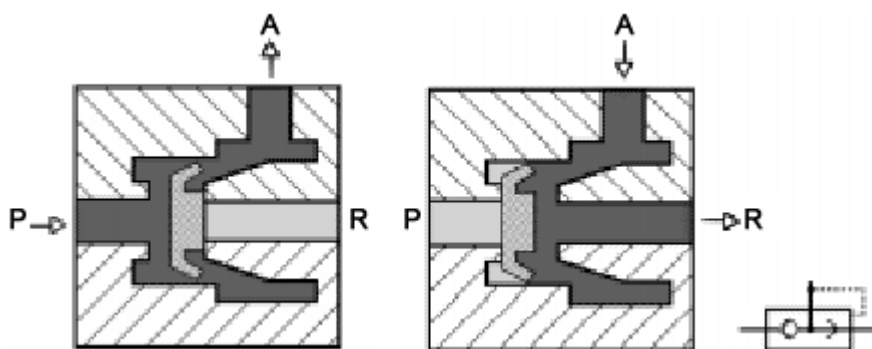


Figura 73 - Válvula de escape rápido.

3.18 Expulsor pneumático

O ar comprimido é muito utilizado para limpar e expulsar peças. Porém, ar comprimido é muito caro para ser utilizado neste tipo de aplicação, com conseqüente desperdício. O método mais comum e conhecido é aquele no qual o consumo de ar da rede é contínuo e incidindo diretamente no local de expulsão. Com a utilização do expulsor como ferramenta auxiliar, o trabalho se torna muito mais econômico.

O expulsor pneumático é composto dos seguintes elementos: válvula de escape rápido, um pequeno reservatório e um direcionador do jato (figura 74). O volume do reservatório é correspondente ao volume de ar necessário à execução da tarefa desejada.

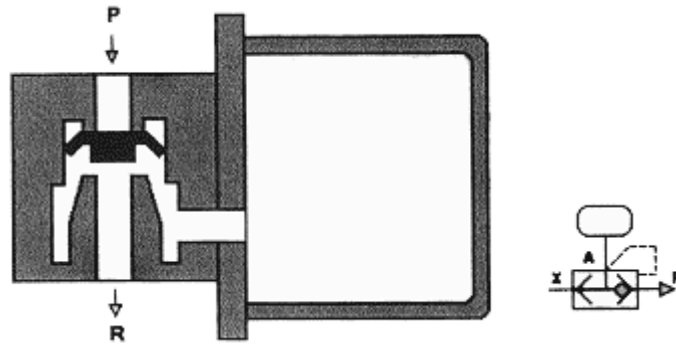


Figura 74 - Expulsor pneumático.

3.19 Válvulas controladoras de vazão

São elementos que controlam a vazão de ar para as câmaras dos cilindros e outros locais que dependam desse controle.

3.19.1 Válvula de fluxo

Estas válvulas têm influência sobre a quantidade de ar comprimido que flui por uma tubulação. Existem válvulas de controle de fluxo bidirecionais (figura 75), porém as mais comumente utilizadas são as unidirecionais.

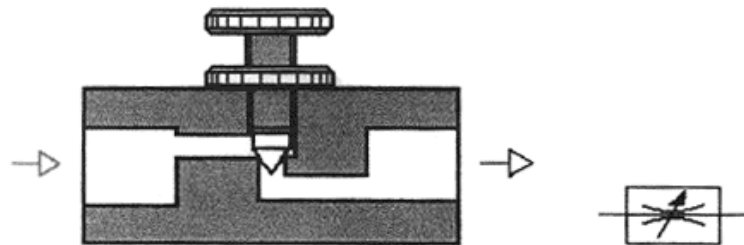


Figura 75 - Válvula de controle de fluxo bidirecional.

3.19.2 Válvula reguladora de fluxo unidirecional

Também conhecida como “válvula reguladora de velocidade” ou “regulador unidirecional”, esta válvula possui uma retenção que fecha a passagem do fluxo de ar numa direção, permitindo fluir somente através da seção regulável. Em sentido contrário, o ar passa livremente através da retenção aberta. Estas válvulas são muito utilizadas para o retardo da passagem do ar.

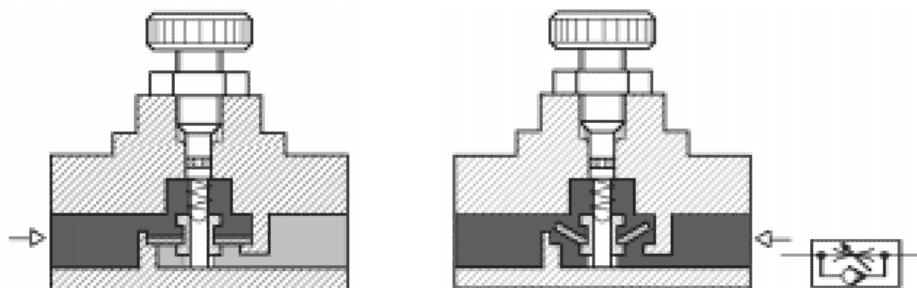


Figura 76 - Válvula de controle de fluxo unidirecional.

3.19.3 Válvula de regulação da velocidade

Nos cilindros, o ar entra livremente pela entrada de alimentação e é estrangulado na saída. Com isso, o êmbolo fica submetido a duas pressões de ar.

A conduta do avanço é melhorada com a utilização da válvula de regulação de velocidade, razão pela qual a regulação em cilindros de dupla ação deve ser feita na saída de ar da câmara do cilindro.

Em cilindros de pequeno diâmetro (pequeno volume) ou de pequeno curso, a pressão no lado da exaustão não pode aumentar muito rapidamente, sendo eventualmente obrigatória a utilização conjunta das válvulas reguladoras para a entrada e saída do ar das câmaras dos cilindros, a fim de que a velocidade desejada seja obtida.

3.20 Válvulas de pressão

São válvulas que têm por função principal agir sobre a pressão. Por este motivo, têm a capacidade de exercer a função reguladora. Essas válvulas são divididas, conforme suas funções em:

- ▶ Válvula reguladora de pressão;
- ▶ Válvula limitadora de pressão;
- ▶ Válvula de seqüência (pressostato).

3.20.1 Válvula reguladora de pressão

A válvula reguladora de pressão tem a tarefa de manter constante a pressão de trabalho, isto é, transmitir a pressão ajustada no manômetro aos elementos de trabalho ou válvulas, sem variação, mesmo com a pressão oscilante na rede. A pressão de entrada deve ser sempre maior que a pressão de saída.

- **Válvula reguladora de pressão com orifício de escape**

A pressão é regulada por meio de uma membrana. Uma das faces é submetida à pressão de trabalho, enquanto a outra é pressionada por uma mola cuja pressão é ajustável por meio de um parafuso de regulagem (figura 77). Com o aumento da pressão de trabalho, a membrana se movimenta contra a força da mola. Com isso a seção nominal de passagem na sede da válvula vai diminuindo até o fechamento completo. Neste caso, significa que a pressão é regulada pela vazão.

Por ocasião do consumo, a pressão diminui e a força da mola e reabre a válvula. Manter a pressão regulada se torna um constante abrir e fechar da válvula. Para evitar a ocorrência de uma vibração indesejável, é utilizada uma mola sobre o prato da válvula. Sua função é de amortecedor. A pressão de trabalho é indicada em um manômetro. A figura 78 mostra os detalhes da válvula e do orifício de escape. Nessa figura, os números representam os seguintes elementos: 1 - Membrana; 2 - Mola atuadora durante a regulagem de pressão; 3 - Parafuso de regulagem de pressão; 4 - Orifício de passagem de ar; 5 - Amortecedor; 6 - Prato da válvula.

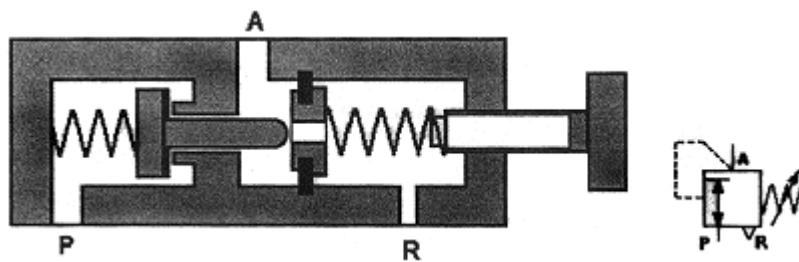


Figura 77 - Válvula reguladora de pressão com orifício de escape.

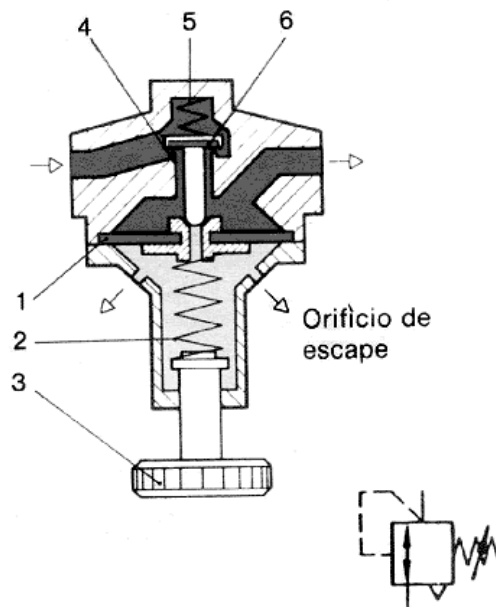


Figura 78 - Detalhes da válvula reguladora de pressão com orifício de escape.

Se a pressão crescer demasiadamente do lado secundário, a membrana é pressionada contra a mola. Com isso, abre-se o orifício da parte central da membrana e o ar em excesso sai pelo furo de escape para a atmosfera.

- **Válvula reguladora de pressão sem orifício de escape**

O funcionamento desta válvula é o mesmo da válvula anterior, com a diferença que na parte central da membrana não existe o orifício de escape e, portanto, o ar em excesso não pode escapar para a atmosfera (figura 79).

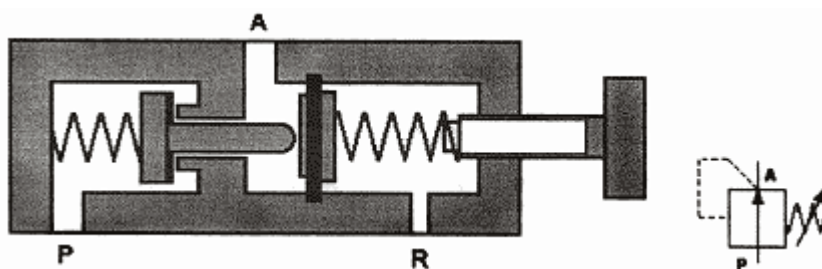


Figura 79 - Válvula reguladora de pressão sem orifício de escape.

3.20.2 Válvula limitadora de pressão

Esta válvula tem a finalidade de não permitir o aumento da pressão no sistema acima do valor máximo ajustado. Atingindo-se o valor máximo da pressão na entrada da válvula, abre-se a saída e o ar escapa livremente para a atmosfera (figura 80). A válvula permanece aberta até que a mola, após a pressão ter caído abaixo do valor ajustado, volte a fechá-la. É usada também como válvula de segurança ou de alívio.

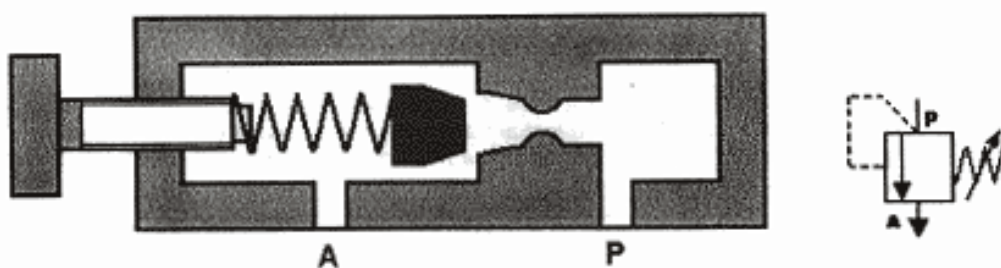


Figura 80 - Válvula limitadora de pressão.

3.20.3 Válvula de seqüência (pressostato)

A válvula de seqüência é muito similar à válvula limitadora de pressão, ou seja, abre uma passagem de escape quando alcançada uma pressão superior à ajustada pela mola. Quando no orifício Z, mostrado na figura 81, existir uma pressão superior à pré-ajustada, o êmbolo movimentado uma válvula de 3/2 vias, de maneira a estabelecer um sinal na saída A.

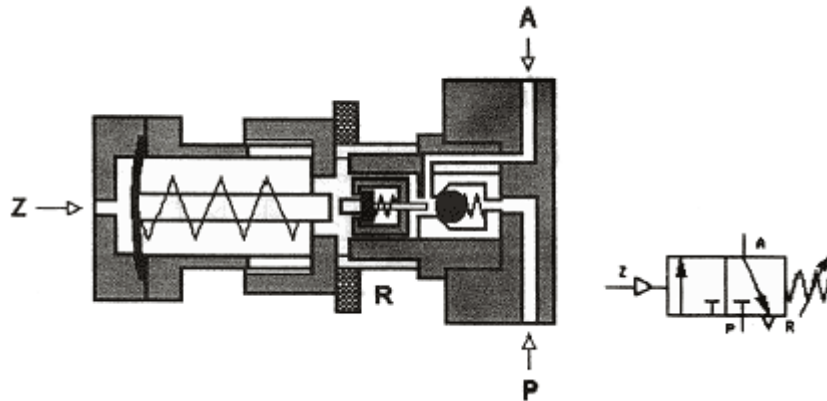


Figura 81 - Válvula de seqüência (pressostato).

3.21 Válvulas especiais

São as válvulas comuns que, quando combinadas, realizam funções mais complexas do que cada uma delas individualmente.

3.21.1 Válvula de tempo

Na pneumática a temporização serve para criar um retardo no envio ou na interrupção de um sinal de comando. As temporizações podem ser realizadas de diversas formas:

- ▶ Retardo na formação da pressão de pilotagem, obtido através da pressurização de um reservatório e de um estrangulador;
- ▶ Descompressão através de fole e estrangulador;
- ▶ Mecanismos com contatos de comutação pneumática.

O tempo dos sinais pode ser controlado pela combinação de uma válvula de 3/2 vias, uma válvula reguladora de fluxo unidirecional e um pequeno reservatório de ar. Esses elementos formam válvulas de posição normal fechada ou aberta. Geralmente o tempo varia de 0 a 30 segundos, para válvulas do tipo puramente pneumáticas.

- **Válvula temporizadora Normal Fechada (N.F.)**

Nesta válvula, apresentada na figura 82, o ar comprimido entra pelo orifício P. O ar de comando entra na válvula pelo orifício Z e passa através de uma reguladora de fluxo unidirecional. À medida que o ajuste da válvula permite a passagem de uma quantidade maior ou menor de ar (por unidade de tempo) para o depósito de ar incorporado, este alcançada a pressão necessária de comutação, o que faz com que o êmbolo de comando afaste o prato do assento da válvula, dando passagem de P para A. O tempo de formação da pressão no reservatório correspondente ao retardo da válvula.

Para que a válvula retorne a sua posição inicial, é necessário exaurir o ar de comando através do orifício Z. Nesse caso, o ar escapa através da válvula reguladora de fluxo, o piloto da válvula direcional fica sem pressão, permitindo que a mola feche a válvula, ligando a saída A com o escape R.

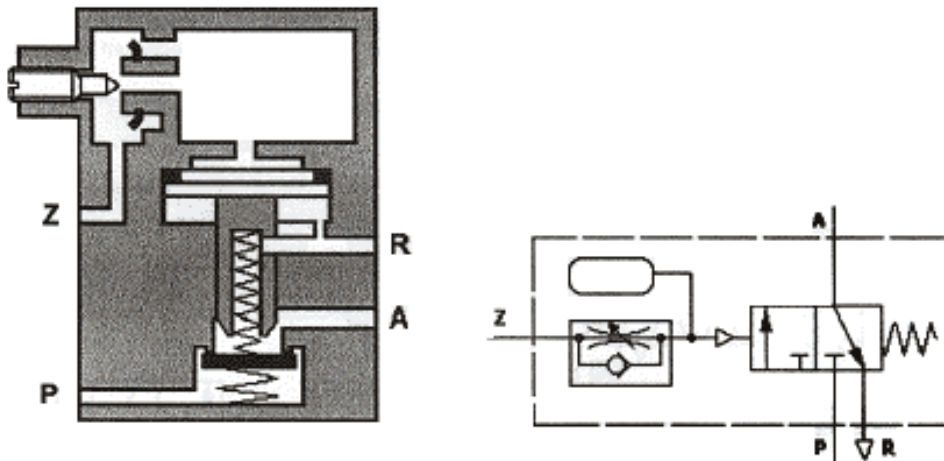


Figura 82 - Válvula temporizadora Normal Fechada (N.F.).

- **Válvula temporizadora Normal Aberta (N.A.)**

O funcionamento desta válvula é semelhante à válvula anterior, tendo como função a interrupção da passagem de P para A (figura 83). Neste tipo de construção não existe válvula reguladora de fluxo e o controle do tempo é regulado através do aumento ou diminuição da área de atuação do ar comprimido.

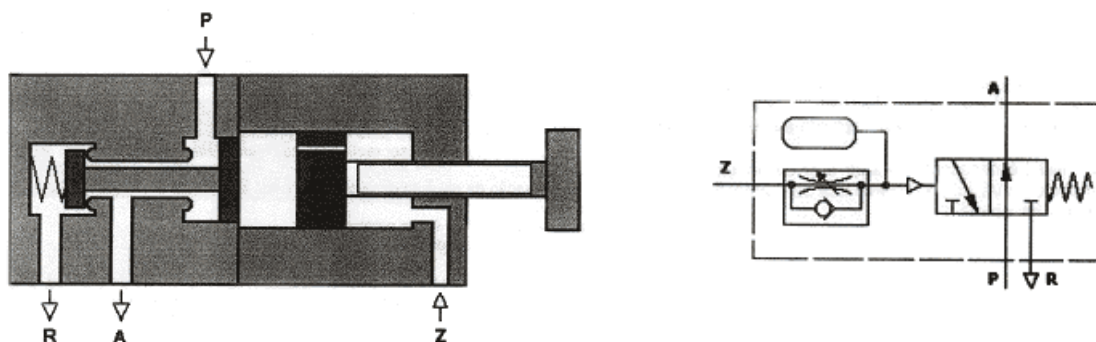


Figura 83 - Válvula temporizadora Normal Aberta (N.A.).

3.22 Representações de grupos e movimentos

O sistema de numeração está orientado segundo as funções dos elementos e tem a vantagem de permitir que o responsável pela manutenção conheça a forma de atuação do sinal de cada elemento. A figura 84 mostra os diversos elementos componentes em seus grupos, onde são setorizados:

Os **elementos de trabalho** constituídos por atuadores prismáticos ou revolutos;

Os **elementos auxiliares** dedicados a aplicação de lógicas complementares ao circuito, como esquematizado na figura onde é mostrada uma válvula “ou” determinando condições de recuo da haste do atuador linear;

Os **elementos de comando** onde são aplicadas válvulas direcionais;

Os **elementos de processamento de sinal** onde são dedicadas válvulas que aplicam funções lógicas booleanas;

Os **elementos de sinais**, constituídos por válvulas direcionais que são pilotadas por ação externa através de atuação elétrica, pneumática ou mecânica externas, como por exemplo no caso da figura 84 botões, pedais ou roletes mecânicos e

Os **elementos de alimentação** de ar comprimido.

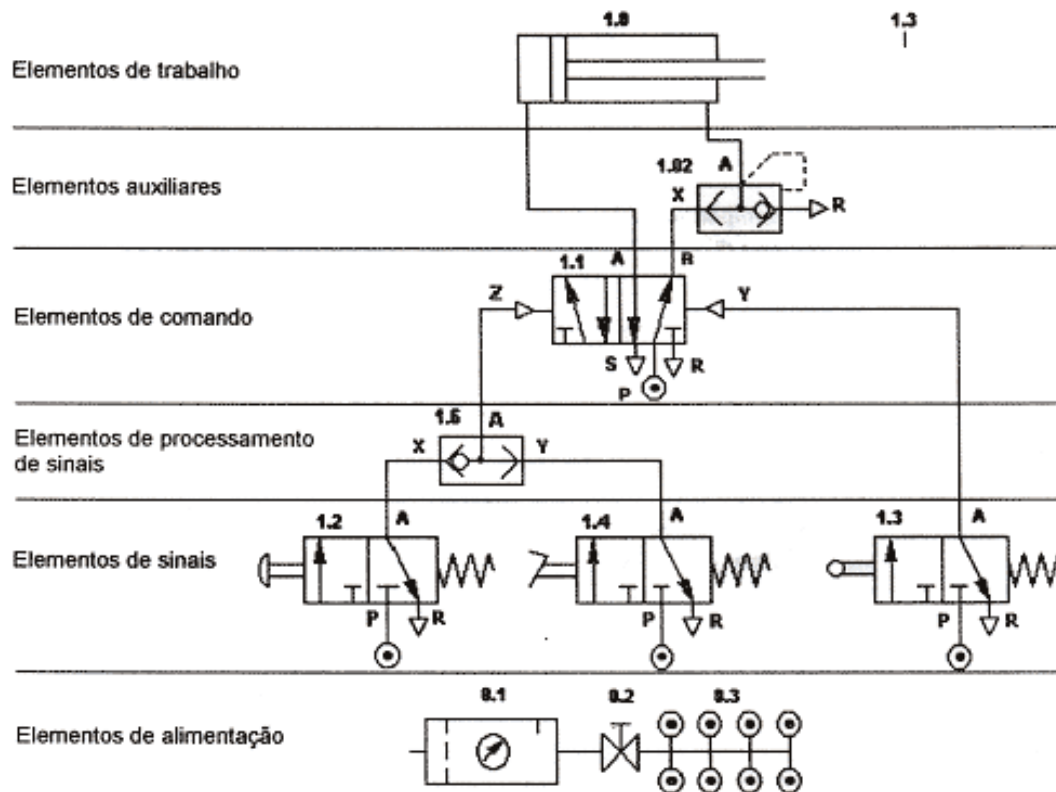


Figura 84 - Definição de grupos.

3.23 Representação dos elementos

Todos os elementos devem ser representados no esquema na posição inicial de comando. Caso isso não seja possível ou caso não se faça dessa maneira, é necessário fazer observações expondo o desvio de norma.

3.23.1 Definição das posições dos elementos (VDI 3260)

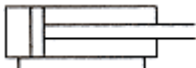

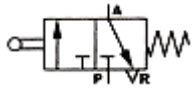
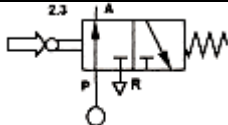
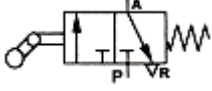

A posição de repouso dos componentes do sistema pneumático, quando este está sem energia, é definida pela configuração geral do sistema. As posições características, já apresentadas anteriormente, são:

- ▶ **Posição de repouso:** Posição de repouso é aquela que assumem as partes móveis dos elementos quando o mesmo não estiver acionado;
- ▶ **Posição inicial:** É aquela em que os elementos já estão acionados.

3.23.2 Representação simbólica dos elementos

Os principais elementos são apresentados na tabela 7, no estado inicial, conforme a norma pertinente recomenda.

Tabela 7: Elementos no estado inicial.

Elemento	Símbolo
Inicialmente recuado	
Inicialmente avançado	
Na posição de repouso	
Inicialmente acionada	
Sentido de acionamento do gatilho	
Representação do fim de curso (no caso, sentido de acionamento do gatilho)	

3.24 Questionário sobre atuadores pneumáticos

1. Quais os principais atuadores lineares e rotativos utilizados em sistemas pneumáticos? Descreva as suas principais características.
2. Quais os principais tipos de motores pneumáticos? Descreva as suas principais características.
3. Como funcionam os turbomotores?
4. Qual a função dos conversores de pressão?
5. Como funcionam as mesas giratórias?
6. Qual a principal função das válvulas direcionais?
7. Quais as principais formas de acionamento das válvulas direcionais?
8. Explique o princípio de funcionamento das válvulas alternadoras? A que função Booleana elas estão relacionadas?
9. Explique o princípio de funcionamento das válvulas de simultaneidade? A que função Booleana elas estão relacionadas?
10. Explique o princípio de funcionamento das válvulas reguladoras de pressão.

4. ATUADORES HIDRÁULICOS

Os Atuadores Hidráulicos são dispositivos projetados para gerar movimentos que podem ser lineares ou axiais. Os movimentos são provocados pela injeção de um líquido a alta pressão num recipiente perfeitamente selado onde estão uma haste ou um eixo. O líquido movimentada a haste ou o eixo.

O princípio de funcionamento dos atuadores hidráulicos é baseado na Lei de Pascal para fluídos incompressíveis. Se uma pressão externa é aplicada ao fluído, esta pressão é transferida para todas as superfícies em contato com este, sem perda de energia.

A principal vantagem dos dispositivos hidráulicos é poderem entregar uma força (no caso dos pistões) ou um torque (no caso dos motores) muito maior do que os seus similares eletro-mecânicos com as mesmas dimensões.

Os motores hidráulicos têm certas vantagens sobre os motores elétricos. Algumas destas vantagens são: a possibilidade de reversão instantânea do eixo do motor; poder ficar carregado por períodos muito grandes sem danos; permitir controle de torque em toda a sua faixa de velocidade; apresentar frenagem dinâmica obtida facilmente e apresentar uma relação peso-potência de 0,22 kg/HP comparada a uma relação peso-potência de 4,5 kg/HP para motores elétricos.

As principais desvantagens da utilização dos atuadores hidráulicos estão relacionadas com a necessidade de espaço. É necessário alocar os dispositivos, que são maiores as micromáquinas elétricas; o sistema de geração de energia, basicamente a bomba hidráulica, e o sistema de transmissão de energia, em especial as mangueiras. Essa limitação impossibilita o uso de dispositivos hidráulicos em diversas aplicações.

Os atuadores hidráulicos executam função oposta a das bombas hidráulicas e convertem energia hidráulica em energia mecânica para efetuar trabalho útil. Num circuito típico, o atuador é mecanicamente ligado à carga de trabalho e é atuado pelo fluido da bomba. Dessa forma, força ou torque são transformados em trabalho. Os atuadores podem ser classificados, de modo geral, em: lineares (cilindro atuador) ou rotativos (motor hidráulico).

O atuador linear, como um cilindro acionador, é usado para operações de prender e prensar, ou para movimento de avanço rápido e refinado. As aplicações de um atuador rotativo ou motor hidráulico incluem operações de mandrilar, torneiar, posicionar etc.

Cilindros hidráulicos transformam trabalho hidráulico em energia mecânica linear, que é aplicada contra uma resistência para realizar trabalho.

Um cilindro hidráulico, da mesma forma que o pneumático, consiste de uma camisa de cilindro, de um pistão móvel e de uma haste ligada ao pistão. Os cabeçotes são presos ao cilindro por meio de roscas, prendedores, tirantes ou solda.

Conforme a haste se move para dentro ou para fora, ela é guiada por guarnições removíveis. O lado para o qual a haste opera é chamado de lado dianteiro ou "cabeça do cilindro". O lado oposto, sem haste, é o lado traseiro. Os orifícios de entrada e saída podem estar localizados tanto no lado dianteiro como no lado traseiro.

4.1 Força do Cilindro

A pressão hidráulica aplicada à área do cilindro faz com que a haste se desloque (curso), transformando a energia hidráulica aplicada em trabalho. A pressão necessária para realizar o trabalho será tanto maior quanto maior for a resistência ao deslocamento oferecida pela carga.

Pode-se determinar a pressão a partir da expressão (20), que repete a equação (15) para cilindros pneumáticos.

$$\textit{pressão} = \frac{\textit{força}}{\textit{área}} \quad (20)$$

Importante se faz salientar que na quase totalidade das vezes somente o tamanho do cilindro (diâmetro) é conhecido, sendo necessário calcular a área.

4.2 Curso do Cilindro

A distância através da qual a energia hidráulica é aplicada determina quanto trabalho será realizado. Essa distância é o curso do cilindro. Quando se multiplica uma força utilizando um sistema hidráulico tem-se a impressão de que se está recebendo alguma coisa de graça. Parece que uma pequena força pode gerar uma força muito maior sob determinadas circunstâncias, e que nada foi sacrificado. Isto seria válido em um sistema que não se movesse, ou que sua haste não mudasse de posição. No entanto, se a força deve ser multiplicada e deslocada ao mesmo tempo, alguma coisa deve ser sacrificada. Na hidráulica, amplificar da força significa reduzir a distância de acionamento, ou seja, mantém-se o volume.

4.3 Volume do Cilindro

Cada cilindro tem um volume (deslocamento), que é calculado multiplicando-se o curso do pistão pela área do pistão (equação 21).

$$\textit{Volume do Cilindro} = \textit{Área do Pistão} \times \textit{Curso} \quad (21)$$

Na figura 85, o pistão superior deve avançar a uma distância de 5,0 cm para fazer o pistão inferior avançar 2,5 cm. O pistão superior desloca 325 cm³ de líquido e o pistão inferior desloca a mesma quantidade. No entanto, a força necessária para deslocar o pistão superior é menor do que a que pode ser aplicada à carga pelo pistão inferior.

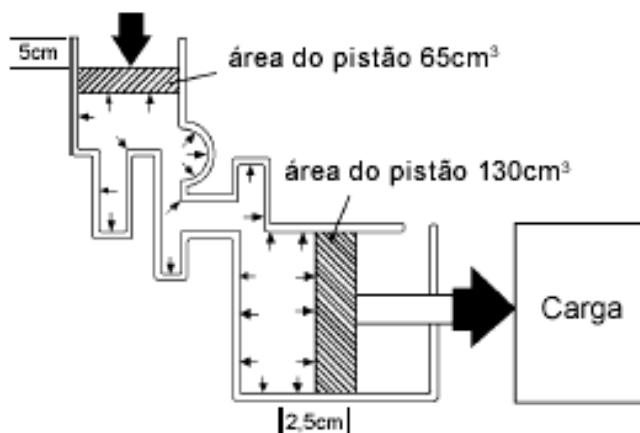


Figura 85 - Sistema hidráulico de transmissão de força.

4.4 Velocidade da Haste

A velocidade da haste de um cilindro é determinada pela velocidade com que um dado volume de líquido pode ser introduzido na sua camisa, durante o acionamento do pistão.

A expressão que descreve a velocidade da haste do pistão é:

$$\text{Velocidade da Haste} = \frac{\text{Vazão}}{\text{Área do Pistão}} \quad (22)$$

4.5 Guarnições

Para uma operação apropriada, uma vedação positiva deve existir em toda a extensão do pistão do cilindro e também na haste. Os pistões do cilindro são vedados com guarnições elásticas ou anéis de vedação de ferro fundido.

Os anéis de pistão são normalmente duráveis, porém permitem vazamento na ordem 15 a 45 cm³ por minuto em condições de operação normal. Guarnições elásticas tipo "U" não vazam em condições normais, mas são menos duráveis.

As guarnições elásticas da haste são fornecidas em muitas formas e tipos. Alguns cilindros são equipados com guarnições fabricadas de couro, poliuretano, borracha nitrílica ou viton. Alguns possuem uma guarnição raspadora, que previne a entrada de materiais estranhos no cilindro.

Um tipo comum de guarnição elástica consiste em uma guarnição primária com a lateral dentada em formato de serra na parte interna. As serrilhas entram em contato com a haste e continuamente raspam o fluido, limpando-a. Uma guarnição secundária retém todo o fluido da guarnição primária e ainda previne contra a entrada de sujeira quando a haste recua.

4.6 Dreno da Guarnição

Durante a operação da guarnição, apresentada na sessão 4.5, qualquer fluido coletado na câmara formada pela guarnição primária e pela guarnição de raspagem é recolhido novamente ao cilindro durante o recuo da haste. Nos cilindros de curso extremamente grande (300 cm ou mais) há a possibilidade de se acumular muito fluido nessa câmara e ocorrer vazamento.

Nestas aplicações, onde ocorre uma retenção muito grande de fluido entre as guarnições, o sistema de retenção da haste deve ser drenado externamente (figura 86).

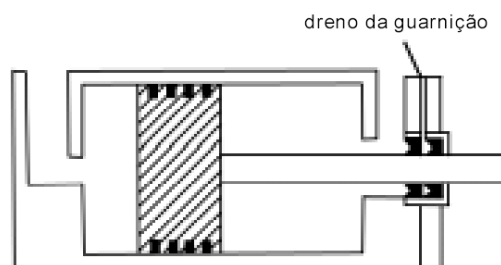


Figura 86 – Sistema de dreno da guarnição.

4.7 Choque Hidráulico

Quando o cilindro encontra um obstáculo, como o final de curso de um pistão, a inércia do líquido ou a energia hidráulica do sistema é transformada. Isso gera um choque ou batida, denominada choque hidráulico. Se uma quantidade substancial de energia deve ser retirada, o choque pode causar dano ao cilindro.

4.8 Amortecedor Hidráulico

Para proteger os cilindros contra choques excessivos, pode ser necessário utilizar sistemas que provejam amortecimento.

O amortecimento diminui o movimento do cilindro antes que chegue ao fim do curso. Os amortecedores podem ser instalados em ambos os lados do cilindro. A figura 87 mostra um amortecedor hidráulico típico.

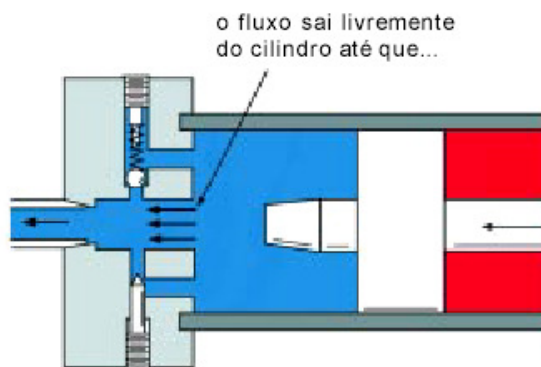


Figura 87 – Sistema de amortecimento para cilindros hidráulicos

Um amortecedor consiste em uma válvula de agulha para controle de fluxo e em um plugue ligado ao pistão. O plugue de amortecimento pode estar no lado da haste, onde ele é chamado de colar, ou pode estar no lado traseiro, onde é chamado de batente de amortecimento.

Conforme o pistão do cilindro se aproxima do seu fim de curso, o batente bloqueia a saída normal do líquido e obriga o fluido a passar pela válvula controle de vazão. Nesta altura, algum fluxo escapa pela válvula de alívio de acordo com a sua regulagem. O fluido restante adiante do pistão é expelido através da válvula controle de vazão e retarda o movimento do pistão. A abertura da válvula controle de vazão determina a taxa de desaceleração.

Na direção inversa, o fluxo passa pela linha de desvio (“bypass”) da válvula de controle de vazão, onde está a válvula de retenção ligada ao cilindro. Como regra geral, os amortecedores são colocados em cilindros cuja velocidade da haste exceda a 600 cm/min.

4.9 Estilo de Montagem do Cilindro

Os cilindros podem ser montados de várias formas ou estilos, entre os quais estão as montagens por flange, por munhão, por sapatas (orelhas) laterais, montagem por base, etc. A montagem interna dos cilindros e a sua forma de fixação estão além dos objetivos desta apostila.

4.10 Tipos de Cargas de Cilindro

Dependendo de como eles são conectados às montagens mecânicas, os cilindros (pistões) podem propiciar muitas opções de movimentos mecânicos. Os pistões podem ser usados em um número limitado de aplicações para mover tipos diferentes de carga. Dependendo do modo como estão ligadas à carga, as operações recebem designações diferentes. Uma carga que é empurrada pelo pistão recebe o nome de carga de compressão. A carga que está sendo puxada recebe o nome de carga de tração. Essa denominação é mostrada na figura 88.

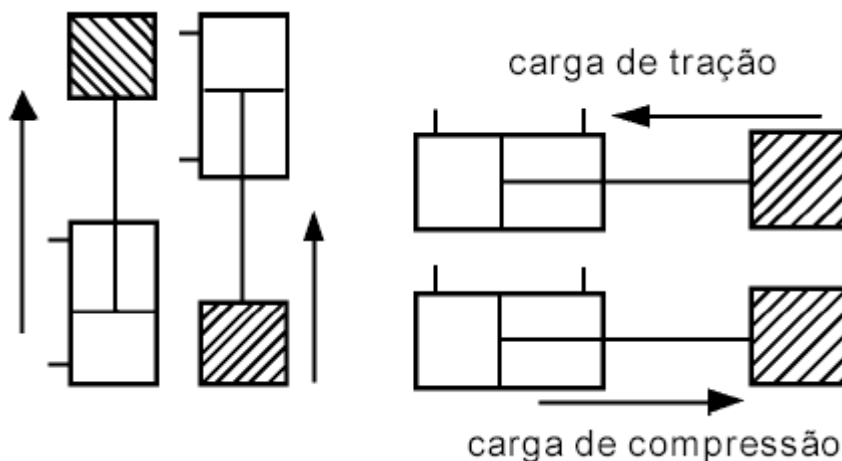


Figura 88 - Tipos de Cargas de Cilindro

4.11 Tubo de Parada

O tubo de parada (ou limitador de curso) é um colar sólido de metal que se fixa sobre a haste do pistão. O tubo de parada conserva separados o pistão e a guarnição da haste no mancal, quando a haste de um cilindro de curso longo está totalmente estendida. Uma vez que a guarnição é um mancal, ela é projetada para suportar alguma carga enquanto suporta a haste no seu movimento de avanço e de retração.

Complementando a função de mancal, a guarnição, juntamente com o mancal, é o ponto de apoio para a haste. Se a carga ligada à ponta de um pistão de grande curso não for guiada rigidamente, então, em condição de avanço total, a haste se apoiará no mancal, desenvolvendo uma carga excessiva sobre este. O tubo de parada protege a guarnição pela ancoragem da carga em um ponto mais distante do mancal, conforme mostrado na figura 89. As hastes muito pesadas dos cilindros de grande curso flexionam apenas com o seu próprio peso.

A haste de um pistão com 1,6 cm de diâmetro, pesando 1,6 kg por metro de extensão, flexiona 2,5 cm em um vão de 3 metros. Em cursos muito grandes de cilindros montados na horizontal, a aplicação dos limitadores reduz a carga nas guarnições. .

A maioria dos cilindros não necessita de tubo de parada. Para se determinar quando um tubo de parada é necessário, ou qual o comprimento que um tubo de parada deve ter, deve-se consultar o catálogo do fabricante.

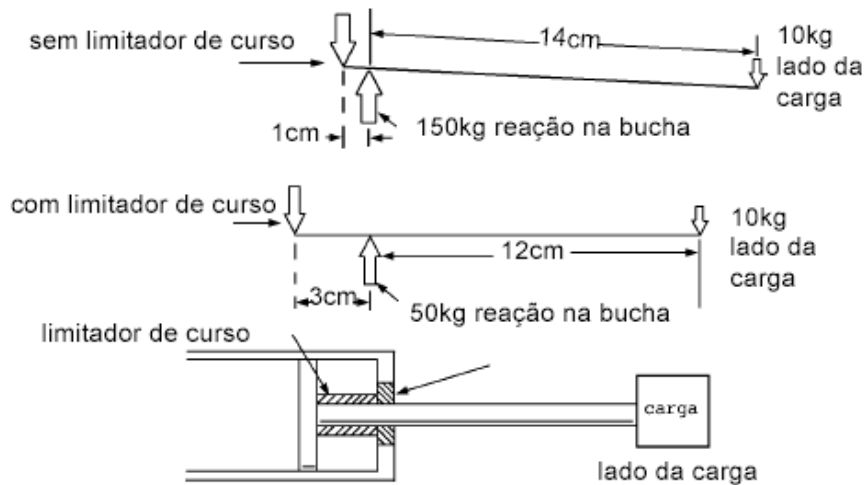


Figura 89 – Exemplos de tubos de parada.

4.12 Tipos de Cilindros Hidráulicos

A seguir são descritos os tipos mais comuns de cilindros hidráulicos

- **Cilindros de ação simples**

O atuador linear mais simples é o cilindro de simples ação, que aplica força em apenas uma direção (figura 90). O fluido penetra no cilindro através de um orifício apenas e desloca o pistão atuador, forçando-o para fora, desenvolvendo a força necessária para movimentar o mecanismo acionador. Neste caso, não há previsão para retração por força hidráulica da haste.

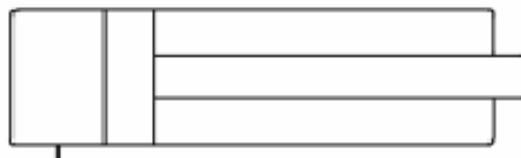


Figura 90 – cilindro de simples ação

- **Cilindro com retorno com mola**

Este atuador é composto por um cilindro no qual uma mola recua o conjunto do pistão, como esquematizado na figura 91.

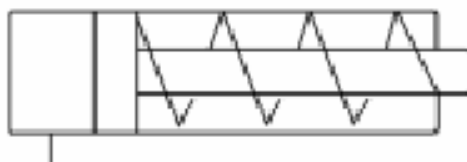


Figura 91 – Cilindro com retorno com mola

- **Cilindro martelo**

Este atuador é composto por um cilindro no qual o elemento móvel tem a mesma área da haste do pistão, como esquematizado na figura 92.

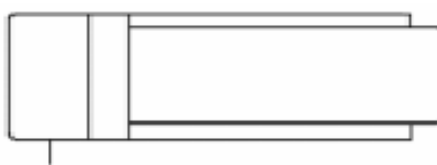


Figura 92 – Cilindro martelo

- **Cilindro de dupla ação**

Este atuador é composto por um cilindro no qual a pressão do fluido é aplicada ao elemento móvel em qualquer uma das direções.

O cilindro de ação dupla é também chamado de diferencial por ter uma área maior do lado sem haste. Quando a pressão é aplicada na área maior, seu movimento é mais lento por consumir maior volume de óleo, porém desenvolve maior força. A pressão em sentido contrário movimenta-o com maior velocidade, devido à área menor de atuação do óleo no pistão, entretanto desenvolve menor força.

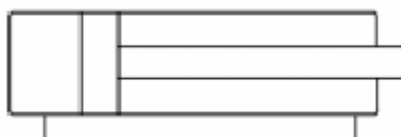


Figura 93 – Cilindro de dupla ação.

- **Cilindro de haste dupla**

Este atuador é composto por um cilindro com um pistão simples e uma haste ligada a cada lado. Este atuador exerce forças iguais nos dois sentidos, pois as duas áreas de atuação são iguais às áreas menores.



Figura 94 – Cilindro de haste dupla.

- **Cilindro telescópico ou de múltiplo estágio**

Este atuador é composto por um cilindro com arranjo multi-tubular da haste, que provê um curso longo com uma camisa curta na retração (figura 95).



Figura 95 – Cilindro telescópico ou de múltiplo estágio

- **Cilindro duplex contínuo ou cilindro Tandem**

Este atuador consiste de dois ou mais cilindros montados em linha com pistões interligados por uma haste comum (figura 96). As guarnições são montadas entre os cilindros para permitir a ação dupla de operação de cada cilindro. Um cilindro Tandem fornece uma força resultante maior quando o diâmetro do pistão é limitado, mas o seu curso não é.

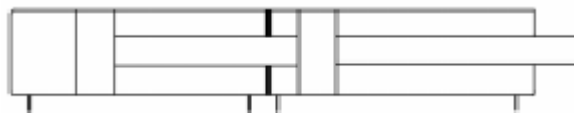


Figura 96 – Cilindro duplex contínuo ou cilindro Tandem.

- **Cilindro duplex**

O cilindro duplex consiste de dois cilindros montados em linha e com hastes múltiplas (uma para cada cilindro). As guarnições são montadas entre os cilindros para permitir dupla ação de cada cilindro. Os cilindros duplex podem, por exemplo, ser utilizados na abertura de portas e aplicação de força lateral igual.



Figura 97 – Cilindro duplex

4.13 Atuadores Rotativos

Os atuadores rotativos são mecanismos compactos, simples e eficientes. Eles produzem um torque alto e requerem pouco espaço e montagem simples.

De um modo geral aplicam-se atuadores em indexação de ferramental de máquina, operações de dobragem, levantamento ou rotação de objetos pesados, funções de dobragem, posicionamento, dispositivos de usinagem, atuadores de leme, etc.

Em geral, são utilizados para: manuseio de material, máquina-ferramenta, maquinaria de borracha e plástico, equipamento móbil, robótica, empacotamento, comutação de válvula, entre outras aplicações.

4.13.1 Osciladores Hidráulicos

O oscilador hidráulico é um atuador rotativo com campo de giro limitado. Converte energia hidráulica em movimento rotativo, girando um número de graus pré-determinado.

Um tipo muito comum de atuador rotativo é chamado de atuador de cremalheira e pinhão (figura 98). Esse tipo de atuador rotativo fornece um torque uniforme em ambas as direções e através de todo o campo de rotação. Nesse mecanismo, a pressão do fluido aciona um pistão que está ligado à cremalheira que gira o pinhão.

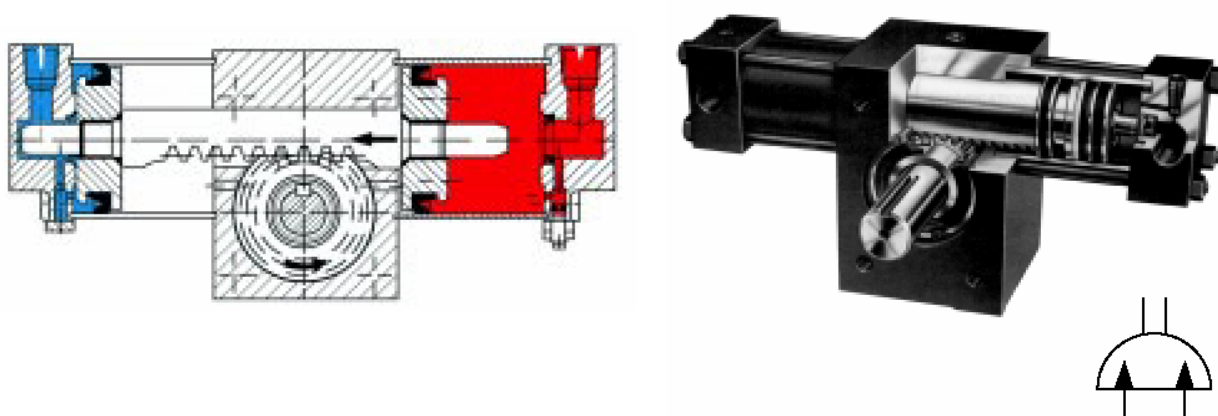


Figura 98 - Exemplo de Oscilador Hidráulico.

Unidades de cremalheira e pinhão do tipo Standard (padronizadas) podem ser encontradas em rotações de 90, 180, 360 graus ou mais. As variações dos atuadores de cremalheira e pinhão podem produzir unidades com saídas de torque de até 60×10^5 N.m.

4.13.2 Oscilador de Palheta

Estes modelos de osciladores são providos de máximo valor de saída de torque para um tamanho reduzido. Existem dois tipos de osciladores de palheta: palheta simples e palheta dupla. Utilizados para uma grande variedade de aplicações industriais, são disponíveis em modelo de palheta simples, com ângulo de rotação máxima de 280°. A unidade de palheta dupla produz em dobro o torque de saída para uma mesma dimensão de carcaça e tem um giro máximo limitado a 100°.

4.13.3 Motores Hidráulicos

Os motores hidráulicos transformam a energia de trabalho hidráulico em energia mecânica rotativa, que é aplicada ao objeto resistivo por meio de um eixo. Os motores hidráulicos trabalham no princípio inverso das Bombas Hidráulicas.

Todos os motores consistem basicamente de uma carcaça com conexões de entrada e saída e de um conjunto rotativo ligado a um eixo. O conjunto rotativo, no caso particular do motor tipo palheta ilustrado na figura 100, consiste de um rotor e de palhetas que podem deslocar-se para dentro e para fora nos alojamentos das palhetas.

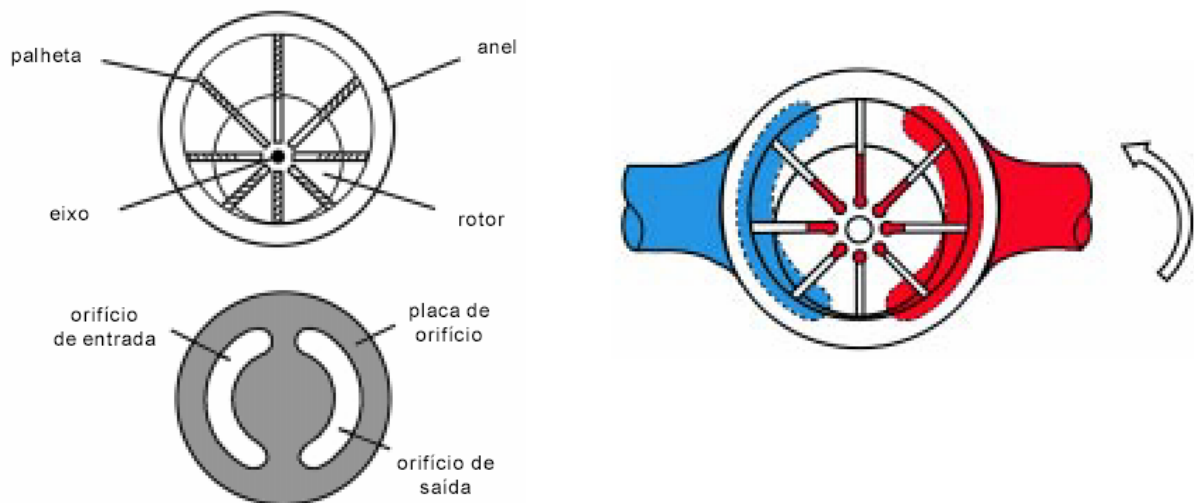


Figura 99 - Motor tipo palheta.

- **Funcionamento dos motores hidráulicos**

O rotor do motor é montado em um centro que está deslocado do centro da carcaça. O eixo do rotor está ligado a um objeto que oferece resistência. Conforme o fluido entra pela conexão de entrada, a energia de trabalho hidráulica atua em qualquer parte da palheta exposta no lado da entrada. Uma vez que a palheta superior tem maior área exposta à pressão, a força do rotor fica desbalanceada e o rotor gira. Conforme o líquido alcança a conexão de saída, é recolocado para suprir a diminuição do volume.

Importante se faz salientar que antes que um motor deste tipo possa operar, as palhetas devem ser estendidas previamente e uma vedação positiva deve existir entre as palhetas e a carcaça.

- **Extensão das Palhetas do Motor**

Conforme dito, antes que um motor de palheta entre em operação, as suas palhetas devem ser estendidas. Diferentemente de uma bomba de palhetas, não se pode depender da força centrífuga para estender as palhetas e criar uma vedação positiva entre o cilindro e o topo da palheta. Outro meio deve ser encontrado para isto.

Existem dois métodos comuns para estender as palhetas num motor. Um deles é estender as palhetas por meio de molas, de modo que elas permaneçam continuamente estendidas. O outro método é o de dirigir pressão hidráulica para o lado inferior das palhetas.

Em alguns motores de palhetas, o carregamento por mola é realizado posicionando-se uma mola espiral na ranhura da palheta como mostra a figura 101 (a).

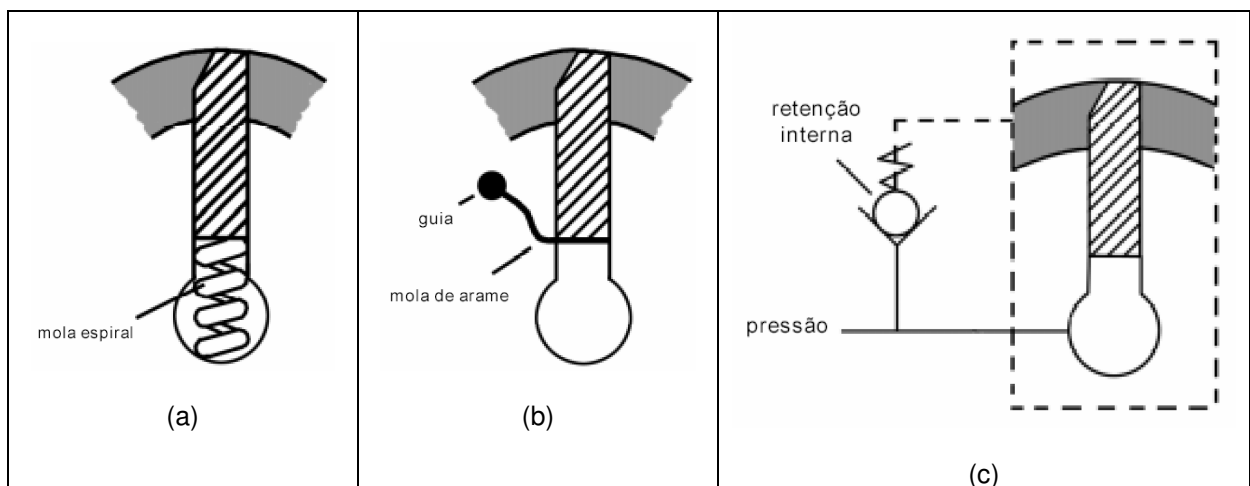


Figura 100 - Exemplos de mecanismos para extensão das Palhetas do Motor

Outra maneira de estender uma palheta é usando-se uma pequena mola de arame como mostrado na figura 101 (b). A mola é presa a um guia e se movimenta com a palheta enquanto esta

se movimenta para dentro e para fora da ranhura. Em ambos os tipos de carregamento por mola, a pressão do fluido é dirigida para o lado inferior da palheta tão logo o torque se desenvolva.

Outro método de estender as palhetas do motor é com o uso da pressão do fluido, como ilustrado na figura 101 (c). Por este método, o fluido é impedido de entrar na ranhura da palheta até que a mesma esteja totalmente estendida e até que haja uma vedação positiva no topo da palheta. Neste momento, a pressão já existe sob a palheta. Quando a pressão do fluido é suficientemente alta para vencer a força da mola de retenção interna, o fluido entrará na câmara da palheta e desenvolverá um torque no eixo do motor.

4.14 Motores de Engrenagem

Um motor de engrenagens (figura 102) desenvolve torque devido à pressão aplicada nas superfícies dos dentes das engrenagens. Elas giram juntas, sendo que apenas uma delas está ligada ao eixo do motor. Inverte-se a rotação do motor invertendo-se a direção do fluxo.

O deslocamento de um motor de engrenagens é fixo e é igual ao volume entre dois dentes multiplicados pelo número de dentes. É evidente, conforme a figura 102, que as engrenagens não são balanceadas hidraulicamente em relação a pressão.

A alta pressão na entrada e a baixa pressão na saída provocam altas cargas laterais no eixo, bem como nas engrenagens e nos rolamentos que as suportam. É possível balancear esta carga lateral abrindo-se passagens internas as quais distribuem pressões correspondentes a 180° da carga lateral. Este tipo de balanceamento é encontrado mais frequentemente em motores de palhetas.

Os motores de engrenagens são frequentemente limitados a pressões de operação de até 140 kg/cm² e a rotações máximas de 2400 rpm.

O motor de engrenagem tem como vantagens principais sua simplicidade e sua maior tolerância à sujeira; entretanto, tem menor eficiência. Atualmente, os motores hidráulicos de pistões são os mais utilizados na maquinaria e em equipamentos móvel, em decorrência das exigências de rendimento e da exigência de equipamentos mais sofisticados de filtragem.

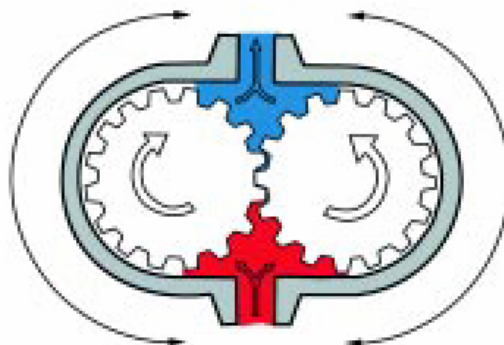


Figura 101 – Esquema para o Motor de Engrenagem.

4.15 Motor Tipo Gerotor

São motores de baixa velocidade e alto torque. Utilizam internamente o conceito de rotor gerotor, com vantagens construtivas. O rotor, elemento de potência não orbita, somente gira. Esta função é executada pelo anel externo, que orbita. Este é feito de uma única peça.

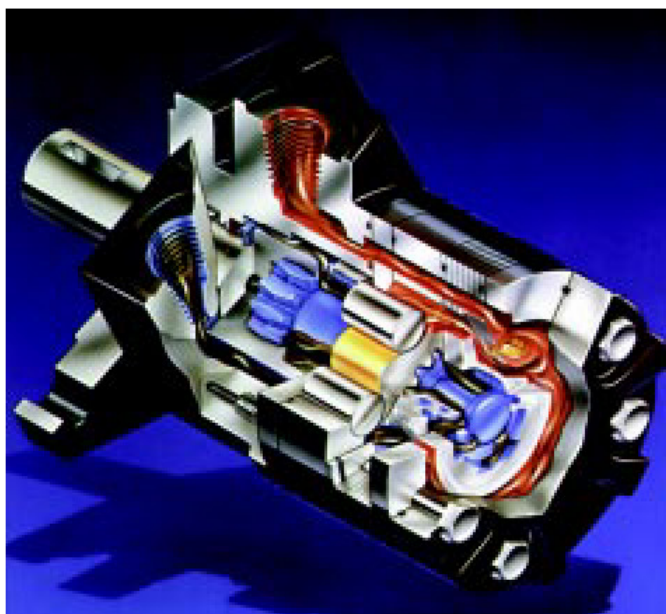


Figura 102 - Motor tipo gerotor.

O engrenamento complexo é mantido entre o eixo e o rotor, desde que não haja movimento relativo entre eles.

Rolos que vedam os compartimentos no elemento de potência são ajustados entre o rotor e o anel externo, como ilustrado na figura 102. Quando selam os compartimentos de alta e baixa pressão, eles agem de maneira similar a uma válvula de retenção.

Quanto maior a pressão, maior a vedação. Como o rolo está livre para assumir qualquer posição no sistema, ainda se alguma mudança devida ao dimensional ocorrer no rotor, a vedação entre o compartimento de alta e baixa pressão não será afetada.

Nestes motores, rolos auto-vedados garantem elevada eficiência volumétrica, resultando em menor geração de calor, menos potência perdida, particularmente em altas pressões e fluidos de baixa viscosidade.

A construção sólida do eixo com engrenamento eixo rotor causa um reduzido efeito de fadiga superficial nos componentes, devido ao contato entre eles. O resultado é um motor capaz de resistir às mais severas aplicações, incluindo altas cargas de choque e rápidas reversões.

O projeto de eixo motor em uma única peça permite que este seja prolongado através da tampa traseira para montagem de um freio, encoder ou drive auxiliar.

4.16 Motores de Pistão

Os motores de pistões geram o torque através da pressão nas extremidades dos pistões, que possuem movimento alternado num bloco de cilindros. No modelo descrito na figura 103, o eixo do motor e o bloco de cilindros estão no mesmo eixo de rotação. A pressão nas extremidades dos pistões causa uma reação contra uma placa inclinada girando o bloco do cilindro e o eixo.

O torque é proporcional à área dos pistões e ao mesmo tempo, é função do ângulo da placa inclinada.

Esses motores podem ser de deslocamento fixo ou de deslocamento variável. O ângulo da placa é que determina o deslocamento.

Em um motor de deslocamento variável, a placa está montada num balancim, e o ângulo pode ser variado por uma alavanca simples, por um volante giratório e até por um sofisticado servocontrole. Aumentando-se o ângulo da placa, aumenta-se a capacidade de torque, porém isso reduz a velocidade de giro. Inversamente, reduzindo-se o ângulo, reduz-se a capacidade do torque, porém, aumenta-se a velocidade de giro. Há batentes para um ângulo mínimo da placa para que o torque e a velocidade fiquem dentro dos limites de operação.

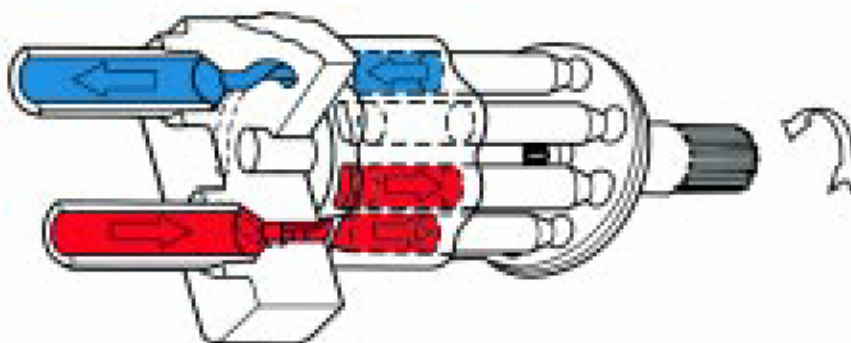


Figura 103 - Detalhe construtivo de motor de pistão.

4.17 Considerações finais sobre Atuadores Hidráulicos

A velocidade do atuador é função da vazão. A velocidade com a qual a haste de um pistão trabalha é determinada pela vazão de alimentação do volume desenvolvido pela bomba ao pistão.

A velocidade a qual o eixo de um motor hidráulico gira é dependente da vazão (litro/min) da bomba. A força de ação do atuador é uma função da pressão.

A força na saída do atuador, desenvolvida pelo cilindro, é uma função da pressão hidráulica agindo sobre a área do pistão.

A força de ação do eixo de um motor hidráulico é determinada pela quantidade de pressão hidráulica atuando na área exposta do conjunto rotativo do motor.

A potência desenvolvida por um atuador é uma função da velocidade do atuador multiplicada pela força na saída do atuador.

Para um cilindro, a pressão na saída é expressa por kgf/cm^2 . A velocidade da haste é indicada por cm/min .

4.18 Questionário sobre atuadores hidráulicos

1. Descrever as características de cilindros de simples e de duplos efeitos.
2. Com uma vazão de 12 litros por minuto dirigida ao lado da cabeça de um cilindro de 5 cm de diâmetro, qual seria a velocidade de um êmbolo?
3. Um cilindro de 7,5cm de diâmetro pode operar até 140 kg/cm^2 de pressão. Qual é a força na saída?
4. Qual a pressão necessária para se exercer uma força de 7.000 kgf ($\sim 70 \text{ kN}$), se a área efetiva do cilindro for de 50 cm^2 ?
5. Definir deslocamento e torque de um motor hidráulico.
6. Um guincho necessita de um torque máximo de 50 kg.m para operar. Qual seria o tamanho do motor hidráulico se a pressão máxima tem que ser limitada 10 kg/cm^2 ?
7. Um motor de 20 kg.m a 7 atm opera com um torque de 500 kg.m . Qual é a pressão da operação?
8. Explicar como as palhetas são mantidas em contacto com o anel nos motores de palhetas, modelo quadrado.
9. Explicar como as palhetas são mantidas em contacto com o anel nos motores de palhetas de alto rendimento.
10. Num motor de pistões de linha, como é que se desenvolve o torque?.
11. Qual é o efeito de um aumento de carga num motor hidráulico com compensador de pressão?
12. Que tipo de motor hidráulico é o mais eficiente?

BIBLIOGRAFIA

Norma Técnica DIN / ISO 1219 e 5599.

Norma Técnica VDI 3260, edição 1977.

Normas Técnicas DIN 24.300 / ISO 559911.

Norma Técnica ISO 8573

ADKINS, B., **General Theory of Electrical Machines**. London: Ed. London Chapman & Hall, 1964.

SLEMON, G. R., **Magnetolectric Devices, Tranducers, Transformers and Machines**. New York: John Wiley, 1966.

FITZGERALD, A. F., KINGSLEY, C., **The Dynamics and Statics of Electric Energy Conversion**. London: London MacDonald Tech & Sc., 1992.

ESPOSITO, A. **Fluid Power with Applications**. 3a ed. New Jersey: Prentice-Hall International, 1994.

PARKER TRAINING **Tecnologia Hidráulica Industrial**, Apostila M2001-1BR, São Paulo: Parker Hannifin Corporation, 1999.

PARKER TRAINING **Tecnologia Pneumática Industrial**, Apostila M1001BR, São Paulo: Parker Hannifin Corporation, 2000.

PARKER TRAINING **Tecnologia Eletropneumática Industrial**, Apostila M1002-2BR, São Paulo: Parker Hannifin Corporation, 2001.

HASEBRINK, J.P., KOBLER, R. **Técnicas de Comandos: Fundamentos de Pneumática e Eletropneumática**. São Paulo: Festo - Máquinas e Equipamentos Pneumáticos Ltda, 1975.

C. KINGSLEY JR. E A. KUSKO A. E. FITZGERALD. **Máquinas Elétricas**. McGraw-Hill do Brasil, 1971.

MEIXNER, H., KOBLER, R. **Introdução à Pneumática**. São Paulo: Festo - Máquinas e Equipamentos Pneumáticos Ltda, 1978.

PALMIERI, A.C. **Manual de Hidráulica Básica - Racine Hidráulica**. 4a ed., Porto Alegre, 1983.

PALMIERI, A.C. **Sistemas hidráulicos industriais e móveis: Operação, manutenção e projeto**. São Paulo: Editora Nobel, 1989.

STEWART, H. L. **Pneumática e Hidráulica**. São Paulo: Hemus Livraria e Editora Ltda, 1981.