

Notas de Aula de SEM0540
Elementos de Automação

Prof. Dr. Thiago Boaventura Cunha
Kevin Borges de Souza Okamura
Departamento de Engenharia Mecânica
EESC - USP

Junho de 2018

Resumo

Este documento tem o intuito de aglomerar os conteúdos abordados em sala de aula e que estão presentes, de forma dispersa, em diversas fontes bibliográficas, para facilitar o acesso de forma única e direcionada aos alunos matriculados na disciplina de Elementos de Automação (SEM0540). Os tópicos abordados são: hidráulica, pneumática, controlador lógico programável (CLP), mecânica e elétrica, todos com ênfase no conteúdo abordado em sala de aula.

Lista de Figuras

1.1	Formalismo na automação. (4)	11
1.2	Anatomia mecânica dos robôs. (Fonte: RRRobotica)	13
1.3	Tipos de juntas	14
1.4	Manipulador Cartesiano (LLL): (a) desenho esquemático; (b) desenho esquemático (grantry); (c) Armazenador automático com manipulador cartesiano (Festo)	14
1.5	Manipulador Cilíndrico (RLL): (a) desenho esquemático; (b) Robô com configuração cilíndrica	15
1.6	Manipulador Esférico (RRL): (a) desenho esquemático; (b) Robô polar industrial	15
1.7	Manipulador SCARA (RRL): (a) desenho esquemático; (b) Robô com configuração SCARA (Toshiba)	16
1.8	Manipulador Antropomórfico (RRR): (a) desenho esquemático; (b) Robô KUKA	16
1.9	Manipulador Paralelo: (a) desenho esquemático; (b) Robô Flex-Picker para alimentos e bebidas (ABB)	17
1.10	Ilustração esquemática do princípio de superposição.	17
1.11	Exemplo gráfico do princípio da superposição.	17
1.12	Gráfico exemplificativo de uma função escrita como a soma de funções impulsos.	18
1.13	Exemplo gráfico da integral de convolução.	18
1.14	Apresentação do s no domínio da frequência e na transformada de Laplace.	19
1.15	Comparação gráfica entre o polo de uma função transferência e o polo de um circo.	20
1.16	Modelo gráfico de um zero numa Função Transferência.	20
1.17	Representação gráfica de um degrau unitário.	21
1.18	Representação gráfica de um impulso unitário.	21
1.19	Representação gráfica de uma rampa unitária.	22
1.20	Representação gráfica de um sinusóide.	22
1.21	Exemplo de sistema de primeira ordem e a aplicação da transformada de Laplace.	23
1.22	Transformação inversa da equação de primeira ordem sob o efeito dos polos.	23

1.23	Representação de alguns valores de σ no plano $Re \times Im$, com enfoque para os efeitos do módulo deste sob a rapidez do decaimento exponencial.	23
1.24	Gráfico no domínio do tempo, apresentado o decaimento exponencial para alguns valores de σ	24
1.25	Gráfico para um sistema de primeira ordem com enfoque para a constante de tempo τ	24
1.26	Gráfico de $Amplitude \times Tempo$ para $\sigma = 1$ e $\sigma = -1$	25
1.27	Exemplo matemático de sistema de segunda ordem e sua respectiva transformada de Laplace.	25
1.28	Gráfico no plano $Re \times Im$ com enfoque para pólos padrão de sistema de segunda ordem.	25
1.29	Desenvolvimento matemático dos polos para sistema de segunda ordem.	26
1.30	Transformada inversa de um sistema de segunda ordem aplicando-se os polos.	26
1.31	Decaimento exponencial da função conforme varia-se o valor do polo σ	26
1.32	Estabilidade de sistemas de segunda ordem conforme varia-se o sinal do polo σ	27
1.33	Estabilidade em vários sistemas de segunda ordem.	27
1.34	Enunciado matemático do Teorema do valor Final.	28
1.35	Enunciado matemático do Teorema do valor Inicial.	28
1.36	Blocos funcionais para um sistema de primeira ordem submetido a uma entrada rampa.	28
1.37	Resposta de sistema de primeira ordem para entrada degrau, no domínio do tempo.	29
1.38	Gráfico da resposta de sistema de primeira ordem para entrada degrau, no domínio do tempo $ \tau $	29
1.39	Bloco funcional de sistema de segunda ordem sujeito a entrada degrau.	29
1.40	Resposta no domínio do tempo de sistema de segunda ordem sujeito a entrada degrau.	30
1.41	Comportamento do amortecimento em sistema de segunda ordem.	30
1.42	Gráfico do comportamento do amortecimento em sistema de segunda ordem.	31
1.43	Função transferência de segunda ordem.	31
1.44	Gráfico corresponde à função transferência de segunda ordem, variando-se o valor de α . Observe que quando maior o valor de α , maior é o amortecimento do sistema.	32
2.1	Aplicação do Princípio de Pascal em Prensas Hidráulicas.	34
2.2	Circuito hidráulico básico. (7)	36

2.3	(a) Simbologia de válvula limitadora de pressão; (b) Simbologia de bomba hidráulica; (c) Simbologia de filtro hidráulico; (d) Simbologia de reservatório hidráulico; (e) Simbologia de motor elétrico.	37
2.4	Esquemático do número de posições para válvulas direcionais. . .	37
2.5	Esquemático do número de vias para válvulas direcionais.	38
2.6	Esquemático dos tipos de vias para válvulas direcionais.	38
2.7	Tipos de acionamentos. Da esquerda para a direita, respectivamente: botão, alavanca, sensor de fim de curso, hidráulico e solenóide.	38
2.8	Simbologia de válvula de retenção. O sentido que flui é da posição 1 para a posição 2 (e de 2 para 1 não é permitido o fluxo).	39
2.9	Da esquerda para a direita: simbologia de válvula controladora de vazão variável e simbologia de válvula controladora de vazão variável com retenção integrada.	39
2.10	Simbologia de cilindros hidráulicos de simples ação. Da esquerda para a direita, respectivamente: cilindro hidráulico sem retorno por mola e com retorno por mola.	40
2.11	Simbologia de cilindro hidráulico de dupla ação.	40
2.12	Da esquerda para a direita, respectivamente: simbologia de oscilador hidráulico e simbologia de motor hidráulico.	40
2.13	Diagrama elétrico com enfoque para as linhas de alimentação, com identificação em vermelho.	42
2.14	Válvula direcional acionada por solenóide. Observe que o solenóide fica representado como uma caixa nas laterais das válvulas e quando ela é acionada, a posição assumida é a mesma em que esse se encontra.	42
2.15	Simbologia de solenóide/bobina nos diagramas elétricos	42
2.16	Simbologia de NA nos diagramas elétricos	42
2.17	Simbologia de NF nos diagramas elétricos	43
2.18	Deformação ocorrida entre duas placas com movimento relativo em meio fluido (SHAMES, 1973)	44
2.19	Classificação ISO. Todas as viscosidades a 40°C (7)	45
2.20	Esquema hidráulico da válvula apresentando as três posições da válvula e suas quatro portas <i>a</i> , <i>b</i> , <i>s</i> , e <i>t</i>	47
2.21	Diferentes tamanhos de carretel. (a) O centro é dito subcrítico (sobreposição negativa) e, portanto, l_r menor que l_p . (b) O centro é dito crítico (sobreposição nula), ou seja, l_r igual a l_p . (c) O centro é dito supercrítico, isto é, l_r maior que l_p	48
2.22	(a) Imagens reais de cilindro simétrico e assimétrico; (b) Esquema hidráulico que representa, respectivamente, cada um desses cilindros.	50

2.23	Esquema hidráulico do sistema de atuação por cilindro hidráulico. A válvula escolhe a direção e a magnitude das vazões de ambas câmaras q_a e q_b . Essas vazões mudam as pressões p_a e p_b dentro das câmaras de cilindros assimétricos e, conseqüentemente, a força f que é transmitida para a carga, que leva em consideração o atrito to cilindro B . A carga, representada pelo bloco na ponta da haste, é simplificada neste esquema por uma carga inercial com massa constante M_t e atrito B_t	51
2.24	Curva teórica típica para atrito em atuadores hidráulicos ou Curva de Stribeck. A linha continua azul indica a força de atrito total f_f sendo, portanto, a soma das outras três curvas presentes. A linha preta tracejada representa o atrito de Coulomb constante para $F_{c0} = 100N$; a linha rosa pontilhada indica a força de atrito estático com $F_{s0} = 100N$ e $C_s = 0,02$; e a linha vermelha tracejada indica o atrito viscoso variando linearmente considerando $B = 1000Ns/m$	53
2.25	Diagrama de blocos da dinâmica da força hidráulica. A carga, representada pelo bloco azul, foi modelado como uma massa constante M_l . O atrito do cilindro B foi adicionado à carga de atrito B_l desde a haste pode ser considerado parte da carga quando um força hidráulica f_h é aplicada.	57
2.26	Diagrama de blocos para a força de carga linearizada.	58
3.1	Curva de escoamento em válvulas pneumáticas. A linha puramente em negrito indica o comportamento real do escoamento, a linha mais fina indica o comportamento teórico e a linha riscada em negrito indica ambos comportamentos.	61
3.2	Curva de escoamento em válvulas pneumáticas, com foco nas diferenças de pressões entre entrada e saída destas.	62
3.3	Esquematização da Produção, Armazenamento e Condicionamento do Ar Comprimido. (8)	63
3.4	Unidade de Condicionamento ou Lubrefil (8)	63
3.5	Simbologia da unidade de condicionamento (8)	63
3.6	Tabela de identificação dos orifícios de uma válvula direcional (8)	64
3.7	Válvula direcional comumente utilizada em circuitos pneumáticos.	64
3.8	Válvula auxiliar com sensores de fim de curso. (8)	64
3.9	Válvula de Retenção com Mola, à qual permite a passagem de fluxo em apenas um único sentido. (8)	64
3.10	Válvula de Isolamento (Elemento OU), permitindo a passagem de fluxo de ambas os sinais "1" provindo, preferencialmente, do primeiro sinal a atingir a válvula. (8)	65
3.11	Válvula de Simultaneidade (Elemento E), permitindo a passagem de fluxo pela porta "2" apenas quando as duas portas "2" estarem pressurizadas. (8)	65

3.12	Válvula de Controle de Fluxo, sendo responsável pela diminuição da quantidade de ar que passa através de uma tubulação que, conseqüentemente, afeta a velocidade de um cilindro, por exemplo. (8)	65
3.13	Diagrama trajeto-passo com foco na sua estrutura. (8)	66
3.14	Diagrama trajeto-passo para dois cilindros em sequência direta. (8)	67
3.15	Diagrama trajeto-tempo para dois cilindros em sequência direta. (8)	67
3.16	Circuito pneumático com dois cilindros (1A e 2A) em sequência indireta, com foco no problema da contrapressão.	69
3.17	Diagrama trajeto-passo para o caso de dois cilindros em sequência direta.	70
3.18	Divisão da sequência em grupos de movimento. Percebe-se que, para este caso, formou-se 4 grupos.	71
3.19	Divisão da sequência em grupos de movimento para o caso de três atuadores. Percebe-se que, como o último grupo contém apenas um elemento e o primeiro grupo não possui nenhum movimento referente ao cilindro 3, pode-se eventualmente unir o último ao primeiro grupo	71
3.20	Válvula de memória padrão utilizado em circuitos pneumáticos. .	71
3.21	Situação de 2 linhas de pressão e 1 válvula de memória, para o caso de 2 grupos.	72
3.22	Situação de 3 linhas de pressão e 2 válvula de memória, para o caso de 3 grupos.	72
3.23	Situação de 4 linhas de pressão e 3 válvula de memória, para o caso de 4 grupos.	72
4.1	Arquitetura básica do CLP (9)	74
4.2	Tabela de operadores e seus significados utilizados em Lista de instruções.	76
4.3	Exemplo de um programa feito em formato de Texto Estruturado. .	76
4.4	Exemplo de um programa feito em formato de Diagrama de Relés. .	77
4.5	Exemplo de um programa feito em formato de Diagrama de Bloco Funcionais.	77
4.6	Exemplo de um programa feito em formato de Funções Gráficas de Sequenciamento.	78
4.7	Estrutura básica de um Diagrama Ladder	79
4.8	Exemplo de analogia entre circuitos eletrohidráulicos e programa feito em Diagrama Ladder.	80
4.9	Principais funções lógicas dentro da álgebra booleana.	80
4.10	Lógica "E"	81
4.11	Lógica "OU"	82
4.12	Lógica "NÃO".	82
4.13	Propriedades 1, 2 e 3	83
4.14	Propriedades 4, 5 e 6	84

4.15	Exemplo de mapa de Karnaugh.	85
4.16	Exemplo de mapa de Karnaugh.	86
4.17	Exemplo de mapa de Karnaugh.	86
4.18	Ilustração da ideia proposta.	87
4.19	Diagrama de Estado do exemplo.	89
4.20	Tabela de transição de estados para o exemplo.	91
5.1	Eixos principais de aeronaves.	96
5.2	Eixos principais de aeronaves apresentados em uma aeronave. . .	96
5.3	Situações de pré-carga elástica.	97
5.4	Comparação entre rolamentos lineares (esquerda) e blocos lineares (direita), apresentando suas vantagens e desvantagens. . . .	99
5.5	Tipos de rolamentos circulares.	99
6.1	Visualização esquemática da Lei de Ámpere.	102
6.2	Escopo do experimento de Faraday.	102
6.3	Regra da mão esquerda para a Lei de Lorentz.	103
6.4	Exemplo esquemático de um motor DC Brushed.	103
6.5	Esquemático de funcionamento de um motor Brushless DC. . . .	104
6.6	Motor Brushless real.	104
6.7	Esquema de um motor de passo com quatro bobinas.	105
6.8	Esquema de um motor de passo atuando em meio-passo.	105
6.9	Esquemático de motor de indução.	106
6.10	Inversor de Frequências Weg CFW10.	106
6.11	ISimbologia de um fusível.	107
6.12	Modelo de Fusível real.	107
6.13	Classificação NBR IEC 60.269-1.	108
6.14	Exemplo de Relé de Proteção real.	108
6.15	Esquema interno de um relé de proteção.	109
6.16	Exemplo de Disjuntor real.	109
6.17	Esquemas de disjuntores.	110
6.18	Esquema funcional de um transdutor.	110
6.19	Comparação entre um sensor de força e um transdutor.	110
6.20	Esquema representativo de acurácia e precisão.	111
6.21	Esquema de um encoder incremental.	113
6.22	Análise de sinais dos diodos de um encoder incremental.	113
6.23	Esquema de um encoder absoluto.	113
6.24	Esquema de um resolver.	114
6.25	Esquema de um potenciômetro.	114
6.26	Arranjo físico de um termopar instalado.	115
6.27	Esquema de um extensômetro arranjado em um quarto de ponte. .	115
6.28	Esquema de ultrassom captando o objeto e enviando a informação para um microcontrolador.	115

Lista de Tabelas

2.1	Vantagens e desvantagens da Hidráulica.	33
2.2	Vantagens e desvantagens do uso da água como fluido para sistemas hidráulicos.	34
2.3	Vantagens e desvantagens do uso de óleo mineral como fluido para sistemas hidráulicos.	34
2.4	Expressões de potência para diversos tipos de sistemas.	35
4.1	Principais elementos do Diagrama Ladder	79
4.2	Lista de entradas e saídas para os semáforos do exemplo	88

Conteúdo

1	Introdução	11
1.1	História	12
1.2	Robótica	13
1.3	Resposta de sistemas	15
1.3.1	Princípios básicos e função de transferência	16
2	Hidráulica	33
2.1	Introdução a sistemas hidráulicos	33
2.2	Circuitos hidráulicos	35
2.2.1	Unidade de Potência	36
2.2.2	Válvulas	37
2.2.3	Válvulas de Controle Direcional (7)	37
2.2.4	Válvulas auxiliares	39
2.2.5	Atuadores hidráulicos	39
2.2.6	Exercícios sugeridos	41
2.3	Circuitos eletrohidráulicos	41
2.4	Modelagem de circuitos hidráulicos	43
2.4.1	Módulo de Compressibilidade	45
2.4.2	Bombas	46
2.4.3	Válvulas	47
2.4.4	Cilindros Assimétricos	49
2.4.5	Modelo linearizado de Atuadores Hidráulicos	54
3	Pneumática	59
3.1	Introdução a sistemas pneumáticos	59
3.2	Circuitos e Componentes	62
3.3	Métodos de projeto de circuitos pneumáticos	65
3.3.1	Diagramas de Movimento	66
3.3.2	Tipos de Sequência	66
3.3.3	Método Intuitivo	68
3.3.4	Método cascata	69
3.3.5	Circuitos Eletropneumáticos	71

4	CLP	73
4.1	Introdução ao CLP	73
4.2	Hardware	74
4.3	Linguagens de programação	75
4.3.1	Ladder Diagram	78
4.4	Álgebra Booleana	80
4.4.1	Propriedades de álgebra Booleana	82
4.4.2	Mapas de Karnaugh	85
4.5	Máquina de Estados Finitos	86
4.5.1	Exemplo de Sistema sequencial simples - controle de tráfego (9)	87
5	Mecânica	95
5.1	Dispositivos de movimentação linear e circular	95
5.1.1	Guiagem de Movimentos	95
5.1.2	Reduzir atrito	97
5.1.3	Suportar cargas	98
5.1.4	Guiagem de movimentos circulares	98
6	Elétrica	101
6.1	Motores elétricos	101
6.1.1	Princípios Físicos	101
6.1.2	Principais tipos de motores	102
6.1.3	Dispositivos de segurança/proteção	107
6.2	Sensores	109
6.2.1	Características principais	110
6.2.2	Classificação	111
6.2.3	Exemplos	112
A	Símbolos Gráficos e Diagramas de Circuitos para hidráulica e pneumática	116

Capítulo 1

Introdução

A palavra Automação vem do latim *Automatus*, que significa "mover-se por si". Corresponde a um sistema pelo qual os mecanismos controlam o seu próprio funcionamento, com a mínima interferência humana. Uma outra possível definição é: "Sistema automático de controle pelo qual os mecanismos verificam seu próprio funcionamento, efetuando medições e introduzindo correções, sem a necessidade da interferência do homem".

À fim de evitar confusão do termo "automação" com outros termos relacionados, como "mecanização", "inteligência artificial" e "robótica", utiliza-se de um formalismo para clarear a visão do conceito através de alguns exemplos simples. Então, conforme é mostrado na Figura 1.1 percebe-se que a Automação é composta por quatro elementos: a sua plataforma de processamento (i.e., máquina, ferramenta, sistema etc), seu nível de autonomia (i.e., quanto à organização, ao controle do processo, colaboração etc), seu processo (i.e., a ação, operação e/ou função a ser exercida) e sua fonte energética (i.e., energia elétrica, gravidade, vapor etc).

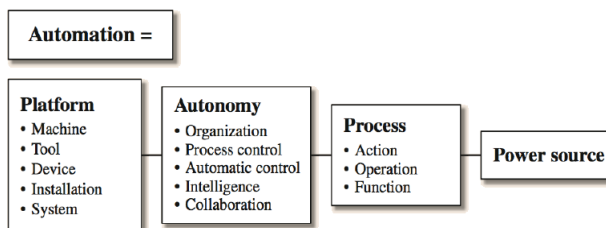


Figura 1.1: Formalismo na automação. (4)

À partir dos conceitos e das ideias apresentadas, traça-se os objetivos deste curso (SEM0540):

- 1 Conhecer os elementos básicos constituintes de um sistema de automação, isto é, **sensores**, **atuadores** e **controladores**;
- 2 Aprender os conceitos fundamentais de sistemas hidráulicos e pneumáticos (HeP);
- 3 Programar sistemas automatizados usando CLPs;
- 4 Aprender noções de mecânica e elétrica direcionadas aos propósitos de elementos de automação;

1.1 História

As primeiras Civilizações que surgiram na História se localizavam no Oriente Próximo (Oriente Médio e litoral do Mediterrâneo Oriental), pois ali, em meio a terras áridas e extensos desertos, era possível encontrar áreas extremamente férteis, especialmente às margens de grandes rios, como o Nilo, o Tigre, o Eufrates e o Jordão (**mesopotamia**).

Com a migração de diversas tribos para outras regiões do globo terrestre, a agricultura foi se aperfeiçoando e começaram a surgir os primeiros indícios de automação na História da humanidade: os canais de irrigação e aquedutos, que permitiam levar água de um lugar para outro pré-determinado.

Ainda próximo dessa época, nos próprios templos religiosos, os chefes implementavam um sistema movido a vapor/ar quente para que as portas de tais locais fossem abertos "automaticamente", de forma a trazer um aspecto mais "místico" à tal entidade. Na sequência, pode-se citar ainda os moinhos movidos à cata-ventos (para moer grãos) e válvulas de pressão automática controlados por *feedback* mecânico, cuja finalidade era retirar água do subsolo.

Posteriormente, com o advento da Revolução Industrial, por volta da década de 1760, houve um grande avanço na tecnologia até então rudimentar. Com ela, surgiram as máquinas a vapor, podendo citar barcos, trens e máquinas fabris. Logo depois, foram aparecendo as máquinas movidas à eletricidade e, de lá até então, a tecnologia tem crescido bruscamente com o desenvolvimento de sensores, controladores e atuadores modernos.

Atualmente, nos encontramos na era da Indústria 4.0, à qual conta com alguns elementos de automação mais modernos em conjunto com tecnologia que permite a troca de dados: Internet das Coisas (*IoT*), Sistemas Cyber-Físicos e Comunicação em Nuvem. Dentro deste momento, as tecnologias que mais se destacam são os robôs, os quais serão o foco dos nossos estudos adiante.

1.2 Robótica

Segundo *Robot Industries Association (RIA)*, pode-se definir robôs industriais como um “Manipulador multifuncional reprogramável projetado para mover materiais, partes, ferramentas, ou dispositivos especializados através de movimentos programados para a realização de uma variedade de tarefas”.

Como vantagens da robótica, dentre várias delas, quatro se destacam:

- 1 Precisão (isto é, a proximidade com que a ferramenta consegue repetir um processo/série definido/a);
- 2 Realização de processos repetitivos;
- 3 Elevada produtividade;
- 4 Consegue atuar em ambientes perigosos, evitando que o usuário se submeta a riscos;

Saber a classificação dos robôs e a sua estrutura anatômica são medidas importantes a serem tomadas para entender melhor o funcionamento dos robôs. Estes podem ser fixos ou móveis (através de rodas, esteiras, pernas ou ondulações) e sua anatomia é padrão para a grande parte dos robôs existentes. A Figura 1.2 apresenta esta estrutura padrão, onde os elos são equivalentes a braços e as juntas são os componentes que conectam os elos.

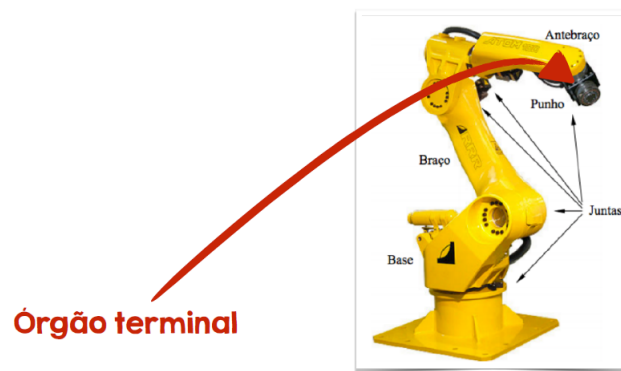


Figura 1.2: Anatomia mecânica dos robôs. (Fonte: RRRobotica)

Os graus de liberdades, isto é, a quantidade de movimentos relativos possíveis, variam de robô para robô, principalmente, por causa dos tipos de juntas presentes em sua anatomia. As juntas podem ser classificadas em:

- 1 **Prismática ou Linear (L):** Move em linha reta. São Compostas de duas hastes que deslizam entre si. Veja a Figura 1.3.

- 2 Torcional (T):** Os elos de entrada e de saída têm a mesma direção do eixo de rotação da junta. Veja a Figura 1.3.
- 3 Rotacional (R):** Os elos de entrada e de saída são perpendiculares ao eixo de rotação da junta. Veja a Figura 1.3.
- 4 Revolvente (V):** O elo de entrada possui a mesma direção do eixo de rotação, mas o elo de saída é perpendicular a este. Veja a Figura 1.3.

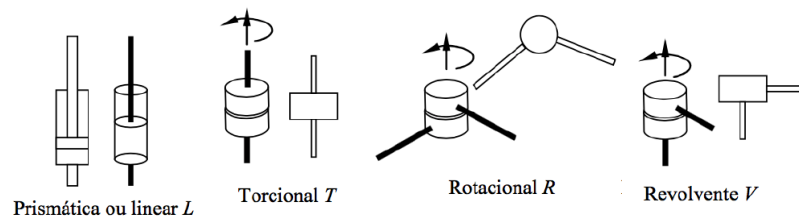


Figura 1.3: Tipos de juntas

À partir destas quatro juntas, pode-se fazer diversos tipos de configurações que proporcionaram ao robô certos graus de liberdades e certos tipos de movimentos. As configurações típicas e exemplos reais de robôs que apresentam tal configuração podem ser vistas nas Figuras 1.4 até 1.9:

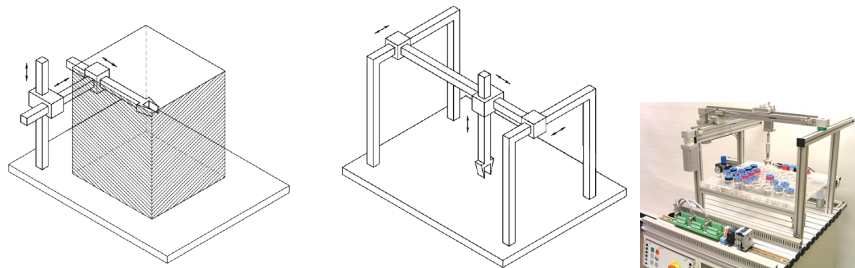


Figura 1.4: Manipulador Cartesiano (LLL): (a) desenho esquemático; (b) desenho esquemático (grantry); (c) Armazenador automático com manipulador cartesiano (Festo)

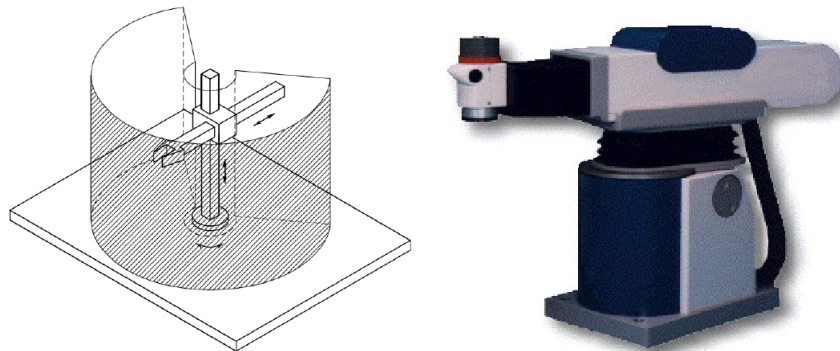


Figura 1.5: Manipulador Cilíndrico (RLL): (a) desenho esquemático; (b) Robô com configuração cilíndrica

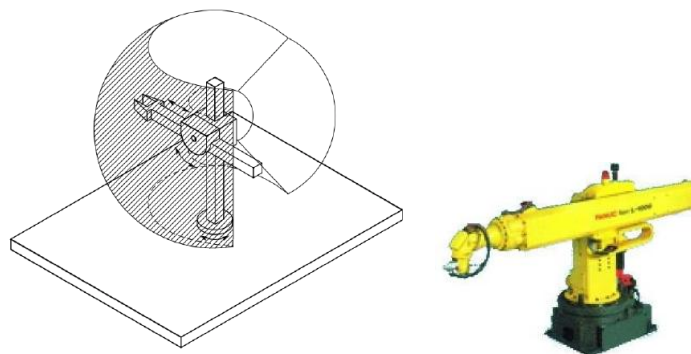


Figura 1.6: Manipulador Esférico (RRL): (a) desenho esquemático; (b) Robô polar industrial

1.3 Resposta de sistemas

Dentro da área de automação, assim como de qualquer outra área da ciência moderna, é preciso entender para construir e alterar. Caso contrário, acidentes podem vir a acontecer, colocando em risco vidas humanas, como é o caso da *Tacoma Narrows Bridge*, uma ponte à qual foi alvo de fortes rajadas de ventos e sofreu bruscas oscilações até romper.

Com este intuito, muitos meios de simulação e testes foram montados à fim de se estudar os fenômenos físicos e estruturais presentes na natureza. Pode-se citar: túnel de vento e softwares de simulação. E, na sequência, objetiva-se entender os fenômenos para poder controlá-los e moldar às necessidades humanas.

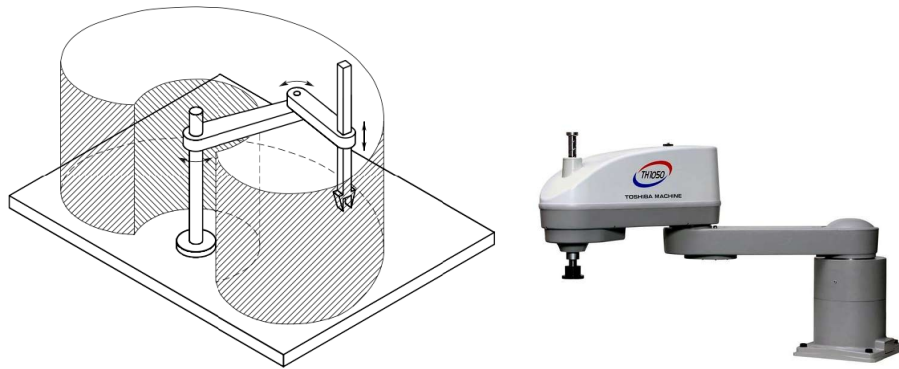


Figura 1.7: Manipulador SCARA (RRL): (a) desenho esquemático; (b) Robô com configuração SCARA (Toshiba)

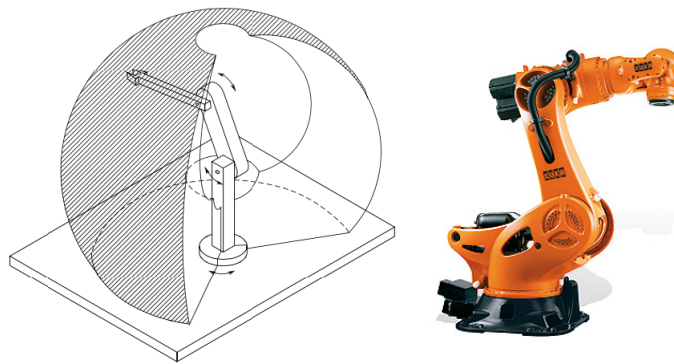


Figura 1.8: Manipulador Antropomórfico (RRR): (a) desenho esquemático; (b) Robô KUKA

1.3.1 Princípios básicos e função de transferência

O primeiro princípio a ser abordado aqui é o **Princípio da superposição**. É dito que "se uma entrada pode ser expressa por uma soma de sinais, então a resposta do sistema pode ser expressa pela soma das respostas individuais a cada um dos respectivos sinais".

A Figura 1.10 representa um esquemático do princípio da superposição e a Figura 1.11 mostra que a soma de três entradas degraus com módulos e sinais diferentes pode ser vista como um única entrada e a resposta do sistema linear pode ser vista também como um única, sendo esta a soma das respostas individuais à cada entrada.

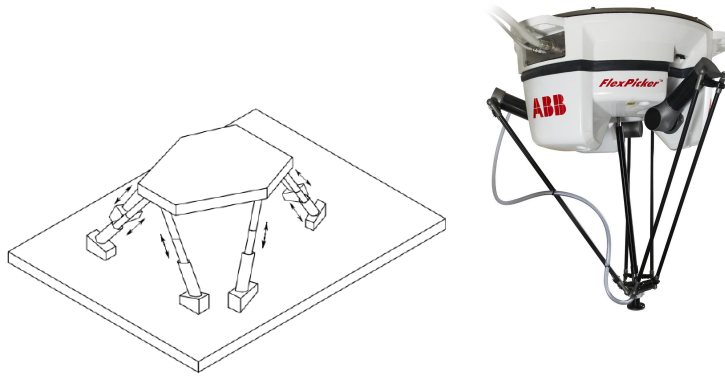


Figura 1.9: Manipulador Paralelo: (a) desenho esquemático; (b) Robô FlexPicker para alimentos e bebidas (ABB)



Figura 1.10: Ilustração esquemática do princípio de superposição.

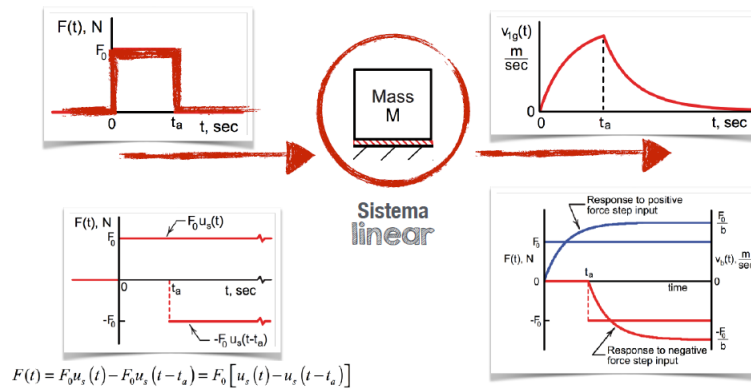


Figura 1.11: Exemplo gráfico do princípio da superposição.

Dentro do princípio da superposição, é possível escrever uma função como a soma de impulsos. A Figura 1.12 mostra graficamente este tipo de comportamento e a Equação 1.1 mostra a expressão matemática.

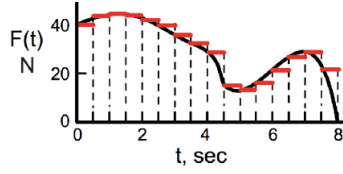


Figura 1.12: Gráfico exemplificativo de uma função escrita como a soma de funções impulsos.

$$F(t) = \int_{-\infty}^{\infty} F(\tau) \delta(t - \tau) d\tau \quad (1.1)$$

O próximo elemento é a **Integral de Convolução**. É dito que, "no domínio do tempo, a resposta de um sistema linear e invariante no tempo (LTI) pode ser determinada pela convolução da resposta ao impulso e a entrada".

A Equação 1.2 mostra uma expressão de sistemas LTI. Enquanto que a Equação 1.3 apresenta a integral de convolução matematicamente escrita. Por fim, a Figura 1.13 mostra graficamente a convolução para um exemplo prático.

$$h(t, \tau) = h(t - \tau) \quad (1.2)$$

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) u(t - \tau) d\tau \rightarrow y(t) = h(t) * u(t) \quad (1.3)$$

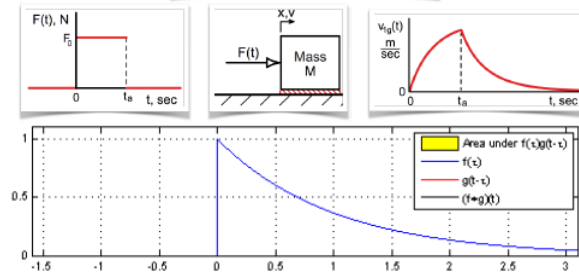


Figura 1.13: Exemplo gráfico da integral de convolução.

Na sequência, temos a **Função Transferência**. É definida como "função que transfere uma entrada exponencial para a saída do sistema". A Equação 1.3 mostra a resposta no domínio do tempo anteriormente apresentado, enquanto que a Equação 1.4 apresenta a mesma resposta, porém no domínio de Laplace.

$$H(s) = \int_{-\infty}^{\infty} h(\tau) e^{-s\tau} d\tau \quad (1.4)$$

Tomando como base o conhecimento previamente apresentado nos cursos de Equações Diferenciais Ordinárias e Modelos Dinâmicos, podemos definir também a Função Transferência como "a transformada de Laplace da resposta ao impulso". A Figura 1.14 mostra uma comparação do s de Laplace em dois domínios diferentes.

domínio da frequência:	$s = \sigma + j\omega$
transformada de Laplace:	$F(s) = \mathcal{L}\{f(t)\} = \int_{0^-}^{\infty} e^{-st} f(t) dt$

Figura 1.14: Apresentação do s no domínio da frequência e na transformada de Laplace.

Na sequência, pode-se utilizar os conceitos apresentados anteriormente e realizar diversas manipulações algébricas para definirmos matematicamente e teoricamente a transformada de Laplace. Tal algebrismo, pode ser visto na Equação 1.5.

$$\begin{aligned}
\mathcal{L}(y(t)) &= \mathcal{L}(h(t) * u(t)) \\
\mathcal{L}(y(t)) &= \mathcal{L}(h(t)) \times \mathcal{L}(u(t)) \\
Y(s) &= H(s)U(s) \\
H(s) &= \frac{Y(s)}{U(s)}
\end{aligned} \quad (1.5)$$

Finalmente, deve-se falar sobre Polos e Zeros. Os polos são as raízes do denominador de uma função transferência e recebe este nome pois, graficamente, representa os valores que "s" de Laplace assume para que o módulo de função transferência tende ao infinito. Assim, o gráfico tridimensional tendendo ao infinito lembra como o Polo de um Circo (formato pontiagudo da tenda). Observe as Figura 1.15 e a Equação 1.6, que representa a definição matemática de um polo.

$$p = (s \in C | Den(s) = 0) \rightarrow |H(s)|_{s=p} = \infty \quad (1.6)$$

E o zeros são as raízes do numerador da Função Transferência, isto é, quando se iguala o numerador à zero. A Figura 1.16 mostra graficamente seu formato e a Equação 1.7 mostra sua definição matemática.



Figura 1.15: Comparação gráfica entre o polo de uma função transferência e o polo de um círculo.

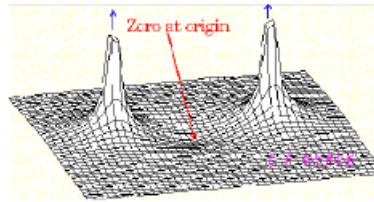


Figura 1.16: Modelo gráfico de um zero numa Função Transferência.

$$z = (s \in C | Num(s) = 0) \rightarrow |H(s)|_{s=z} = 0 \quad (1.7)$$

Características da resposta

As características da resposta estão diretamente ligado às características do sistema em questão e os tipos de entradas.

As entradas podem ser classificadas em dois tipos: singulares (impulso, degrau e rampa, por exemplo), que variam apenas um vez, e periódicas (à saber, sinusóide).

O degrau unitário (também conhecido como Função de Heaviside) é apresentado pelo gráfico da Figura 1.17 e pelo conjunto de Equações 1.8.

$$\begin{aligned} u_s(t) &= 0 \text{ for } t < 0 \\ u_s(t) &= 1 \text{ for } t \geq 0 \\ \frac{du_s(t)}{dt} &= \infty \text{ for } t = 0 \\ \frac{du_s(t)}{dt} &= 0 \text{ for } t \neq 0 \end{aligned} \quad (1.8)$$

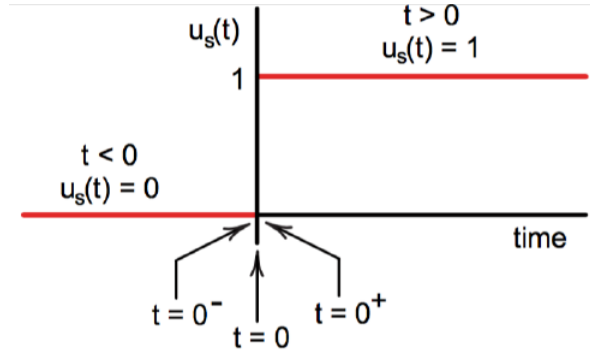


Figura 1.17: Representação gráfica de um degrau unitário.

Analogamente, o impulso unitário (também conhecido como Delta de Dirac) é apresentado pelo gráfico da Figura 1.18 e pelo conjunto de Equações 1.9.

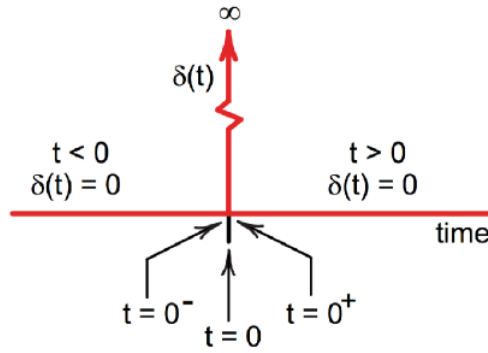


Figura 1.18: Representação gráfica de um impulso unitário.

$$\begin{aligned}
 \delta(t) &= \infty \text{ for } t = 0 \\
 \delta(t) &= 0 \text{ for } t \neq 0 \\
 \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) dt &= 1
 \end{aligned} \tag{1.9}$$

Novamente, para a rampa unitária temos a Figura 1.19, que representa graficamente este tipo de entrada, e o conjunto de Equações 1.10.

$$\begin{aligned}
 u_r(t) &= \int_{-\infty}^t u_s(t) dt \\
 u_r(t) &= t u_s(t)
 \end{aligned} \tag{1.10}$$

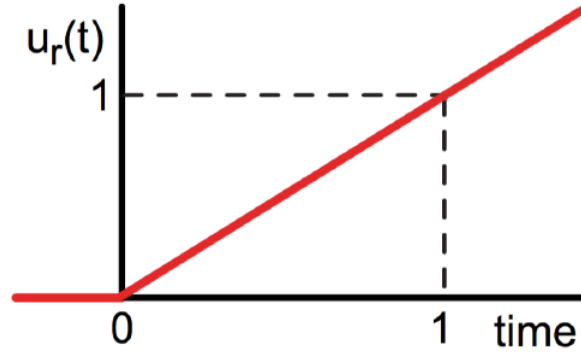


Figura 1.19: Representação gráfica de uma rampa unitária.

Por fim, sobre o Sinusóide (também conhecida como Transformada de Fourier), temos a sua expressão matemática apresentada na Equação 1.11 e a Figura 1.20 representa seu respectivo gráfico.

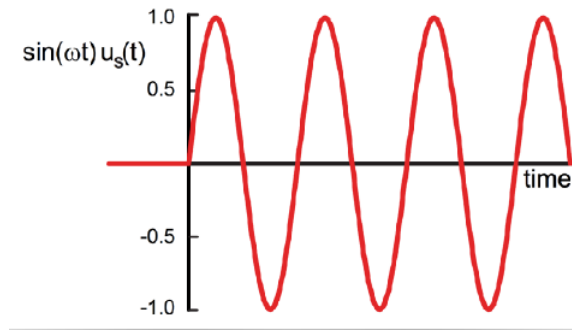


Figura 1.20: Representação gráfica de um sinusóide.

$$f(t) = \sin(\omega t)u_s(t) \quad (1.11)$$

Dada uma Função Transferência padrão pela Equação 1.12, temos que a Equação característica do sistema que ela representa é dada pela Equação 1.13. Esta fornece informações qualitativa sobre a resposta do sistema.

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{Num(s)}{Den(s)} \quad (1.12)$$

$$Den(s) = 0 \quad (1.13)$$

Dada uma equação de primeira ordem e aplicando-se a transformada de Laplace, tem-se a Figura 1.21. Partindo do seu polo, aplica-se a transformada

inversa e obtem-se a Figura 1.22. Os gráficos das Figuras 1.23 e 1.24 apresentam, ambas, que quanto maior o valor do módulo do polo σ , maior será o decaimento da função.

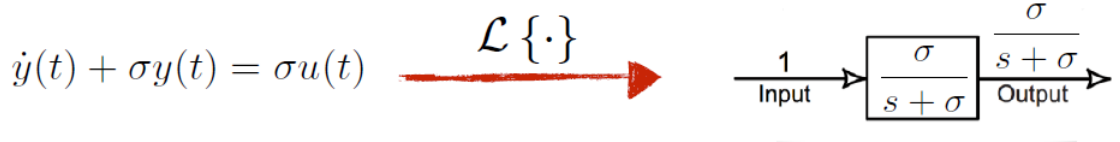


Figura 1.21: Exemplo de sistema de primeira ordem e a aplicação da transformada de Laplace.

$$h(t) = \sigma e^{-\sigma t} \xleftarrow[\delta(s) = 1]{\mathcal{L}^{-1}\{\cdot\}}$$

Polo: $s = p = -\sigma$

Figura 1.22: Transformação inversa da equação de primeira ordem sob o efeito dos polos.

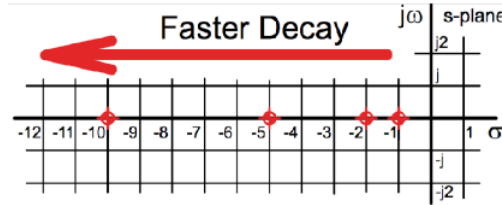


Figura 1.23: Representação de alguns valores de σ no plano $Re \times Im$, com enfoque para os efeitos do módulo deste sob a rapidez do decaimento exponencial.

Além disso, existe um elemento importante dentro do sistema de primeira ordem com aplicação dos polos: a constante de tempo. Ela representa o tempo necessário para que a função alcance 63,2% do seu patamar de regime permanente (estável). É dada, para um sistema de primeira ordem, pela Equação 1.14 e é representada graficamente pela Figura 1.25.

$$\tau \equiv \frac{1}{|\sigma|} \quad (1.14)$$

Ainda sobre os sistemas de primeira ordem, é importante também se abordar a estabilidade destes tipos de sistemas. Tomando os casos das Figuras 1.21 e

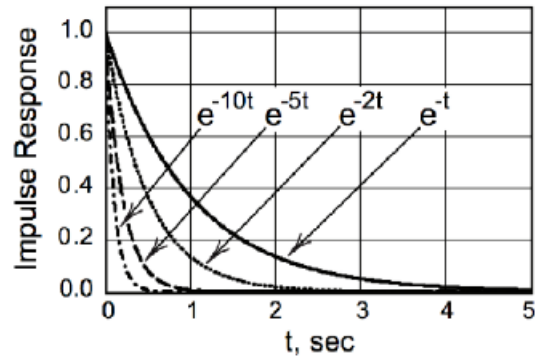


Figura 1.24: Gráfico no domínio do tempo, apresentado o decaimento exponencial para alguns valores de σ .

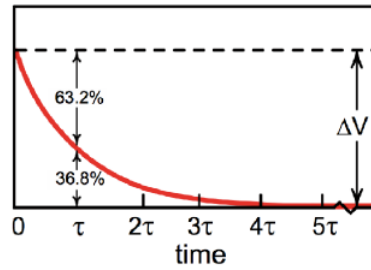


Figura 1.25: Gráfico para um sistema de primeira ordem com enfoque para a constante de tempo τ .

1.22 anteriormente apresentadas, é importante salientar que se $p < 0 \rightarrow \sigma > 0$. Para exemplificar, tomamos a Figura 1.26 para representar o módulo da função variando conforme o sinal do polo (positivo ou negativo) para quando $\sigma = 1$ e $\sigma = -1$.

Agora, para o caso de polos em sistemas de segunda ordem, temos as seguintes representações e definições:

O desenvolvimento de expressões dos polos para sistema de segunda ordem é dada pela Figura 1.29 abaixo.

Onde:

ω_n : frequência natural;

ζ : fator de amortecimento;

ω_d : frequência natural amortecida.

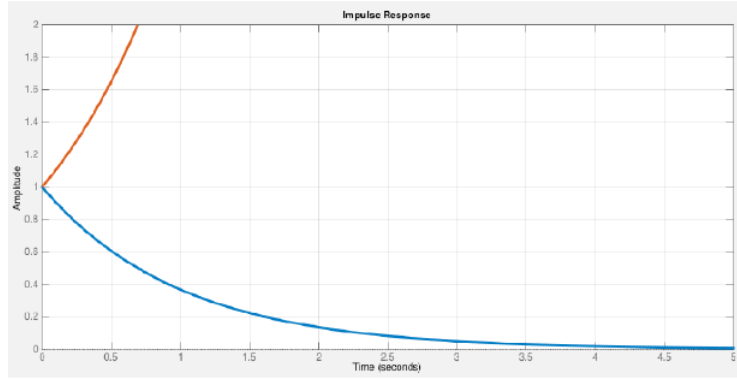


Figura 1.26: Gráfico de *Amplitude* $\times$ *Tempo* para $\sigma = 1$ e $\sigma = -1$.

$$\ddot{y}(t) + 2\zeta\omega_n\dot{y}(t) + \omega_n^2 y(t) = \omega_n^2 u(t) \xrightarrow{\mathcal{L}\{\cdot\}} \begin{array}{c} \text{1} \\ \text{Input} \end{array} \rightarrow \boxed{\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}} \xrightarrow{\frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}} \begin{array}{c} \text{Output} \end{array}$$

Figura 1.27: Exemplo matemático de sistema de segunda ordem e sua respectiva transformada de Laplace.

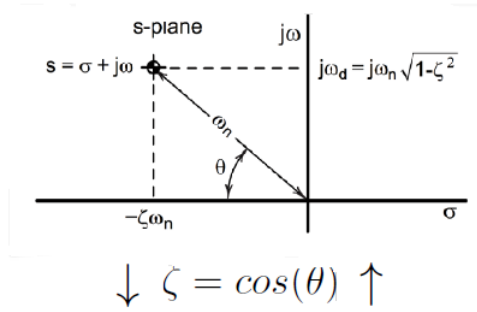


Figura 1.28: Gráfico no plano $Re \times Im$ com enfoque para pólos padrão de sistema de segunda ordem.

Na sequência, aplica-se a transformada inversa de Laplace com o polo do sistema para obtermos a função $h(t)$. Isto pode ser conferido na Figura 1.30 abaixo. Além disso, a constante de tempo para um sistema de segunda ordem é definido pela Equação 1.15.

$$\tau \equiv \frac{1}{|\tau|} = \frac{1}{\zeta\omega_n} \quad (1.15)$$

A Figura 1.31 mostra o comportamento do gráfico exponencial conforme varia-se o valor do módulo do polo σ .

Polos:

$$s = \frac{-2\zeta\omega_n \pm \sqrt{4\zeta^2\omega_n^2 - 4\omega_n^2}}{2}$$

$$s = -\zeta\omega_n \pm \omega_n\sqrt{-(1 - \zeta^2)}$$

$$s = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1 - \zeta^2}$$

$$\omega_d \equiv \omega_n\sqrt{(1 - \zeta^2)}$$

Figura 1.29: Desenvolvimento matemático dos polos para sistema de segunda ordem.

$$h(t) = \frac{\omega_n}{\sqrt{1 - \zeta^2}} e^{-\zeta\omega_n t} (\text{sen } \omega_d t) \quad \xleftarrow[\delta(s) = 1]{\mathcal{L}^{-1}\{\cdot\}} \quad \boxed{s = -\zeta\omega_n \pm j\omega_d}$$

Figura 1.30: Transformada inversa de um sistema de segunda ordem aplicando-se os polos.

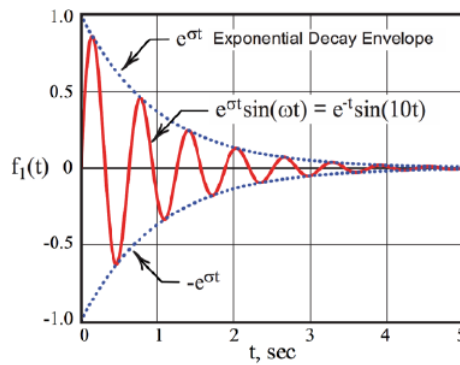


Figura 1.31: Decaimento exponencial da função conforme varia-se o valor do polo σ .

Pode-se observar que, quanto maior for o valor de σ , maior será a oscilação do sistema em torno do seu ponto de regime permanente que, neste caso, é o zero.

Na sequência, ainda sobre sistema de segunda ordem, é importante abordar sobre a estabilidade destes tipos de sistema. A Figura 1.32 mostra o comportamento do sistema conforme a variação do sinal do polo.

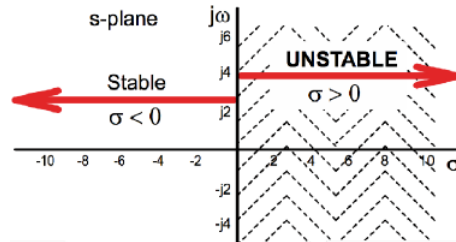


Figura 1.32: Estabilidade de sistemas de segunda ordem conforme varia-se o sinal do polo σ .

E tomando-se o valor de "s" como $s = -\zeta\omega_n \pm j\omega_d$, o sistema torna-se instável quando $\zeta > 0$. Além disso, a Figura 1.33 apresenta um esquemático de estabilidade para diversos tipos de comportamentos gráficos das saídas em sistemas de segunda ordem.

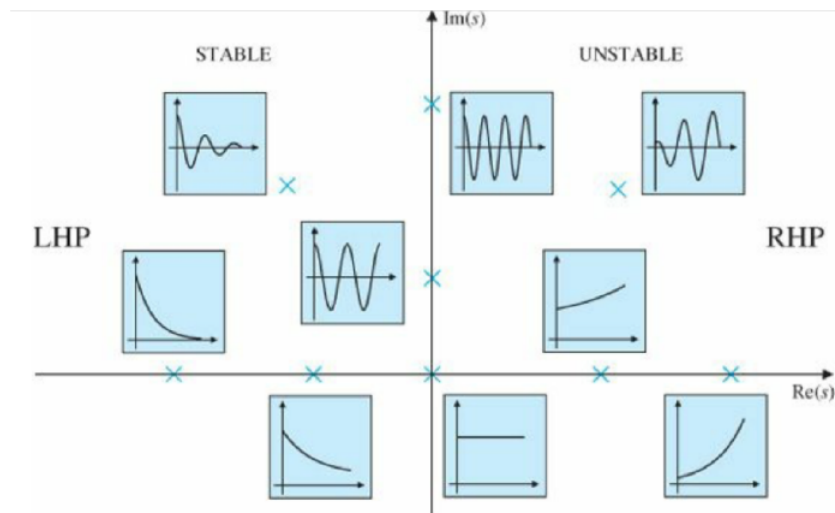


Figura 1.33: Estabilidade em vários sistemas de segunda ordem.

Resposta do degrau

Antes de abordarmos este tópico propriamente dito, é importante enunciar o **Teorema do valor final** e **Teorema do valor inicial**. É dito:

Teorema do valor final: Se uma transformada de Laplace é multiplicada por "s", o valor do produto fazendo "s" tender a zero é o valor da transformada inversa com "t" tendendo a infinito. A Figura 1.34 representa tal teorema;

Teorema do valor inicial: Se uma transformada de Laplace é multiplicada por "s", o valor do produto fazendo "s" tender a infinito é o valor da transformada inversa com "t" tendendo a zero. A Figura 1.35 representa tal teorema.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \lim_{s \rightarrow 0} sY(s)$$

Figura 1.34: Enunciado matemático do Teorema do valor Final.

$$\lim_{t \rightarrow 0} y(t) = \lim_{s \rightarrow \infty} sY(s)$$

Figura 1.35: Enunciado matemático do Teorema do valor Inicial.

Após a apresentação de tais teoremas, tem-se a resposta ao degrau de sistemas de primeira ordem. Dada uma função transferência de 1ª ordem, conforme visto na Figura 1.21, e uma entrada degrau, cuja transformada de Laplace é dada por $U(s) = \frac{1}{s}$, tem-se o seguinte esquema da Figura 1.36.

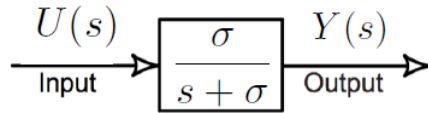


Figura 1.36: Blocos funcionais para um sistema de primeira ordem submetido a uma entrada rampa.

Sabendo que $F.T. = \frac{Y(s)}{U(s)}$, então, ao isolar $Y(s)$ obtemos o seguinte desenvolvimento (Figura 1.37). Seu gráfico é dado pela Figura 1.38.

Analogamente, para sistemas de segunda ordem, tem-se o bloco funcional na Figura 1.39 e a resposta no domínio do tempo na Figura 1.40.

$$Y(s) = \frac{\sigma}{s + \sigma} \frac{1}{s}$$

$$Y(s) = \frac{1}{s} - \frac{1}{s + \sigma}$$

$\mathcal{L}^{-1}\{\cdot\}$ $y(t) = 1 - e^{-\sigma t}$

Figura 1.37: Resposta de sistema de primeira ordem para entrada degrau, no domínio do tempo.

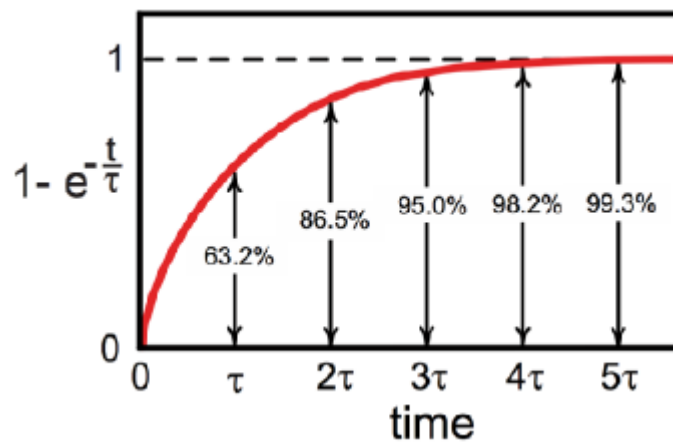


Figura 1.38: Gráfico da resposta de sistema de primeira ordem para entrada degrau, no domínio do tempo $|\tau|$.

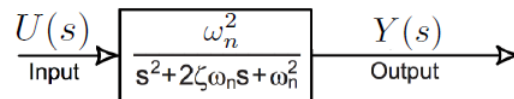


Figura 1.39: Bloco funcional de sistema de segunda ordem sujeito a entrada degrau.

Dando continuidade aos sistemas de segunda ordem, é importante abordar o comportamento da função e dos gráficos conforme a variação do fator de amortecimento (ζ).

$$y(t) = 1 - \frac{e^{-\zeta\omega_n t}}{\sqrt{1-\zeta^2}} \cos\left(\omega_d t - \tan^{-1}\left(\frac{\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right)\right)$$

Figura 1.40: Resposta no domínio do tempo de sistema de segunda ordem sujeito a entrada degrau.

Criticamente amortecido $\zeta^2 - 1 = 0 \rightarrow \zeta = 1$ e $s_1 = s_2 = -\zeta\omega_n$;

Sub-amortecido $\zeta^2 - 1 < 0 \rightarrow \zeta < 1$ e $s = -\zeta\omega_n \pm j\omega_d$;

Super amortecido $\zeta^2 - 1 > 0 \rightarrow \zeta > 1$ e $s = -\zeta\omega_n \pm \omega_d$;

Esquematicamente, pode-se representá-los através da Figura 1.41, onde o vermelho, azul e verde representa, respectivamente, o sistema sub-amortecido, criticamente amortecido e super amortecido.

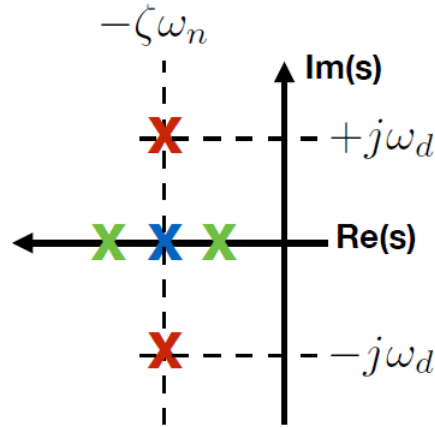


Figura 1.41: Comportamento do amortecimento em sistema de segunda ordem.

E visualizando de forma gráfica, pode-se observar a Figura 1.42 para mais detalhes.

Influência de zeros na resposta

Os zeros de uma função transferência, também ditos zeros de transmissão, possuem diversas funções importantes para o controle e estabilidade de sistemas dinâmicos:

- 1 Possuem capacidade inerente de bloquear frequências;

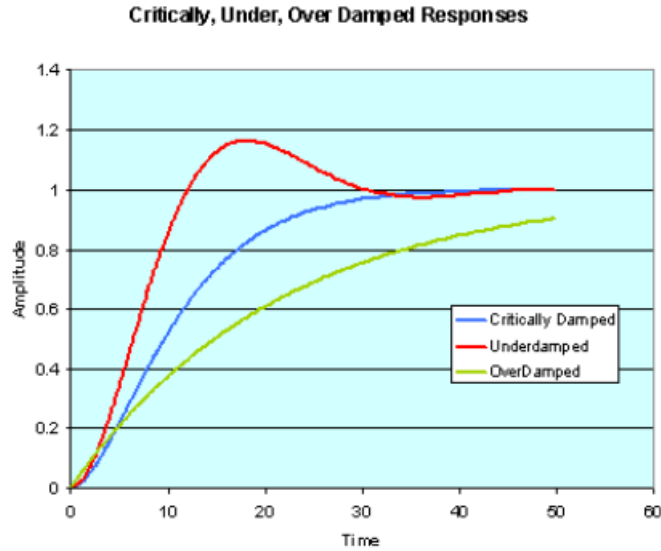


Figura 1.42: Gráfico do comportamento do amortecimento em sistema de segunda ordem.

- 2 Influenciam a resposta transitória do sistema, isto é, está diretamente ligado à entrada e não ao próprio sistema;
- 3 Reduzem os efeitos dos polos, isto é, os polos, em uma análise de *Lugar da Raízes*, tendem aos zeros do sistema.

Dada uma função transferência de segunda ordem (Figura 1.43), o zero é dado por $z = -\alpha\zeta\omega_n = -\alpha\sigma$ e o gráfico representativo é dado na Figura 1.44.

$$H(s) = \frac{\frac{s}{\alpha\zeta\omega_n} + 1}{\left(\frac{s}{\omega_n}\right)^2 + 2\zeta\left(\frac{s}{\omega_n}\right) + 1}$$

Figura 1.43: Função transferência de segunda ordem.

Assim, podemos concluir da Figura 1.44 que os zeros apresentam grande influência no sobressinal, porém pequena influência no tempo de acomodação. Além disso, conforme foi apresentado anteriormente, os zeros **não** influenciam o regime permanente: este é variável apenas pelas próprias características do sistema.

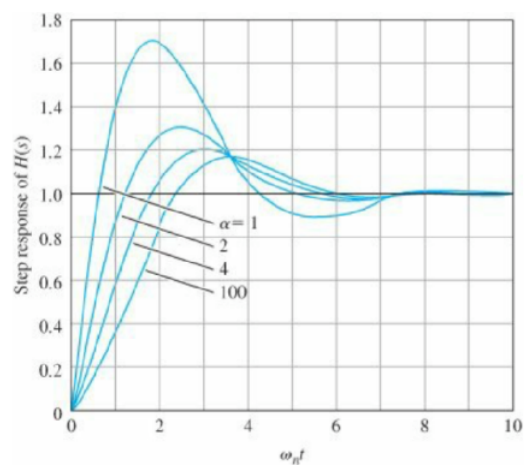


Figura 1.44: Gráfico corresponde à função transferência de segunda ordem, variando-se o valor de α . Observe que quando maior o valor de α , maior é o amortecimento do sistema.

Capítulo 2

Hidráulica

Antes de se apresentar os circuitos hidráulicos propriamente ditos, é necessário fazer uma revisão conceitual dos princípios básicos envolventes dos mecanismos hidráulicos.

Na sequência, abordaremos os elementos presentes nos circuitos hidráulicos, tanto na versão pura (isto é, o circuito é controlado apenas mecanicamente) quanto eletrohidráulicos, os quais já envolvem acionamentos elétricos através de relés e sensores de fim de curso, por exemplo.

Já de antemão, é interessante abordar as vantagens e desvantagens da Hidráulica, frente aos sistemas pneumáticos. A Tabela 2.1 apresenta tais características.

Tabela 2.1: Vantagens e desvantagens da Hidráulica.

Vantagens	Desvantagens
Alta potência e suporte pesos elevados	Alto custo inicial
Desenvolve ações rápidas	Baixo rendimento
Auto-lubrificados	

2.1 Introdução a sistemas hidráulicos

Os sistemas hidráulicos necessitam de um meio para poder propagar suas ações: os fluidos. Isto se deve ao fato que todo fluido consegue escoar em diversos tipos de superfícies e podem se deformar, facilitando seu acesso em regiões estreitas como o de atuadores hidráulicos.

Na sequência, pode-se apresentar as vantagens e desvantagens de se utilizar cada um destes dois fluidos. Para a água e óleo mineral, as vantagens e desvantagens são apresentadas nas Tabelas 2.2 e 2.3, respectivamente.

Tabela 2.2: Vantagens e desvantagens do uso da água como fluido para sistemas hidráulicos.

Vantagens	Desvantagens
Não Polui o meio ambiente	Provoca corrosão em tubos metálicos
Baixo Custo de aquisição	Alto ponto de congelamento e baixo ponto de evaporação
Baixa compressibilidade	Taxa elevada de vazamentos internos

Tabela 2.3: Vantagens e desvantagens do uso de óleo mineral como fluido para sistemas hidráulicos.

Vantagens	Desvantagens
Apresenta propriedades lubrificantes	Baixa condutividade térmica
Suporta altas temperaturas de operação sem mudança de fase	Inflamável

Além dos fluidos utilizados nestes sistemas, devemos falar também da pressão que eles exercem dentro das mangueiras, válvulas e atuadores. Segundo a Apostila M2001-2 BR da Parker (**parker**), a pressão pode ser definida como a "força exercida por unidade de superfície" e, para nosso caso, ela será estudada em kgf/cm^2 , atm ou bar. A equação 2.1 representa matematicamente esta definição, onde P é a pressão, F é a força e A é a área.

$$P = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

Ainda com relação à pressão que os fluidos exercem, é preciso falar da Lei de Pascal. É dito que a pressão exercida em um ponto qualquer de um líquido estático é a mesma em todas as direções e exerce forças iguais em áreas iguais (**parker**). A Figura 2.1 mostra uma consequência direta deste princípio, conhecido também como princípio da prensa hidráulica.



Figura 2.1: Aplicação do Princípio de Pascal em Prensas Hidráulicas.

Sabendo que as pressões presentes nas áreas A e B são iguais (isto é, $P_A = P_B$), então temos:

$$\frac{F_A}{A_A} = \frac{F_B}{A_B} \quad (2.2)$$

O próximo conceito a ser abordado é à respeito da Vazão Volumétrica. É definida como a quantidade de volume que passa por uma determinada seção, por unidade de tempo. A equação 2.3 representa matematicamente este conceito e sua unidade é dada em m^3/s ou l/min .

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (2.3)$$

O penúltimo conceito a ser abordado ainda neste tópico é à respeito de Potência. Matematicamente, potência pode ser definida segunda a equação 2.4.

$$Potencia = Esforco \times Fluxo \quad (2.4)$$

Pode-se ainda aplicar esta expressão para diversos sistemas de engenharia: mecânico, elétrico e fluidicos. A Tabela 2.4 mostra a expressão particular para cada tipo de sistema.

Tabela 2.4: Expressões de potência para diversos tipos de sistemas.

Sistema	Expressão
Mecânico	$Forca \times Velocidade$
Elétrico	$Tensao \times Corrente$
Fluidico	$Pressao \times Vazao$

Por fim, deve-se citar a definição do Princípio de Bernoulli. É dito que "se a velocidade de uma partícula de um fluido aumenta enquanto ela se escoar ao longo de uma linha de corrente, a pressão do fluido deve diminuir e vice-versa".

Para mais informações, consultar os tópicos 2 e 3 da apostila da Parker (**parker**).

2.2 Circuitos hidráulicos

Os circuitos hidráulicos apresentam uma anatomia básica em todos eles. A Figura 2.2 apresenta tal construção: à esquerda há o desenho com as peças e à direita, há o desenho com a simbologia que será abordado posteriormente.

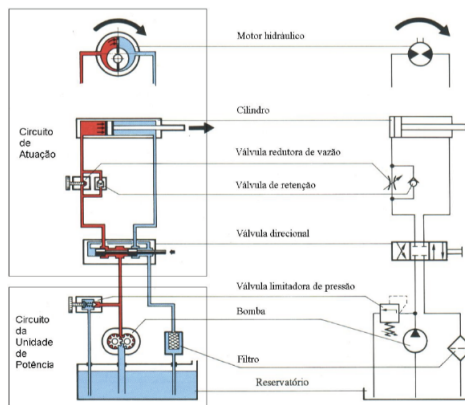


Figura 2.2: Circuito hidráulico básico. (7)

2.2.1 Unidade de Potência

Todo circuito hidráulico possui uma unidade de potência. Ela é constituída por válvula limitadora de pressão, bomba hidráulica, filtro hidráulico, reservatório hidráulico (ou tanque) e motor elétrico. Na sequência, será comentando um pouco sobre cada um destes componentes.

- 1 Válvula Limitadora de Pressão ou Válvula de Controle de Pressão:** elas limitam a pressão máxima de um sistema, regulam a pressão reduzida em certas partes dos circuitos e controlam as operações sequenciais, entre outras funções. A base de operação é um balanço entre pressão e força da mola. A Figura 2.3.a mostra sua simbologia;
- 2 Bomba Hidráulica:** são utilizadas nos circuitos para converter energia mecânica em hidráulica. Elas trabalham com altas velocidades e vazões e baixas pressões, ou seja, a energia cinética prevalece para provocar movimentos. A Figura 2.3.b mostra sua simbologia;
- 3 Filtro Hidráulico:** removem as impurezas presentes nos fluidos hidráulicos, além de transmitirem energia, lubrificarem as partes móveis internas, transferirem calor e vedarem as folgas entre as partes móveis. A Figura 2.3.c mostra sua simbologia;
- 4 Reservatório hidráulico:** consiste em quatro paredes (geralmente de aço), uma base abaulada, um topo plano, quatro pés, três linhas (sucção, retorno e dreno), indicador de nível de óleo e tampas. A Figura 2.3.d mostra sua simbologia;
- 5 Motor elétrico:** transforma energia elétrica em energia mecânica rotativa, de forma a tornar possível o funcionamento da bomba. A Figura 2.3.e mostra sua simbologia;

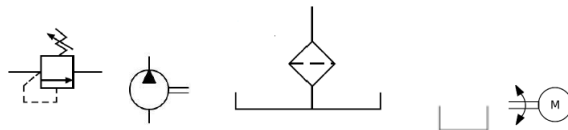


Figura 2.3: (a) Simbologia de válvula limitadora de pressão; (b) Simbologia de bomba hidráulica; (c) Simbologia de filtro hidráulico; (d) Simbologia de reservatório hidráulico; (e) Simbologia de motor elétrico.

2.2.2 Válvulas

Estes elementos podem ser classificados em duas grandes categorias: válvulas de controle direcional e válvulas auxiliares.

Para facilitar a compreensão do estudante à respeito das válvulas direcionais, utiliza-se a Apostila de Tecnologia Hidráulica Industrial da Parker (7) para fornecer as informações de forma clara e construtiva.

2.2.3 Válvulas de Controle Direcional (7)

As válvulas de controle direcional são representadas nos circuitos hidráulicos através de símbolos gráficos. Para identificação da simbologia devemos considerar: número de posições, número de vias, posição normal e tipo de acionamento.

- 1 **Número de posições:** as válvulas são representadas graficamente por quadrados. O número de quadrados unidos representa o número de posições ou manobras distintas que uma válvula pode assumir. A Figura 2.4 apresenta um esquemático do número de válvulas;

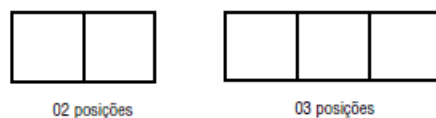


Figura 2.4: Esquemático do número de posições para valvulas direcionais.

- 2 **Número e tipo de vias:** corresponde ao número de conexões úteis que uma válvula pode possuir. As Figuras 2.5 e 2.6 apresentam um esquemático do número de vias e os tipos de vias, respectivamente;
- 3 **Posição Normal:** é a posição em que se encontram os elementos internos quando a mesma não foi acionada. Esta posição geralmente é mantida por força de uma mola;

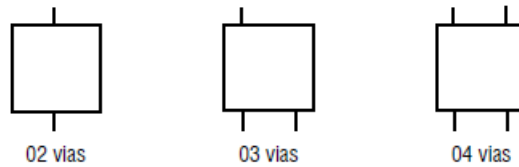


Figura 2.5: Esquemático do número de vias para válvulas direcionais.

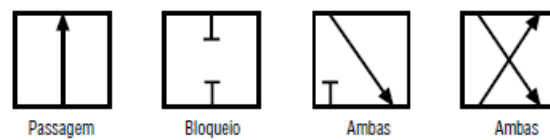


Figura 2.6: Esquemático dos tipos de vias para válvulas direcionais.

4 Tipo de acionamento: define a sua aplicação no circuito, estes acionamentos podem ocorrer por força muscular, mecânica, pneumática, hidráulica ou elétrica. Estes podem ser:

- [1] Por botão;
- [2] Por alavanca;
- [3] Por sensor de fim de curso;
- [4] Por acionamento hidráulico;
- [5] Por solenóide;

E outros condicionamentos das válvulas direcionais podem ser:

- [1] Mola para proporcionar retorno;
- [2] Pino de trava (dente);

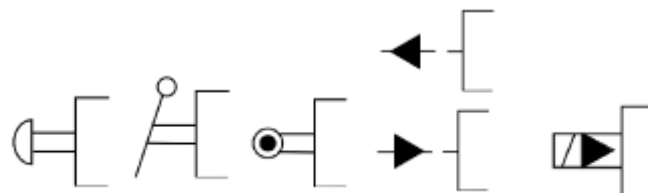


Figura 2.7: Tipos de acionamentos. Da esquerda para a direita, respetivamente: botão, alavanca, sensor de fim de curso, hidráulico e solenóide.

2.2.4 Válvulas auxiliares

Existem muitas válvulas auxiliares que permitem um grande grama de aplicações industriais. Nesta subseção será abordado as principais utilizadas em circuitos hidráulicos.

- 1 **Válvulas de retenção:** seu funcionamento faz com que o fluido passe pela válvula somente em uma direção. Quando a pressão do sistema na entrada da válvula é muito alta, o suficiente para vencer a mola que segura o assento, este é deslocado para trás;
- 2 **Válvulas controladoras de vazão:** tem a função de reduzir o fluxo da bomba em uma linha do circuito, ou seja, é uma restrição no sistema. Para vencer a restrição, uma bomba aplica uma pressão maior ao líquido, o que provoca um desvio de parte deste fluxo para outro caminho;

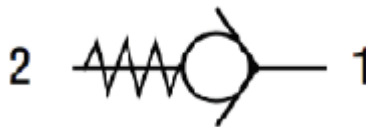


Figura 2.8: Simbologia de válvula de retenção. O sentido que flui é da posição 1 para a posição 2 (e de 2 para 1 não é permitido o fluxo).

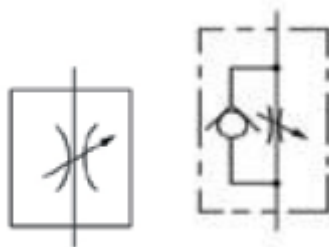


Figura 2.9: Da esquerda para a direita: simbologia de válvula controladora de vazão variável e simbologia de válvula controladora de vazão variável com retenção integrada.

2.2.5 Atuadores hidráulicos

São os atuadores hidráulicos que convertem a energia de trabalho em energia mecânica, ou seja, quem realiza a ação desejada, sendo parte muito importante

do projeto. Eles são divididos em quatro tipos: lineares, rotativos, oscilantes e especiais.

Os principais atuadores hidráulicos serão apresentados na estrutura seguinte:

- 1 Cilindros hidráulicos:** transformam trabalho hidráulico em energia mecânica linear, que é aplicada a um objeto resistivo para realizar trabalho. Consistem em uma camisa (tubo), de um pistão móvel e de uma haste ligada ao pistão. Eles podem ser de simples ou dupla ação, com retorno por mola ou não;
- 2 Osciladores hidráulicos:** são atuadores rotativos com campo de giro limitado, convertendo energia hidráulica em movimento rotativo sob um determinado número de graus;
- 3 Motores hidráulicos:** transformam a energia de trabalho hidráulico em energia mecânica rotativa, que é aplicada ao objeto resistivo por meio de um eixo. Consistem basicamente em uma carcaça com conexões de entrada e saída e em um conjunto rotativo ligado a um eixo;



Figura 2.10: Simbologia de cilindros hidráulicos de simples ação. Da esquerda para a direita, respectivamente: cilindro hidráulico sem retorno por mola e com retorno por mola.



Figura 2.11: Simbologia de cilindro hidráulico de dupla ação.

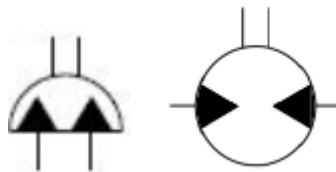


Figura 2.12: Da esquerda para a direita, respectivamente: simbologia de oscilador hidráulico e simbologia de motor hidráulico.

2.2.6 Exercícios sugeridos

Visando uma melhor fixação dos elementos e conceitos aqui apresentados, recomenda-se que o usuário refaça os circuitos apresentados na apostila da Parker (7), na seção "Circuito hidráulicos básicos", conferindo se o circuito produzido confere com a resposta fornecida.

2.3 Circuitos eletrohidráulicos

Os circuitos eletrohidráulicos se diferenciam dos circuitos puramente hidráulicos no aspecto de possibilitar maior possibilidade de controle e opções ao acrescentar dispositivos elétricos. Este tipo de circuito envolve dois diagramas como um todo: um circuito hidráulico propriamente dito, utilizando das mesmas simbologias anteriormente apresentadas; e um diagrama elétrico que fornecerá a lógica de dispositivos eletricamente funcionais.

Para este capítulo de hidráulica, será apresentado apenas o método intuitivo de resolução de circuitos eletrohidráulicos. As outras técnicas de construção lógica de circuitos (cascata e passo a passo) serão apresentadas no capítulo de pneumática. Neste método intuitivo a solução de comando flui através da lógica e do pensamento, podendo com isso apresentar resoluções diferentes para a mesma problemática.

Para melhor compreensão destes tipos de sistemas, alguns conceitos devem ser apresentados:

- 1 Barras horizontais com "+" e "-":** estas barras nos diagramas indicam as linhas de tensão (alimentação) positivas e negativas, respectivamente; ou, comumente falado, o VCC e o Ground (GND);
- 2 Bobina:** Sua energização e a consequente formação do campo magnético criam-se forças no interior do solenóide que servem para a movimentação de elementos com características ferrosas, dando origem à aplicação auto-mecânica (relés, válvulas solenóides, contadores, etc.);
- 3 Normalmente aberto (NA):** é uma posição (pino) dentro de elementos elétricos que se encontra aberto, isto é, não permite a passagem de corrente. Para acioná-lo, é preciso "energizá-lo" tocando e/ou pressionando seu mecanismo;
- 4 Normalmente fechado (NF):** é uma posição (pino) dentro de elementos elétricos que se encontra fechado, isto é, permite a passagem de corrente enquanto seu mecanismo não estiver acionado (portanto, se acionar, estará abrindo o circuito);

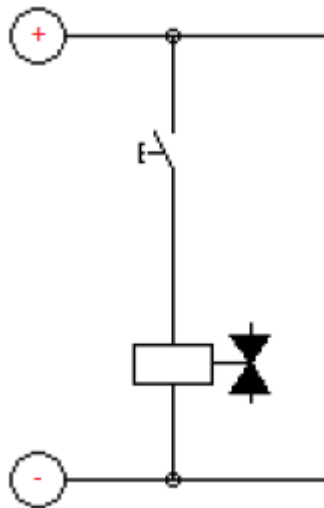


Figura 2.13: Diagrama elétrico com enfoque para as linhas de alimentação, com identificação em vermelho.

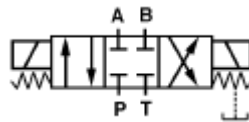


Figura 2.14: Válvula direcional acionada por solenóide. Observe que o solenóide fica representado como uma caixa nas laterais das válvulas e quando ela é acionada, a posição assumida é a mesma em que esse se encontra.



Figura 2.15: Simbologia de solenóide/bobina nos diagramas elétricos



Figura 2.16: Simbologia de NA nos diagramas elétricos

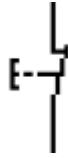


Figura 2.17: Simbologia de NF nos diagramas elétricos

Para maior nicho de informações é válido conferir na Apostila da Parker de Tecnologia Eletrohidráulica Industrial (5), no tópico de Circuitos Eletrohidráulicos Conceituais. Além disso, ela apresenta uma grama de exemplos que podem ser resolvidos e conferidos para melhor aprendizado.

2.4 Modelagem de circuitos hidráulicos

Antes de abordar-se o tema de modelagem de circuitos hidráulicos propriamente dito, é necessário acrescentar e rever alguns conceitos fundamentais. Estes conceitos estão relacionados diretamente às substâncias utilizadas como transmissão dos circuitos: fluidos.

Segundo a Apostila Sistemas Hidráulicos e Pneumáticos para Automação e Controle (7), pode-se definir um fluido como uma substância que se deforma continuamente sob a aplicação de uma tensão de cisalhamento, não importando quão pequena possa ser esta tensão. E pode-se definir a tensão de cisalhamento média sobre a área como a razão da componente tangencial da força que age sobre a superfície pela área da superfície. A equação 2.5 apresenta tal razão:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (2.5)$$

Uma substância elástica colocada entre duas placas sofreria uma determinada deformação proporcional à força, mas não continuamente em velocidade finita. Este seria o caso dos fluidos hidráulicos alojados em seus sistemas. A Figura 2.18 representa um modelo esquemático da situação de um fluido entre duas placas paralelas, nos permitindo concluir que:

$$\tau = \mu \times \frac{F}{A} \quad (2.6)$$

Da equação 2.6 observe que μ é a viscosidade dinâmica (absoluta), cuja unidade é *Pa.s*. Vale ressaltar que a viscosidade de uma substância é dita como a resistência ao escoamento que ocorre devido às forças moleculares presentes.

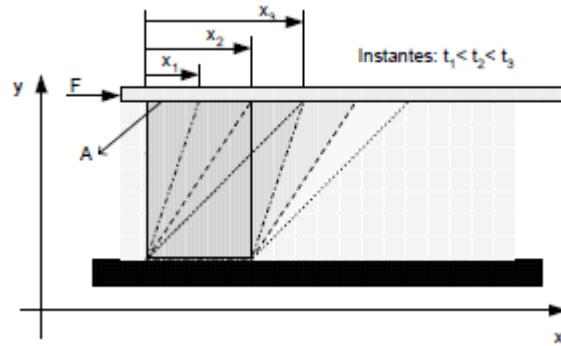


Figura 2.18: Deformação ocorrida entre duas placas com movimento relativo em meio fluido (SHAMES, 1973)

É importante destacar que o dimensionamento estático de sistemas hidráulicos é conduzido considerando-se o fluido incompressível porém, nas aplicações que envolvem controle proporcional ou servo, o efeito da variação da massa específica com a pressão (compressibilidade do fluido) é crucial para o projeto e entendimento destes sistemas. A massa específica é dada pela relação entre a massa de fluido e o volume que este ocupa:

$$\rho = m \times V \quad (2.7)$$

E, unindo os conceitos, temos que a viscosidade cinemática (cuja unidade é dada em m^2/s) pode ser dada como:

$$\nu = \mu \times \rho \quad (2.8)$$

A classificação ISO de viscosidade baseia-se na viscosidade cinemática (cSt = centistokes = $10^{-6}m^2/s$) a $40^\circ C$. A água, por exemplo, a $20^\circ C$ tem uma viscosidade cinemática de cerca de 1cSt. A Figura 2.19 mostra as viscosidades de fluidos comumente utilizados à $40^\circ C$.

ISO standard 3448 ASTM D-2422	Ponto médio de viscosidade cSt	Viscosidade cinemática, cSt		Equivalência aproximada SUS
		mínimo	máximo	
ISO VG 2	2,2	1,98	2,42	32
ISO VG 3	3,3	2,88	3,52	36
ISO VG 5	4,6	4,14	5,06	40
ISO VG 7	6,8	6,12	7,48	50
ISO VG 10	10	9,00	11,0	60
ISO VG 15	15	13,5	16,5	75
ISO VG 22	22	19,8	24,2	105
ISO VG 32	32	28,8	35,2	150
ISO VG 46	46	41,4	50,6	215
ISO VG 68	68	61,2	74,8	315
ISO VG 100	100	90,0	110	465
ISO VG 150	150	135	165	700
ISO VG 220	220	198	242	1000
ISO VG 320	320	288	352	1500
ISO VG 460	460	414	506	2150
ISO VG 680	680	612	748	3150
ISO VG 1000	1000	900	1100	4650
ISO VG 1500	1500	1350	1650	7000

Figura 2.19: Classificação ISO. Todas as viscosidades a 40°C (7)

2.4.1 Módulo de Compressibilidade

O módulo de compressibilidade (*Bulk modulus* ou módulo de elasticidade) pode ser dito como "resistência à compressibilidade".

Conforme mencionado anteriormente, a compressibilidade está associada à variação da massa específica do fluido em função da pressão a que ele está submetido. No caso de líquidos, não há uma expressão analítica que modele o comportamento da massa específica em um sistema, mas sabe-se que esta é influenciada pela pressão e pela temperatura, ou seja:

$$\rho = \rho(p, T) \quad (2.9)$$

Nesta situação, pode-se obter uma expressão através da expansão em série de Taylor da função 2.9 desprezando-se termos de segunda ordem e superiores em que, em condição operacional, $\rho = \rho_i, p = p_i, T = T_i$, caracteriza o estado

inicial do sistema, ou seja, o ponto de operação. Assim, utilizando estes dados e a equação 2.7 tem-se:

$$\rho = \rho_i \left[1 + \frac{1}{\beta} (p - p_i) - \alpha (T - T_i) \right] \quad (2.10)$$

Os coeficientes presentes nesta equação podem ser obtidos de tabelas em livros especializados ou de catálogos completos sobre fluidos hidráulicos, sendo o módulo de compressibilidade isotérmico dado por:

$$\beta = \rho_i \frac{\delta p}{\delta \rho} \Big|_{T_i} = -V_i \frac{\delta \rho}{\delta V} \Big|_{T_i} \quad (2.11)$$

cuja unidade é dada em Pascal (Pa). Alguns valores típicos são o do óleo mineral (1500 MPa), da água (2200 MPa) e do ar (0,1 MPa).

O segundo coeficiente presente na equação 2.10 é o coeficiente de expansão térmica isobárico, sendo expresso como:

$$\alpha = \frac{1}{V_i} \frac{\delta V}{\delta T} \Big|_{p_i} \quad (2.12)$$

2.4.2 Bombas

As bombas utilizadas em circuitos hidráulicos podem ser categorizadas como elemento que "introduz potência hidráulica" no sistema. É válido relembrar o conceito de potência dado por:

$$Potencia = Esforco \times Fluxo \quad (2.13)$$

onde, para o caso hidráulico, a pressão corresponde ao esforço e a vazão, ao fluxo. Portanto, tem-se:

$$p_{hyd} = \frac{qp}{600} \quad (2.14)$$

onde p_{hyd} é potência (*hydraulic power* em kW), q é vazão (em l/min) e p é a pressão (em bar).

2.4.3 Válvulas

Para esta seção de válvulas e para as próximas seções de hidráulicas (2.4.4 e 2.4.5), o conteúdo (texto, figuras e equações) aqui apresentado foi retirado da tese Hydraulic Compliance Control of the Quadruped Robot HyQ (1).

A válvula é um componente hidráulico responsável pelo controle da potência hidráulica, alimentada pela bomba, que direciona-a para os atuadores. O tipo mais comum de válvulas utilizadas em robôs com atuadores hidráulicos são as servoválvulas de controle de vazão. Estas válvulas regulam a vazão de saída de acordo com o controle de um sinal de entrada.

Essas válvulas possuem quatro portas (a, b, s , e t) e o carretel da válvula é acionado hidraulicamente por um piloto. A porta a conecta a válvula à câmara a do atuador e a porta b , à camara b , enquanto que a porta s (s de Supply - alimentação) conecta a válvula à bomba e a porta t (t de Tank - tanque) conecta a válvula ao reservatório. As pressões nas portas a, b, s , e t são nomeadas como p_a, p_b, p_s e p_t , respectivamente. A tensão de entrada da válvula é u . A Figura 2.20 mostra um esquema hidráulico da válvula.

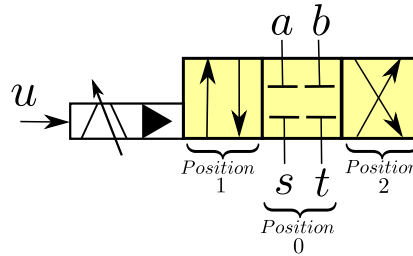


Figura 2.20: Esquema hidráulico da válvula apresentando as três posições da válvula e suas quatro portas a, b, s , e t .

Dinâmica do Carretel da válvula

Nas servoválvulas, o carretel é uma parte móvel localizada dentro da carcaça da válvula, sendo responsável por controlar a abertura e fechamento das câmaras da válvula e, portanto, configurando a direção da vazão e sua magnitude.

A movimentação do carretel dentro da carcaça da válvula depende do entrada elétrica u , aplicada na válvula. A relação entre a entrada u (desconsiderando a dinâmica elétrica) e a posição do carretel x_v pode ser modelado como um sistema linear de segunda ordem:

$$\Delta x_v(s) = \frac{K_{spool}}{\frac{1}{w_v^2} s^2 + \frac{2D_v}{w_v} s + 1} \Delta u(s) \quad (2.15)$$

onde,

K_{spool} : Ganho de posição de entrada do carretel da válvula, em estado estacionário [m/A], que relaciona a entrada (corrente, para hidráulica) com a posição do carretel em estado estacionário;

w_v : Frequência angular do carretel da válvula [rad/s];

D_v : Amortecimento do carretel da válvula ;

A pressão hidráulica e a força hidráulica são muito rápidas e requerem uma rápida ação para controlá-las. Assim, deve-se ter atenção a todos os níveis do *hardware* para evitar a inserção de elementos lentos que podem comprometer o sistema com a inserção de atrasos à resposta.

Para a maioria das servoválvulas comercialmente disponíveis, a posição do carretel não pode ser definido. Além disso, existe um arsenal de detalhes mecânicos sobre as peças internas das válvulas presentes nos *data sheets*, podendo isso ser difícil de definir os ganhos, como o K_{spool} . Para contornar estes detalhes, é recomendável expressar a posição do carretel em termos da entrada da válvula u :

$$\Delta u_v(s) = \frac{1}{\frac{1}{w_v^2}s^2 + \frac{2D_v}{w_v}s + 1} \Delta u(s) = \frac{1}{K_{spool}} \Delta x_v(s) \quad (2.16)$$

Na equação 2.16, a função transferência u_v tem unidade do ganho em estado estacionário e u_v tem a mesma unidade que u , que é *Ampere* para válvulas hidráulicas. Portanto, u_v pode ser visto como uma versão filtrada da entrada u , onde o atrasado introduzido pelo filtro corresponde ao atrasado dinâmico do carretel. Ou seja, u_v é a corrente que representa a posição real do carretel, como se isso fosse a saída do sensor de posição do carretel. Portanto, daqui para frente, u_v vai se referir à posição do carretel e x_v não vai ser mais usado neste modelo.

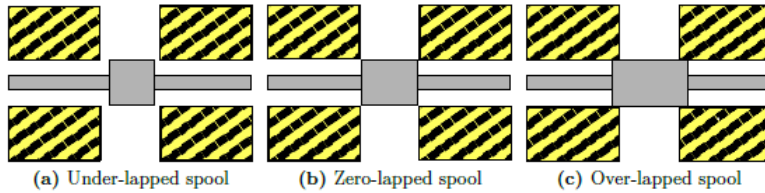


Figura 2.21: Diferentes tamanhos de carretel. (a) O centro é dito subcrítico (sobreposição negativa) e, portanto, l_r menor que l_p . (b) O centro é dito crítico (sobreposição nula), ou seja, l_r igual a l_p . (c) O centro é dito supercrítico, isto é, l_r maior que l_p .

onde, o tipo de centro relaciona a diferença entre o comprimento do ressalto (lr) e o comprimento do pórtico (lp).

Vazão pelas válvulas

Como discutido anteriormente, o carretel da válvula é um componente responsável pelo controle da direção da vazão e de sua magnitude. A magnitude da vazão é controlada através da manipulação da área ajustável $a(u_v)$ do controle de orifício da válvula, que muda linearmente com a posição do carretel u_v , isto é:

$$a(u_v) = W u_v \quad (2.17)$$

onde, W é o gradiente de área [m^2/s].

Além da área do orifício $a(u_v)$, a magnitude da vazão q através de um orifício é dado em função do diferencial de pressão Δp através do orifício. Assim, a equação 2.18 mostra a magnitude q escrita em termos de outras variáveis:

$$q = C_d a(u_v) \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = C_d W u_v \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} = \frac{C_d W u_v \sqrt{2}}{\sqrt{\rho}} u_v \sqrt{\Delta p} = K_v u_v \sqrt{\Delta p} \quad (2.18)$$

onde,

C_d : coeficiente de descarga ($C_d \approx 0,6$ é normalmente assumido (3));

ρ : densidade do óleo;

K_v : ganho da válvula;

2.4.4 Cilindros Assimétricos

O mais comum atuador em hidráulica é o atuador linear, ou cilindro hidráulico. Este converte energia hidráulica em energia mecânica. Ele consiste em duas partes principais: um corpo cilíndrico oco e um pistão, que é acoplado dentro do corpo e é livre para se movimentar. A haste do pistão é a parte que conecta o pistão a um objetivo externo, isto é, a uma carga.

Essencialmente existem dois tipos de cilindros: cilindros com hastes em ambas as extremidades (chamado de cilindro de dupla-haste ou simétrico) e cilindros que possuem apenas uma haste (chamado de cilindro de uma haste ou assimétrico), como pode ser observado através da Figura 2.22.

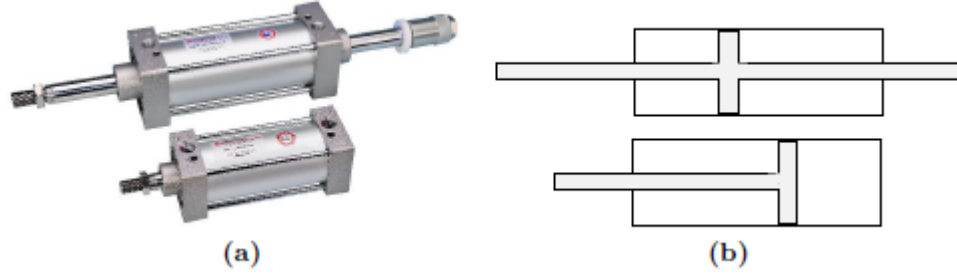


Figura 2.22: (a) Imagens reais de cilindro simétrico e assimétrico; (b) Esquema hidráulico que representa, respectivamente, cada um desses cilindros.

No caso dos cilindros assimétricos, sua simetria provoca diferentes áreas efetivas entre as câmaras do cilindro. A maior área A_p é chamado de área do pistão. A área do lado da haste é chamado de área anelar, sendo menor que a área do pistão por um fator $\alpha < 1$. Em cilindros simétricos, $\alpha = 1$. E para cilindros hidráulicos assimétricos, essa razão de áreas é $\alpha \cong 0,61$.

O esquema presente na Figura 2.23 é composta por um cilindro hidráulico assimétrico comandado por uma servoválvula. A carga inercial é representada pela massa M_t com atrito visco B_t , o qual já inclui o principalmente o atrito na junta dos rolamentos.

As vazões das câmaras q_a e q_b são modeladas conforme a equação 2.18, dependendo da posição do carretel da válvula u_v :

$$q_a = \begin{cases} K_v u_v \sqrt{p_s - p_a}, & u_v > 0. \\ K_v u_v \sqrt{p_a - p_t}, & u_v < 0. \end{cases} \quad (2.19)$$

$$q_b = \begin{cases} K_v u_v \sqrt{p_b - p_t}, & u_v > 0. \\ K_v u_v \sqrt{p_s - p_b}, & u_v < 0. \end{cases} \quad (2.20)$$

Desprezando perdas internas e externas, aplica-se o princípio de conservação de massa para cada uma das câmaras utilizando a equação da continuidade. Assim, expressões para a dinâmica das pressões são dadas por:

$$\dot{p}_a = \frac{\beta_e}{v_a} (q_a - A_p \dot{x}_p) \quad (2.21)$$

$$\dot{p}_b = \frac{\beta_e}{v_b} (-q_b + \alpha A_p \dot{x}_p) \quad (2.22)$$

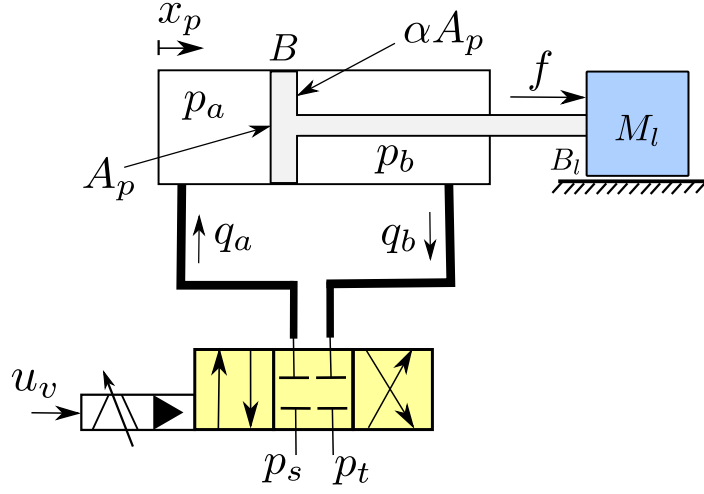


Figura 2.23: Esquema hidráulico do sistema de atuação por cilindro hidráulico. A válvula escolhe a direção e a magnitude das vazões de ambas câmaras q_a e q_b . Essas vazões mudam as pressões p_a e p_b dentro das câmaras de cilindros assimétricos e, conseqüentemente, a força f que é transmitida para a carga, que leva em consideração o atrito no cilindro B . A carga, representada pelo bloco na ponta da haste, é simplificada neste esquema por uma carga inercial com massa constante M_t e atrito B_t .

onde,

v_a : volume da câmara a [m^3];

v_b : volume da câmara b [m^3];

O volume das câmaras variam de acordo com a posição do pistão x_p . O volume dentro das mangueiras que conectam a válvula ao atuador é também incluído ao volume total de cada câmara, que podem ser definidos como:

$$v_a = V_{pl} + A_p x_p \quad (2.23)$$

$$v_b = V_{pl} + (L_c - x_p) \alpha A_p \quad (2.24)$$

onde,

V_{pl} : volume da linha de tubulação [m^3];

L_c : comprimento do cilindro ou "batida" (distância total que o cilindro pode movimentar) [m];

O volume da linha de tubulação V_{pl} depende do diâmetro interno da tubulação D_{pl} e do seu comprimento L_{pl} ($V_{pl} = L_{pl}\pi D_{pl}^2/4$)

Força Hidráulica

A força hidráulica f_h criada pelo cilindro hidráulico é definida como a força criada exclusivamente pela diferença de pressão entre as câmaras do cilindro, que é dada por:

$$f_h = A_p p_a - \alpha A_p p_b = A_p (p_a - \alpha p_b) \quad (2.25)$$

A diferença de pressão $p_a - \alpha p_b$ pode ser definida a pressão de carga para um cilindro assimétrico. Esta é a diferença de pressão que efetivamente produz a força. Assim, a equação 2.25 pode ser reescrita:

$$f_h = A_p p_l \quad (2.26)$$

onde, p_l é a pressão de carga ($p_l = p_a - \alpha p_b$) [Pa].

Derivando a equação 2.25 em função do tempo e considerando a definição de pressão de carga dada pelas equações 2.21 e 2.22, a dinâmica da força hidráulica pode ser obtida:

$$\dot{f}_h = \frac{A_p \beta_e}{v_a} (q_a - A_p \dot{x}_p) - \frac{\alpha A_p \beta_e}{v_b} (-q_b + \alpha A_p \dot{x}_p) \quad (2.27)$$

Força de atrito

Sabendo que os componentes hidráulicos, como cilindros, são usados para trabalhar com fluidos em altas pressões, a vedação do pistão geralmente é bastante apertada para evitar vazamentos internos. Esta pequena folga entre o pistão do cilindro e o corpo do cilindro aumenta substancialmente as forças de atrito, que funcionam também como amortecimento natural, mas também insere não-linearidades ao sistema.

A força de atrito em cilindros hidráulicos pode ser modelada como (2):

$$f_f = B \dot{x}_p + \text{sign}(\dot{x}_p) \left(F_{c0} + F_{s0} e^{-\frac{|\dot{x}_p|}{C_s}} \right) \quad (2.28)$$

onde,

B : coeficiente de atrito viscoso [Ns/m];

F_{c0} : coeficiente de atrito de Coulomb [N];

F_{s0} : coeficiente de atrito estático [N];

C_s : coeficiente de decaimento de atrito estático (conhecido como velocidade de Stribeck) [m/s];

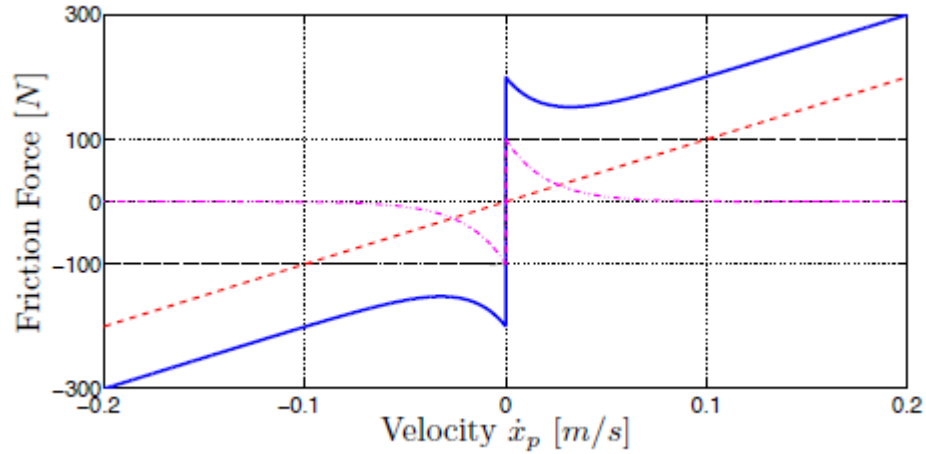


Figura 2.24: Curva teórica típica para atrito em atuadores hidráulicos ou Curva de Stribeck. A linha contínua azul indica a força de atrito total f_f sendo, portanto, a soma das outras três curvas presentes. A linha preta tracejada representa o atrito de Coulomb constante para $F_{c0} = 100N$; a linha rosa pontilhada indica a força de atrito estático com $F_{s0} = 100N$ e $C_s = 0,02$; e a linha vermelha tracejada indica o atrito viscoso variando linearmente considerando $B = 1000Ns/m$.

Como visto na Equação 2.28 e na Figura 2.24, a força de atrito em cilindros hidráulicos podem ser decomposto essencialmente em três componentes principais:

- . Atrito viscoso: é o único componente linear das forças de atrito, e por causa disso, normalmente é a única força considerada na modelagem. Este é proporcional à magnitude da velocidade do pistão;
- . Atrito de Coulomb: é uma força constante que depende apenas do sinal do velocidade do pistão;
- . Atrito estático: essa força atua principalmente na velocidade zero. Decai exponencialmente para zero assim que o pistão começar a se mover;

Força de carga

A força que é verdadeiramente aplicada a uma carga presa à haste do pistão é chamada aqui força de carga, e é definida como a diferença entre a força

hidráulica produzida pela pressão de carga e as forças ff perdidas através do atrito, isto é:

$$f = f_h - f_f \quad (2.29)$$

onde, f é a força de carga [N].

A dinâmica da força de carga pode ser expressa derivando a Equação 2.29. Tendo em conta as Equações 2.19, 2.20 e 2.27, e considerando apenas o atrito viscoso, a dinâmica de força de carga pode ser escrito como:

$$\begin{aligned} \dot{f} &= \dot{f}_h - B\ddot{x}_p = \\ &= \begin{cases} -\beta_e A_p^2 \left(\frac{1}{v_a} + \frac{\alpha^2}{v_b} \right) \dot{x}_p - B\ddot{x}_p + \beta_e A_p K_v \left(\frac{\sqrt{p_s - p_a}}{v_a} + \frac{\alpha \sqrt{p_b - p_t}}{v_b} \right) u_v, & u_v > 0. \\ -\beta_e A_p^2 \left(\frac{1}{v_a} + \frac{\alpha^2}{v_b} \right) \dot{x}_p - B\ddot{x}_p + \beta_e A_p K_v \left(\frac{\sqrt{p_a - p_t}}{v_a} + \frac{\alpha \sqrt{p_s - p_b}}{v_b} \right) u_v, & u_v < 0. \end{cases} \end{aligned} \quad (2.30)$$

2.4.5 Modelo linearizado de Atuadores Hidráulicos

Um modelo linear pode ser muito útil para entender as características do sistema através do uso de ferramentas de sistema linear, como funções de transferência, lugar das raízes e diagrama de bode. Essas ferramentas também ajudam a projetar controladores lineares simples, como um controlador PID bem conhecido.

Neste tópico, o modelo não-linear descrito na seção anterior será linearizado em torno de um ponto de operação $P_\phi = (p_{a\phi}, p_{b\phi}, u_{v\phi})$. O mais comum ponto de operação usado na literatura para linearizar a dinâmica hidráulica não-linear é $P_\phi = (\frac{p_s}{2}, \frac{p_s}{2}, 0)$ (2). As pressões de operação $p_{a\phi}$ e $p_{b\phi}$, neste caso, são os mesmos e mantêm um cilindro simétrico em equilíbrio, isto é, com pressão de carga $p_{l\phi} = 0$.

Para um cilindro assimétrico, para alcançar um equilíbrio de força, as pressões de operação não podem ser os mesmos, uma vez que as áreas do êmbolo efetivo são diferentes. Assim, mais ponto de operação conveniente pode ser definido como $P_\phi = (\frac{\alpha p_s}{1+\alpha}, \frac{p_s}{1+\alpha}, 0)$. Com estas novas pressões $p_{a\phi}$ e $p_{b\phi}$, a pressão de carga $p_{l\phi}$ para um cilindro assimétrico é zero e o cilindro está em equilíbrio. Para $\alpha = 1$ (cilindro simétrico) a operação anterior ponto P_ϕ é obtido.

Em relação à posição da bobina da válvula de operação, $u_{v\phi} = 0$ é normalmente escolhido sabendo que a maioria das válvulas tem abertura simétrica e o carretel está se movendo principalmente em torno dessa posição nula.

Coeficientes das válvulas

Para linearizar as equações de vazão das câmaras descritas nas Equações 2.19 e 2.20, estas são expandidas utilizando série de Taylor sobre o ponto de equilíbrio P_ϕ e truncado após o primeiro termo diferencial (3):

$$\Delta q_a = K_{qa}\Delta u_v - K_{ca}\Delta p_a \quad (2.31)$$

$$\Delta q_b = K_{qb}\Delta u_v - K_{cb}\Delta p_b \quad (2.32)$$

Os termos K_{qa}, K_{qb} , K_{ca} e K_{cb} fazem parte dos chamados coeficientes de válvula. Esses coeficientes representam as principais características de uma válvula e podem ser definidos como:

$$K_{qa} = \left. \frac{\partial q_a}{\partial u_v} \right|_{P_\phi} = \begin{cases} K_v \sqrt{p_s - p_{a\phi}}, & u_v > 0. \\ K_v \sqrt{p_{a\phi} - p_t}, & u_v < 0. \end{cases} \quad (2.33)$$

$$K_{qb} = \left. \frac{\partial q_b}{\partial u_v} \right|_{P_\phi} = \begin{cases} K_v \sqrt{p_{b\phi} - p_t}, & u_v > 0. \\ K_v \sqrt{p_s - p_{b\phi}}, & u_v < 0. \end{cases} \quad (2.34)$$

$$K_{ca} = - \left. \frac{\partial q_a}{\partial p_a} \right|_{P_\phi} = \begin{cases} \frac{K_v u_{v\phi}}{2\sqrt{p_s - p_{a\phi}}}, & u_v > 0. \\ \frac{-K_v u_{v\phi}}{2\sqrt{p_{a\phi} - p_t}}, & u_v < 0. \end{cases} \quad (2.35)$$

$$K_{cb} = - \left. \frac{\partial q_b}{\partial p_b} \right|_{P_\phi} = \begin{cases} \frac{-K_v u_{v\phi}}{2\sqrt{p_{b\phi} - p_t}}, & u_v > 0. \\ \frac{K_v u_{v\phi}}{2\sqrt{p_s - p_{b\phi}}}, & u_v < 0. \end{cases} \quad (2.36)$$

K_{qa} e K_{qb} são chamados de ganhos de vazão. Eles descrevem quanto fluxo é produzido para uma certa abertura da válvula. Eles também afetam diretamente o ganho de malha aberta em um sistema e, portanto, sua estabilidade. Os coeficientes de pressão de vazão (vazão-pressão) K_{ca} e K_{cb} caracterizam o vazamento na válvula, isto é, como o fluxo é influenciado por uma mudança na pressão. Eles afetam diretamente o amortecimento da combinação do atuador da válvula (3).

Outra característica importante da válvula é a sensibilidade à pressão (ou ganho de pressão, dado em Pa/V), que é definida como:

$$K_{pa} = \left. \frac{\partial p_a}{\partial u_v} \right|_{P_\phi} = \frac{K_{qa}}{K_{ca}} \begin{cases} \frac{2K_v(p_s - p_{a\phi})}{u_{v\phi}}, & u_v > 0. \\ \frac{-2K_v(p_{a\phi} - p_t)}{u_{v\phi}}, & u_v < 0. \end{cases} \quad (2.37)$$

$$K_{pb} = \left. \frac{\partial p_b}{\partial u_v} \right|_{P_\phi} = \frac{K_{qb}}{K_{cb}} \begin{cases} \frac{-2K_v(p_{b\phi} - p_t)}{u_{v\phi}}, & u_v > 0. \\ \frac{2K_v(p_s - p_{b\phi})}{u_{v\phi}}, & u_v < 0. \end{cases} \quad (2.38)$$

Observe que para uma válvula ideal na posição nula ($u_{v\phi} = 0$), os coeficientes de vazão-pressão são teoricamente nulos ($K_{ca} = K_{cb} = 0$) e os ganhos de pressão são infinitos ($K_{pa} = K_{pb} = \infty$).

Restrições de estado estacionário e volume constante

O modelo linear mais comum encontrado na literatura para descrever a força dinâmica produzida por um cilindro hidráulico baseia-se nos seguintes relações de fluxo em estado estacionário:

$$q_a = A_p \dot{x}_p \quad (2.39)$$

$$q_b = \alpha A_p \dot{x}_p \quad (2.40)$$

Combinando estas equações de estado estacionário com a Equações 2.19 e 2.20, e assumindo p_s e p_t constante, as pressões p_a e p_b podem ser linearizadas em função da pressão de carga p_l como:

$$\Delta p_a = \frac{1}{1 + \alpha^3} \Delta p_l \quad (2.41)$$

$$\Delta p_b = \frac{-\alpha^2}{1 + \alpha^3} \Delta p_l \quad (2.42)$$

Outra simplificação comum feita na literatura durante a linearização é supor que os volumes do cilindro v_a e v_b sejam constantes. Esta é uma suposição válida se a velocidade do pistão $\dot{x}_{p\phi}$ e a abertura da válvula $u_{v\phi}$ no ponto de operação forem ambas nulas.

Assim, considerando v_a e v_b constantes, a força hidráulica (Equação 2.27) pode ser linearizado como:

$$\begin{aligned} \Delta \dot{f}_h = & \left. \frac{\partial \dot{f}_h}{\partial q_a} \right|_{P_{\mathcal{O}}} \Delta q_a + \left. \frac{\partial \dot{f}_h}{\partial q_b} \right|_{P_{\mathcal{O}}} \Delta q_b + \left. \frac{\partial \dot{f}_h}{\partial \dot{x}_p} \right|_{P_{\mathcal{O}}} \Delta \dot{x}_p = \\ & \frac{A_p \beta_e}{v_{a\mathcal{O}}} (\Delta q_a - A_p \Delta \dot{x}_p) - \frac{\alpha A_p \beta_e}{v_{b\mathcal{O}}} (-\Delta q_b + \alpha A_p \Delta \dot{x}_p) \end{aligned} \quad (2.43)$$

onde,

$v_{a\phi}$ volume da câmara a no ponto de operação [m^3];

$v_{b\phi}$ volume da câmara b no ponto de operação [m^3];

Tendo em vistas as relações lineares para vazão (Equação 2.31 e Equação 2.32) e pressões (Equação 2.41 e Equação 2.42), a dinâmica da força hidráulica linear pode ser escrita como:

$$\Delta \dot{f}_h = K_{\dot{x}_p} \Delta \dot{x}_p + K_{u_v} \Delta u_v + K_{f_h} \Delta f_h \quad (2.44)$$

onde as constantes lineares $K_{\dot{x}_p}$, K_{u_v} e K_{f_h} são definidas como:

$$K_{\dot{x}_p} = -A_p^2 \beta_e \left(\frac{1}{v_{a\oslash}} + \frac{\alpha^2}{v_{b\oslash}} \right) \quad (2.45)$$

$$K_{u_v} = A_p \beta_e \left(\frac{K_{qa}}{v_{a\oslash}} + \frac{\alpha K_{qb}}{v_{b\oslash}} \right) \quad (2.46)$$

$$K_{f_h} = \frac{\beta_e}{1 + \alpha^3} \left(\frac{K_{ca}}{v_{a\oslash}} - \frac{\alpha^3 K_{cb}}{v_{b\oslash}} \right) \quad (2.47)$$

A transformada de Laplaca na Equação 2.44 pode ser representada como um diagrama de blocos apresentado na Figura 2.25. A carga inercial possui massa M_l . O atrito do cilindro B foi adicionado ao atrito de carga B_l . Neste modelo, este atrito de carga não pode ser desprezado neste modelo hidráulico. Além disso, se a dinâmica do carretel da válvula mostrado na Equação 2.16 é levado em conta, a seguinte função de transferência pode ser escrita:

$$\frac{\Delta f_h(s)}{\Delta u(s)} = \left(\frac{1}{\frac{1}{\omega_v^2} s^2 + \frac{2D_v}{\omega_v} s + 1} \right) \left(\frac{K_{u_v} (M_l s + B_l + B)}{(s - K_{f_h})(M_l s + B_l + B) - K_{\dot{x}_p}} \right) \quad (2.48)$$

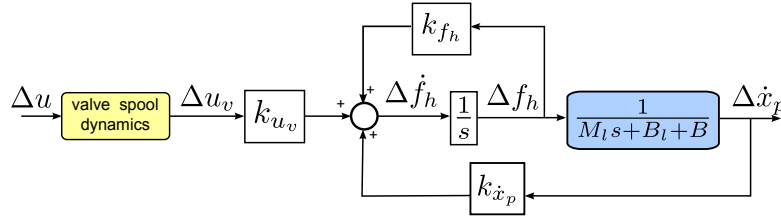


Figura 2.25: Diagrama de blocos da dinâmica da força hidráulica. A carga, representada pelo bloco azul, foi modelado como uma massa constante M_l . O atrito do cilindro B foi adicionado à carga de atrito B_l desde a haste pode ser considerado parte da carga quando um força hidráulica f_h é aplicada.

Uma vez a dinâmica da força hidráulica linear, mostrada na Equação 2.43, foi obtido, a dinâmica da força de carga linear pode ser finalmente escrita usando a relação apresentada na Equação 2.30, onde somente a fricção viscosa B do cilindro é considerada.

$$\Delta \dot{f} = K_{\dot{x}_p} \Delta \dot{x}_p + K_{u_v} \Delta u_v + K_{f_h} \Delta f_h - B \Delta \ddot{x}_p \quad (2.49)$$

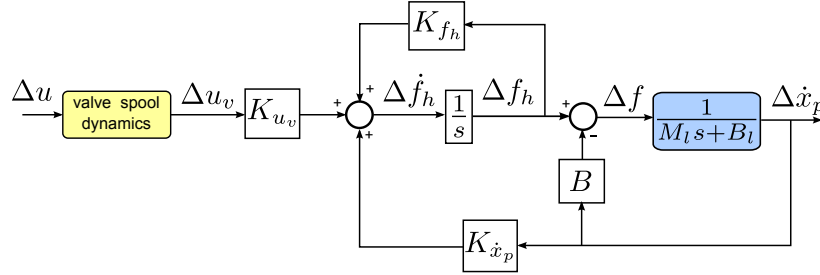


Figura 2.26: Diagrama de blocos para a força de carga linearizada.

Novamente, aplicando a transformada de Laplace à Equação 2.49, o diagrama de blocos mostrado na Figura 2.26 pode ser obtido. Neste diagrama de blocos, o atrito do cilindro B foi separado da dinâmica de carga. Assim, o bloco de dinâmica de carga mostra apenas carga de atrito B_l , que é derivado principalmente de rolamentos. Considerando a dinâmica do carretel da válvula, a seguinte função de transferência pode ser escrita:

$$\frac{\Delta f(s)}{\Delta u(s)} = \left(\frac{1}{\frac{1}{\omega_v^2} s^2 + \frac{2D_v}{\omega_v} s + 1} \right) \left(\frac{K_{u_v}(M_l s + B_l)}{(s - K_{f_h})(M_l s + B_l + B) - K_{\dot{x}_p}} \right) \quad (2.50)$$

$$\frac{\Delta f(s)}{\Delta u(s)} = \left(\frac{1}{\frac{1}{\omega_v^2} s^2 + \frac{2D_v}{\omega_v} s + 1} \right) \left(\frac{K_{u_v}(M_l s + B_l)}{(s - K_{f_h})(M_l s + B_l + B) - K_{\dot{x}_p}} \right) \quad (2.51)$$

Capítulo 3

Pneumática

”Pelas razões mencionadas e à vista, posso chegar à conclusão de que o homem dominará e poderá elevar-se sobre o ar mediante grandes asas construídas por si, contra a resistência da gravidade”.

A frase, de Leonardo Da Vinci, demonstra apenas uma das muitas possibilidades de aproveitamento do ar na técnica, o que ocorre hoje em dia em grande escala. Como meio de racionalização do trabalho, o ar comprimido vem encontrando, cada vez mais, campo de aplicação na indústria, assim como a água, a energia elétrica, etc (8).

O termo ”Pneumática” derivada dos termos grego *pneuma* e *thike*, que significam, respectivamente, ”fôlego, sopro” e ”arte, técnica”. Portanto, temos que pneumática é a ciência e tecnologia que trata do uso do ar ou gases neutros como meio de transmissão de potência.

Os equipamentos pneumáticos são robustos e de simples instalação, possuindo apenas limitações referentes à necessidade preparação do ar comprimido (fluido de utilização), limitações de pressão e velocidades de trabalho. Assim, podem ser aplicados em ambientes hostis, como aqueles sujeitos à poeira, umidade, meios corrosivos e explosivos.

3.1 Introdução a sistemas pneumáticos

O primeiro tópico importante a ser apresentado sobre os sistemas pneumáticos, é sobre o seu fluido: o ar.

Há duas características do ar que o torna um fluido de importante uso: ele pode escoar e se deformar. À partir destas características, pode-se citar algumas propriedades do ar (8):

- 1 Compressibilidade:** o ar permite reduzir o seu volume quando sujeito à ação de uma força externa. Para gases ideais, a relação da Equação 3.1 é válida.;
- 2 Elasticidade:** propriedade que possibilita ao ar voltar ao seu volume inicial uma vez extinto o efeito (força) responsável pela redução do volume. Pode-se utilizar também a equação 3.1 para prever a variação, no caso de gases ideais;
- 3 Difusibilidade:** propriedade do ar que lhe permite misturar-se homogeneamente com qualquer meio gasoso que não esteja saturado;
- 4 Expansibilidade:** propriedade do ar que lhe possibilita ocupar totalmente o volume de qualquer recipiente, adquirindo o seu formato;

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (3.1)$$

Outro ponto importante a ser apresentado é velocidade do som. Esta representa um limite na velocidade de propagação de ondas de pressão (onda longitudinal não eletromagnética). Portanto, em um meio material, nenhuma onda longitudinal poderá apresentar uma velocidade maior que a do som naquele meio.

Vazão em válvulas

Complementando o que foi apresentado sobre a velocidade do som, aplicando em situações próprias de sistemas pneumáticas, é interessante abordar o tema da vazão em válvulas.

A máxima vazão mássica que pode passar através de qualquer área ocorre à velocidade do som. À partir deste ponto, como pode ser observado na Figura 3.1, não se consegue aumentar a vazão com a redução da pressão e, portanto, o escoamento é chamado de "bloqueado" (igualdade entre a velocidade do escoamento e a velocidade do som no meio). Também é conhecido como fenômeno da saturação, apresentado na Figura 3.2.

No ponto de crítico, onde a velocidade do escoamento se iguala à velocidade do som no meio, a relação de pressão é dada pela Equação 3.2, cujo intervalo de valores na prática é $0,2 < b < 0,45$.

$$b = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)_{cr} \quad (3.2)$$

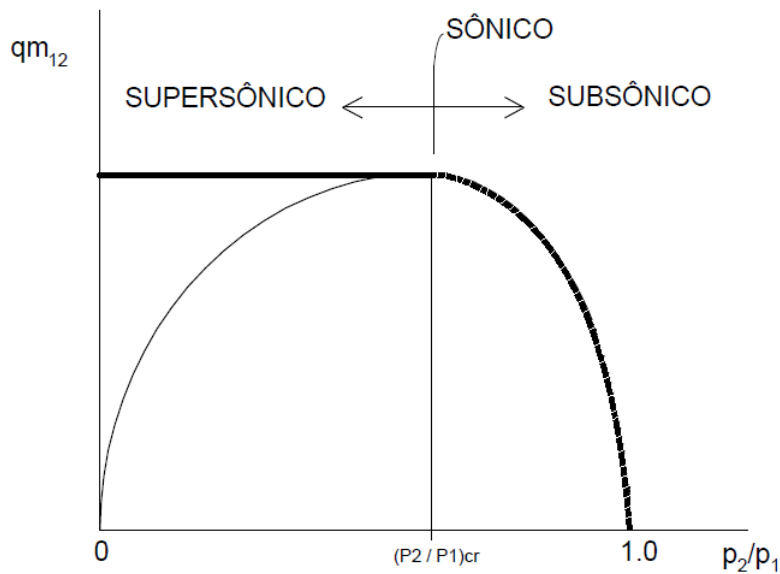


Figura 3.1: Curva de escoamento em válvulas pneumáticas. A linha puramente em negrito indica o comportamento real do escoamento, a linha mais fina indica o comportamento teórico e a linha riscada em negrito indica ambos comportamentos.

Vantagens e Desvantagens da pneumática]

Assim como os sistemas hidráulicos, os sistemas pneumáticos possuem também vantagens e desvantagens que determinam a escolha deste tipo de sistema ou não. Nos esquemas abaixo, lista-se essas características:

- + O fluido (ar comprimido) é de fácil acesso, isto é, existe em grande abundância;
- + Fácil garantia de limpeza;
- + Facilidade de distribuição;
- + Baixo custo;
- + Não inflamável e, portanto, proporciona maior segurança;
- + Apresenta grande faixa de velocidade e permite altas velocidades;

- Compressibilidade do ar;
- Força limitada;
- Elevada poluição sonora;

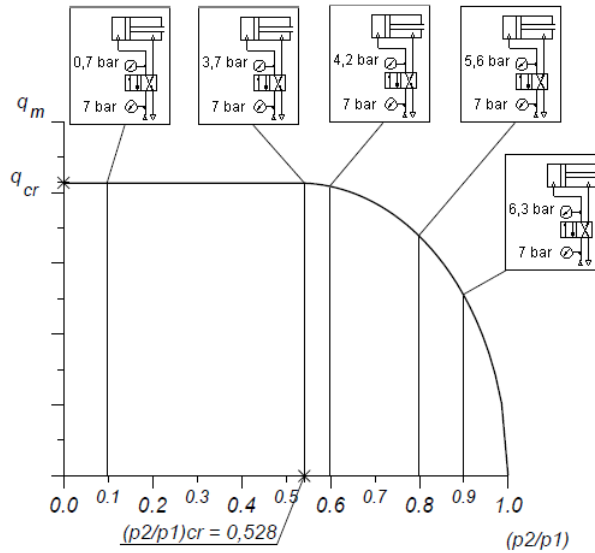


Figura 3.2: Curva de escoamento em válvulas pneumáticas, com foco nas diferenças de pressões entre entrada e saída destas.

3.2 Circuitos e Componentes

O circuito básico pneumático é composto por um sistema de potência (Produção e condicionamento do fluido) e por um sistema de atuação. Aquele engloba um compressor, reservatório de ar comprimido e um equipamento composto por filtro regulador e lubrificador; já este, é composto de válvula(s) e atuador(es).

A Figura 3.3 apresenta uma esquematização do sistema responsável pela pressurização do ar, pelo seu armazenamento e seu condicionamento ideal, isto é, filtrar e secar o ar.

Na sequência, o ar comprimido que sai deste sistema de geração, ele vai para uma rede de distribuição (unidade de condicionamento) responsável por filtrar, secar e controlar a pressão do ar que passará a circular no sistema pneumático. A Figuras 3.4 e 3.5 apresentam a imagem real da rede e a simbologia pneumática, respectivamente.

Já dentro do circuito, outro componente fundamental e presente nos circuitos pneumáticos (assim como nos hidráulicos) são as válvulas. Tomando a mesma analogia de classificação no capítulo de hidráulica, basta identificarmos os orifícios através de duas normas: DIN 24300 e ISO 1219, conforme pode ser observado na Figura 3.6 abaixo:

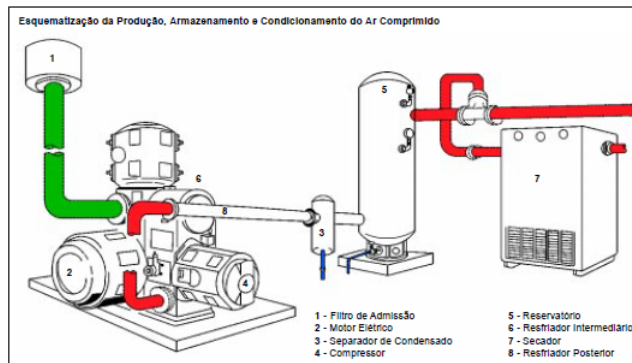


Figura 3.3: Esquemática da Produção, Armazenamento e Condicionamento do Ar Comprimido. (8)



Figura 3.4: Unidade de Condicionamento ou Lubrefil (8)

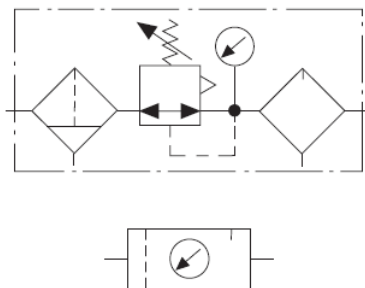


Figura 3.5: Simbologia da unidade de condicionamento (8)

A Figura 3.7 mostra um modelo de válvula direcional comumente utilizado na pneumática: válvula duplamente acionada pneumaticamente (Piloto posi-

Orifício Norma DIN 24300				Norma ISO 1219		
Pressão	P			1		
Utilização	A	B	C	2	4	6
Escape	R	S	T	3	5	7
Pilotagem	X	Y	Z	10	12	14

Figura 3.6: Tabela de identificação dos orifícios de uma válvula direcional (8)

tivo), isto é, para a troca de posição é necessária o fornecimento de pressão (alimentação) de um das portas pneumáticas "12" ou "14". Outros tipos de acionamentos, podem ser consultados no Apêndice A.

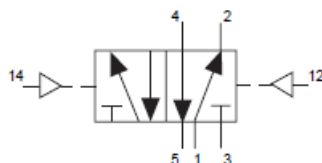


Figura 3.7: Válvula direcional comumente utilizada em circuitos pneumáticos.

Além das válvulas direcionais (e também daquelas com sensores de fim de curso: Figura 3.8), existem as válvulas auxiliares. Dentre elas, pode-se citar a válvula de retenção com mola, válvula de isolamento (Elemento "OU"), válvula de simultaneidade (Elemento "E") e válvula de controle de fluxo.

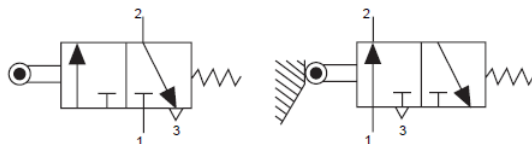


Figura 3.8: Válvula auxiliar com sensores de fim de curso. (8)

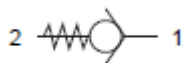


Figura 3.9: Válvula de Retenção com Mola, à qual permite a passagem de fluxo em apenas um único sentido. (8)

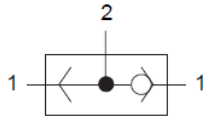


Figura 3.10: Válvula de Isolamento (Elemento OU), permitindo a passagem de fluxo de ambas os sinais "1" provindo, preferencialmente, do primeiro sinal a atingir a válvula. (8)

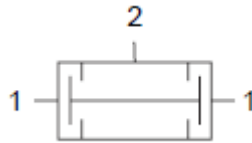


Figura 3.11: Válvula de Simultaneidade (Elemento E), permitindo a passagem de fluxo pela porta "2" apenas quando as duas portas "1" estarem pressurizadas. (8)



Figura 3.12: Válvula de Controle de Fluxo, sendo responsável pela diminuição da quantidade de ar que passa através de uma tubulação que, conseqüentemente, afeta a velocidade de um cilindro, por exemplo. (8)

Finalmente, com relação aos atuadores, assim como os hidráulicos, os pneumáticos também podem ser lineares, oscilantes, rotativos e especiais. É válido apontar que os motores pneumáticos possuem menor dimensão e peso que os motores hidráulicos, assim como os atuadores lineares.

3.3 Métodos de projeto de circuitos pneumáticos

Em todo projeto de pneumática, deve-se primeiramente observar qual é o problema abordado, isto é, determinar quais os tipos de atuadores, quantos são e qual a sequência que eles são acionados e retornados. Esta última característica é dito o Circuito sequencial do sistema e existem três tipos principais de representá-lo: sequência cronológica, sequência em forma de tabela e indicação algébrica da sequência.

Sequência cronológica Consiste em descrever, através de texto ou tópicos, as ações dos atuadores (cilindros) e a sequência destas;

Tabela Consiste em elencar as ações de cada cilindro em cada movimento numerado;

Indicação Algebrica Consiste em elencar, em uma única linha, qual o índice do cilindro ("A, B, C ..." ou "1, 2, 3 ...") e o tipo de movimento (avanço "+" e retorno "-"). Esta é a forma que mais será utilizado nesta disciplina;

3.3.1 Diagramas de Movimento

Existem basicamente dois tipos de diagramas de movimento: trajeto-passo e trajeto-tempo.

No caso do diagrama trajeto-passo, é representado a sequência de movimentos de um elemento de trabalho, levando-se ao diagrama os movimentos e as condições operacionais dos elementos de trabalho. Isto é feito através de suas coordenadas, uma representa o trajeto dos elementos de trabalho, e a outra o passo (8). A Figuras 3.13 e 3.14 representam tais diagramas.

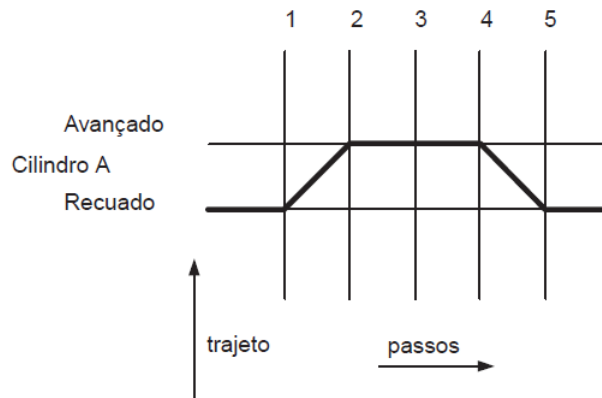


Figura 3.13: Diagrama trajeto-passo com foco na sua estrutura. (8)

Já para o Diagrama trajeto-tempo, o trajeto de uma unidade construtiva é desenhado em função do tempo (e não em função do passo). Neste caso o tempo é desenhado e representa a união cronológica na sequência, entre as distintas unidades. A Figura 3.15 representa tal diagrama para dois cilindros.

3.3.2 Tipos de Sequência

Há apenas dois tipos de sequências: sequência direta e indireta. O primeiro tipo obedece a ideia de que, primeiramente, todos avançam e retornam na mesma sequência/ordem que avançaram.

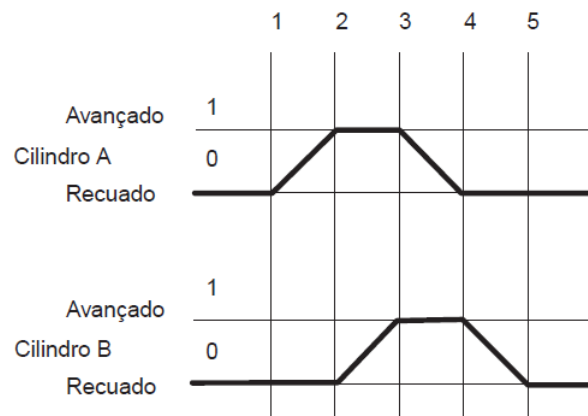


Figura 3.14: Diagrama trajeto-passo para dois cilindros em sequência direta.
(8)

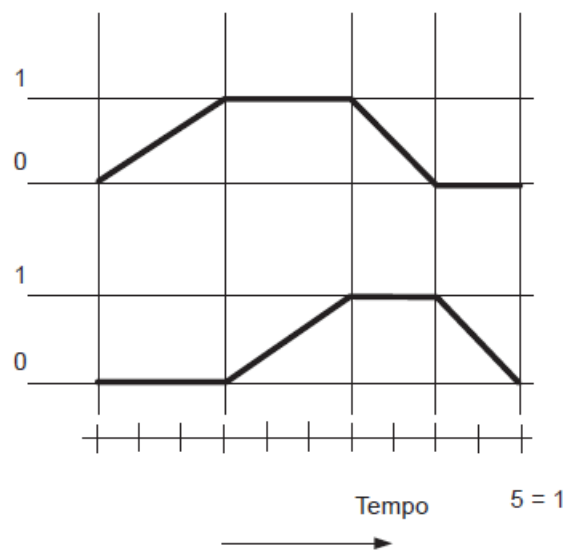


Figura 3.15: Diagrama trajeto-tempo para dois cilindros em sequência direta.
(8)

$$\begin{aligned}
 &1A + 2A + 1A - 2A - \\
 &1A + 2A + |1A - 2A - \\
 &1A2A = 1A2A
 \end{aligned}$$

Observe no esquema anterior, o cilindro 1A avançou (”+”) e, na sequência, o cilindro 2A avançou. No retorno (”), primeiramente, o cilindro 1A retornou e depois o cilindro 2A, na mesma ordem de avanço.

Já na sequência indireta, os cilindros avançam em uma sequência/ordem, entretanto, no retorno, a sequência é inversa/diferente da do avanço. Isto pode ser observado no esquema abaixo, na qual o retorno é o inverso do apresentado no esquema anterior.

$$\begin{aligned} &1A + 2A + 2A - 1A - \\ &1A + 2A + | 2A - 1A - \\ &1A 2A \neq 2A 1A \end{aligned}$$

Um outro ponto importante a ser comentado, movimentos simultâneos de dois ou mais cilindros pneumáticos implica em se colocar estes movimentos dentro de parênteses. Pode-se observar no esquema a seguir tal situação, onde os cilindros 1A e 2A retornam ao mesmo tempo:

$$1A + 2A + |(2A - 1A -) = 1A + 2A + |(1A - 2A -)$$

3.3.3 Método Intuitivo

Este é o primeiro método de projeto apresentado nestas notas de aula. Baseia-se na experiência do projetista (intuitivo) e portanto, não obedece a uma regra específica, como será visto no método cascata. Ele é aplicável a circuitos simples e de sequência direta, à fim de evitar possíveis problemas que não serão visualizados no esboço do projeto mas que poderão acarretar divergências e, em casos graves, o não-funcionamento do sistema.

A fins didáticos, apresenta-se etapas de elaboração de circuitos pneumáticos pelo método intuitivo:

Etapla 1 Elaboração do diagrama trajeto-passo com elementos de fim de curso.

Estes elementos são nomeados pela estrutura *Número do cilindro + S + Início (1) ou Fim (2) do movimento do cilindro*. Exemplo: 1S1 indicando o sensor referente ao início do cilindro 1;

Etapla 2 Desenhar e identificar os atuadores, válvulas direcionais e suas interligações. Os atuadores (cilindros pneumáticos, na maioria dos casos) são indicados por 1A, 2A, 3A etc e as válvulas direcionais, por 1V1 e 2V1 referentes aos cilindros 1A e 2A, respectivamente;

Etapla 3 Desenhar as válvulas de fim de curso/sensores com respectivas posições, e botões de partida. Tais válvulas auxiliares foram apresentadas na Figura 3.8;

Etapa 4 Desenhar as válvulas de processamento de sinais (implementa a lógica). Normalmente, utiliza-se as válvulas "E" e "OU";

Etapa 5 Inclusão de condições adicionais, como opção de ciclo único/ciclo contínuo e ações de emergência (inclusão de botão de emergência, por exemplo);

Como foi comentando anteriormente sobre problemas que podem acontecer nas elaborações de circuito pelo método intuitivo, é muito comum acontecer o problema da **contrapressão** em circuitos com sequência indireta. Isto ocorre devido ao fato que as válvulas direcionais (com dupla pilotagem pneumática) estarão sendo pressurizadas simultaneamente pelos sensores 1S1 e 2S1 (posição de recolhimento dos cilindros). Portanto, a válvula direcional 1V1 não permitirá nenhum movimento do cilindro 1A. A Figura 3.16 mostra esta situação.

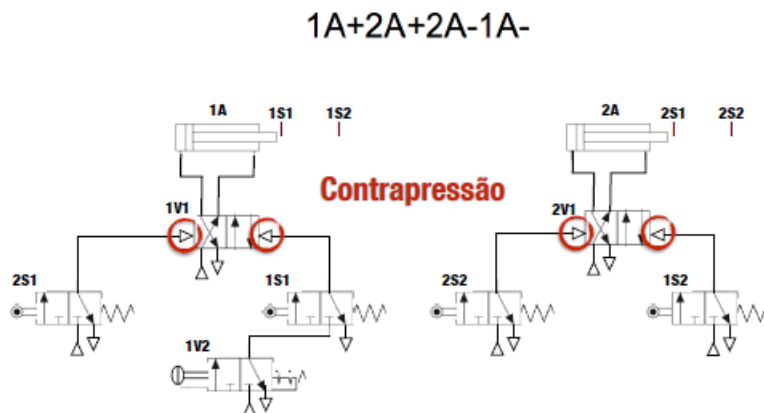


Figura 3.16: Circuito pneumático com dois cilindros (1A e 2A) em sequência indireta, com foco no problema da contrapressão.

Para complementar os assuntos aqui abordados e ter casos exemplificados, é recomendado ao leitor consultar os exemplos apresentados no capítulo 10 da apostila de Tecnologia Pneumática Industrial (8).

3.3.4 Método cascata

Diferente do método anterior, este método é sistemático, isto é, segue-se um passo-a-passo para a construção do circuito. É recomendado para a elaboração de circuitos de sequência indireta, pois elimina a possibilidade de contrapressão. Além disso, este método divide os movimentos dos cilindros em grupos de comando, como será mostrado posteriormente.

Segue a metodologia:

Etapa 1 Elaboração do diagrama trajeto-passo com elementos de fim de curso. A Figura 3.17 representa um exemplo.;

Etapa 2 Desenhar e identificar os atuadores, válvulas direcionais e suas interligações;

Etapa 3 Dividir a sequência em grupos de movimentos, sem que ocorra a repetição de movimento de qualquer atuador em um mesmo grupo. O número de linhas de pressão é igual ao número de grupos. As Figuras 3.18 e 3.19 apresentam um exemplo de sequência e suas divisões em grupos para dois e três cilindros, respectivamente.;

Etapa 4 Associar os grupos às válvulas de memória (inversoras). O número de válvulas de memória é uma unidade a menos do número de grupos, como pode ser observado na Figura 3.20. Já as Figuras 3.21, 3.22 e 3.23 apresentam casos para 1, 2 e 3 válvulas de memória, respectivamente;

Etapa 5 Interligar, apropriadamente, às linhas de pressão os elementos de sinal que realizam a comutação de posição das válvulas de comando dos diversos atuadores e das válvulas inversoras das linhas de pressão. O primeiro movimento de cada grupo é ligado diretamente da válvula direcional na linha de pressão do seu grupo. E o sensor de transição de um grupo para outro, é ligado na válvula de memória responsável para ativar o grupo posterior e tem sua alimentação provindo do grupo anterior.

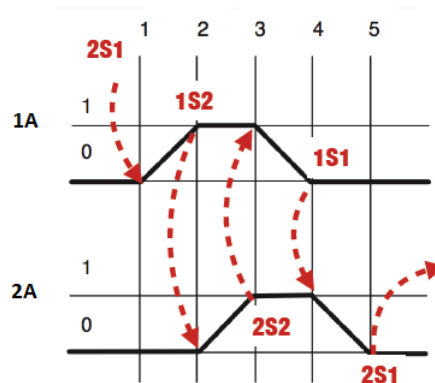


Figura 3.17: Diagrama trajeto-passo para o caso de dois cilindros em sequência direta.

Novamente, como recomendação, é interessante ao leitor verificar exemplos e casos práticos disponíveis nos materiais didáticos sobre pneumática.

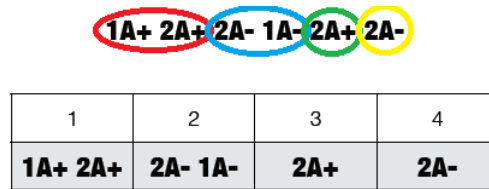


Figura 3.18: Divisão da sequência em grupos de movimento. Percebe-se que, para este caso, formou-se 4 grupos.

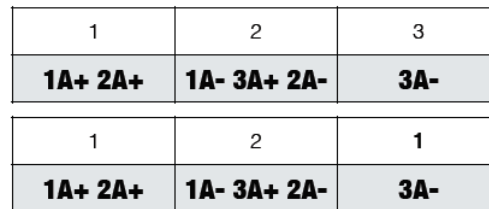


Figura 3.19: Divisão da sequência em grupos de movimento para o caso de três atuadores. Percebe-se que, como o último grupo contém apenas um elemento e o primeiro grupo não possui nenhum movimento referente ao cilindro 3, pode-se eventualmente unir o último ao primeiro grupo

Numero de válvulas memória = número de grupos - 1

$$N_m = N_G - 1$$

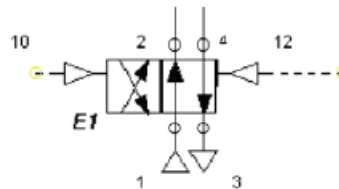


Figura 3.20: Válvula de memória padrão utilizado em circuitos pneumáticos.

3.3.5 Circuitos Eletropneumáticos

Para este assunto, encaminha-se o leitor à apostila da Parker sobre Tecnologia Eletropneumática Industrial (6), para uma leitura mais completa sobre os circuitos elétricos dentro de pneumática. Além disso, no último capítulo desta apostila, encontra-se diversos exemplos didáticos e construtivos para facilitar a aprendizagem sobre este tópico fundamental.

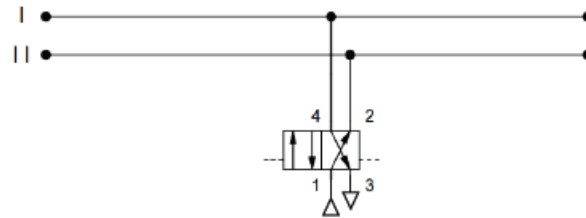


Figura 3.21: Situação de 2 linhas de pressão e 1 válvula de memória, para o caso de 2 grupos.

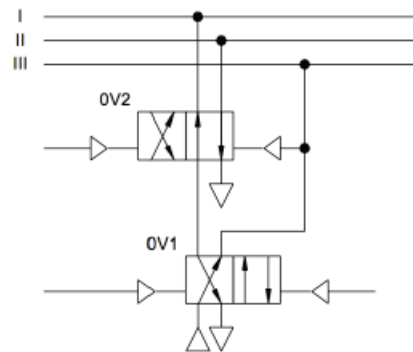


Figura 3.22: Situação de 3 linhas de pressão e 2 válvula de memória, para o caso de 3 grupos.

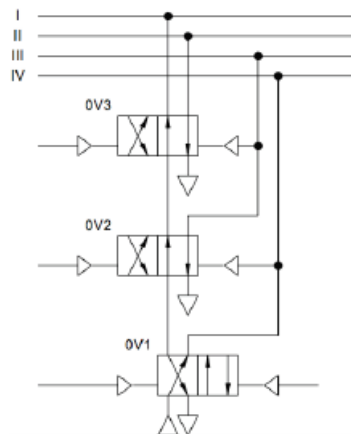


Figura 3.23: Situação de 4 linhas de pressão e 3 válvula de memória, para o caso de 4 grupos.

Capítulo 4

CLP

A eletrônica se faz presente nos sistemas hidráulicos e pneumáticos de duas formas: por um lado, por meio da disponibilização de sensores eletrônicos e de CLP's (Controladores Lógicos Programáveis) e, por outro, com a incorporação de circuitos de realimentação e compensação em válvulas.

Assim, neste capítulo será abordado informações mais detalhadas à respeito de um CLP, as principais linguagens de programação utilizadas e suas lógicas.

4.1 Introdução ao CLP

Segundo o NEMA (*National Electrical Manufacturers Association*), um CLP pode ser definido como: "aparelho eletrônico digital que utiliza uma memória programável para armazenar internamente instruções e para implementar funções específicas, tais como lógica, sequenciamento, temporização, contagem e aritmética, controlando, por meio de módulos de entradas e saídas, vários tipos de máquinas ou processos".

Houve uma longa jornada desde o surgimento do CLP, à partir da década de 60. De década para década, o CLP evoluiu tanto com relação a sua capacidade de funções, velocidade e operações; quanto em relação aos seus aspectos físicos, como tamanho e possibilidade de conexões. Além disso, foi necessário a padronização das linguagens de programação assim como os protocolos de comunicação.

Sobre as vantagens do uso do CLP em sistemas hidráulicos e pneumáticos, assim como outros tipos de sistemas industriais, pode-se citar:

- 1 Alta flexibilidade e versatilidade;
- 2 Escalabilidade;

- 3 Confiabilidade;
- 4 Menor custo para circuitos complexos;
- 5 Menor consumo de energia elétrica;
- 6 Baixo nível de ruído e inexistência de faísca;
- 7 Facilidade de configuração e programação;

4.2 Hardware

Os controladores lógicos são constituídos fisicamente por entradas, processamento e saídas. A Figura 4.1 apresenta um esquema de blocos para apresentar as divisões de um CLP, como estas se comunicam e alguns exemplos práticos.

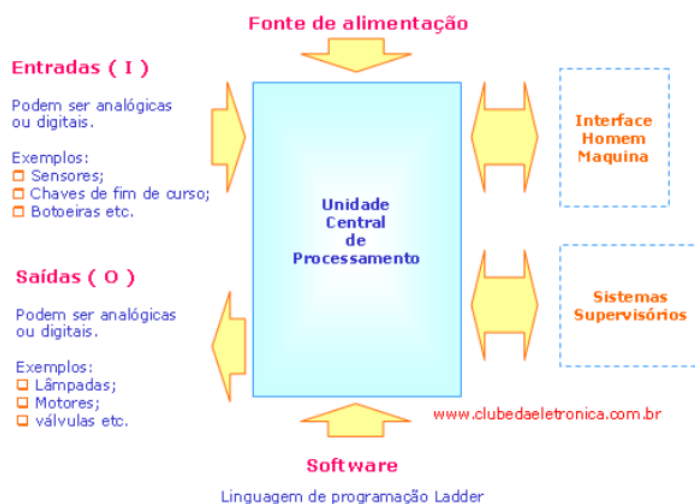


Figura 4.1: Arquitetura básica do CLP (9)

Com relação a estes blocos, a estrutura de tópicos a seguir foi retirado da apostila (9) presente na bibliografia, onde será detalhado cada elemento.

Entradas (E ou I) Os controladores lógicos programáveis, assim como o cérebro humano, necessitam receber informações de um determinado ambiente. Para receber estas informações estes equipamentos são dotados de entradas físicas que podem ser analógicas e/ou digitais;

Processamento Uma vez coletados os dados, estes devem ser processados a fim de que realizem uma determinada operação. Na unidade de processamento está gravado o *firmware*, que é o software do proprietário e controla diretamente o hardware;

Saídas (S ou O) Uma vez que as informações foram coletadas e processadas, uma atitude deve ser tomada, ou seja, um sinal elétrico que pode ser analógico ou digital será enviado a saída;

Outros itens podem ser incorporados agregando valor ao sistema de controle:

Interface Homem Máquina (HM) É o elo de ligação entre o operador e a máquina; é a parte mais amigável, ou seja, de fácil uso permitindo ao operador alterar entradas e/ou saídas do sistema, elas sendo locais ou remotas, dependendo da necessidade;

Sistemas supervisórios É uma interface gráfica que permite ao usuário coletar, monitorar e interagir com seu sistema em tempo real. É usado onde há necessidade contínua de: verificação do estado operacional da máquina; coletar valores de variáveis de processo; e gerar relatórios e gráficos de tendência;

Dentro do CLP existem quatro tipos de memórias principais: Memória do Programa Supervisor (*Firmware*), à qual armazena o programa supervisor do CLP vindo diretamente do fabricante; Memória do Usuário, à qual armazena o programa do usuário com a lógica de operação do CLP; Memória de Dados, à qual armazena valores do programa do usuário, como contadores, valores de temporizadores, códigos de erros e senhas; por fim, a Memória-Imagem das Entradas e Saídas (E/S), à qual reproduz o estado dos periféricos de E/S do CLP.

Finalmente, à respeito da CPU (Central Process Unit) do CLP, ou seja, Unidade Central de Processamento, pode-se chamá-lo também por Processador. Este elemento é responsável por gerenciar todo o sistema, controlar e executar instruções presentes na memória; e atualizar memória de dados e memória-imagem das entradas e saídas.

4.3 Linguagens de programação

Como foi citado anteriormente, ao longo do desenvolvimento inicial de CLP's, teve-se a necessidade de criar padrões para sua linguagem de programação e protocolos de comunicação. Para isso foi criado um órgão responsável pela padronização de tecnologias elétricas, eletrônicas e relacionadas: IEC (*International Electrotechnical Commission*) ou Comissão Eletrotécnica Internacional.

Mais especificamente voltado para CLP's, a norma IEC 61131 foi criada em 1992, à qual estabelece padrões para CLPs. E ainda dentro desta norma, dentre as suas oito partes, aquela voltada para as Linguagens de programação (estrutura do software do CLP, linguagens e execução de programas) é a IEC 61131-3.

As linguagens presentes na parte da norma em questão são divididas em duas categorias principais: textuais e gráficas. Dentro a primeira categoria, há a Lista de Instruções (*Instruction List*), parecida com Assembly; e Texto Estruturado (*Structured Text*), parecido com Pascal e BASIC. São linhas de códigos com expressões e comandos pré-definidos. As Figuras 4.2 e 4.3 apresentam exemplos de tais linguagens.

	Operador	Modificador	Operando	Comentário
Operações Básicas	ADD	(	Qualquer	Adição
	DIV	(	Qualquer	Divisão
	MUL	(	Qualquer	Multipliação
	SUB	(	Qualquer	Subtração
Funções	LD	N	Qualquer	Carrega operando no acumulador
	ST	N	Qualquer	Armazena acumulador no operando
Funções Lógicas	&	N, (	BOOL	E lógico
	AND	N, (	BOOL	E lógico
	OR	N, (	BOOL	OU lógico
	XOR	N, (	BOOL	OU – Exclusivo
	R		BOOL	Reseta operando para False
	S		BOOL	Seta operando para True

Figura 4.2: Tabela de operadores e seus significados utilizados em Lista de instruções.

```

STEP Aplus
  IF
    AND      Released      'B1: Clamp cylinder is released
    AND      Drill_up      'B4: Drill cylinder is up
    AND      Ej_back       'B6: Eject cylinder is back
  THEN RESET Aminus       'Y2: Release the workpiece
    SET      Aplus         'Y1: Clamp the workpiece

STEP Bplus
  IF      Clamped          'B2: Clamp cylinder has clamped
  THEN SET Driller         'Y3: Drilling cylinder

STEP Bminus
  IF      Drill_dow        'B3: Drill cylinder is down
  THEN RESET Driller       'Y3: Drilling cylinder

STEP Aminus
  IF      Drill_up         'B4: Drill cylinder is up
  THEN RESET Aplus         'Y1: Clamp the workpiece
    SET      Aminus        'Y2: Release the workpiece

STEP Cplus
  IF      Released         'B1: Clamp cylinder is released
  THEN SET Ejector         'Y3: Eject the workpiece

```

Figura 4.3: Exemplo de um programa feito em formato de Texto Estruturado.

Já a segunda categoria apresenta um aspecto mais visual e esquemático que anterior. Dentro dela, existem três linguagens principais: Diagrama de Relés (*Ladder Diagram*), que será abordado posteriormente com mais detalhes; Diagrama de Blocos Funcionais, dando enfoque em blocos com as funções *or* e *and*; e Funções Gráficas de Sequenciamento, à qual apresenta blocos sequenciais ligados por setas direcionais e funcionais. As Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 apresentam exemplos de tais linguagens.

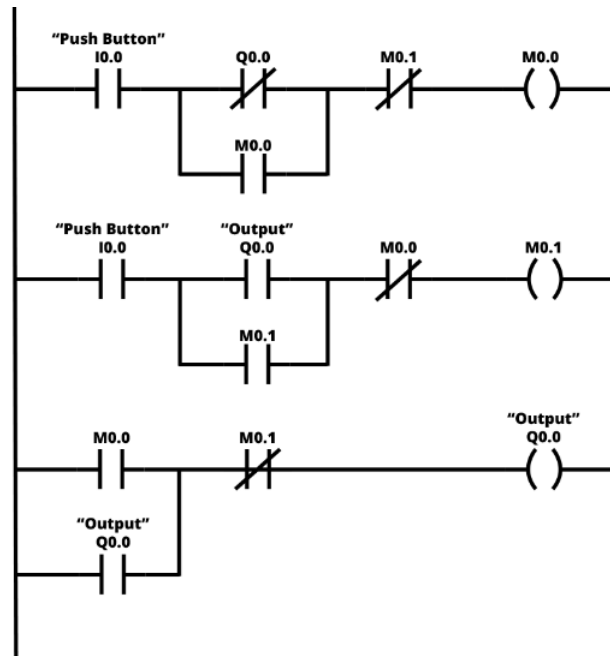


Figura 4.4: Exemplo de um programa feito em formato de Diagrama de Relés.

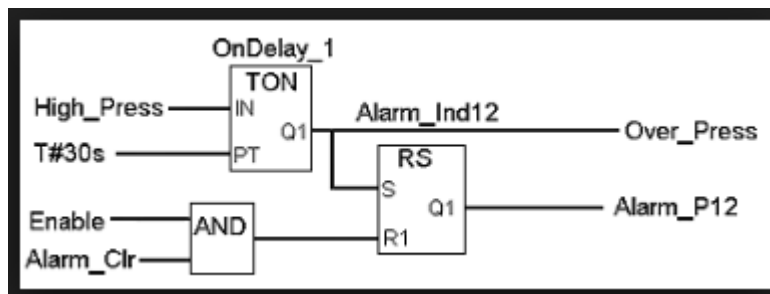


Figura 4.5: Exemplo de um programa feito em formato de Diagrama de Bloco Funcionais.

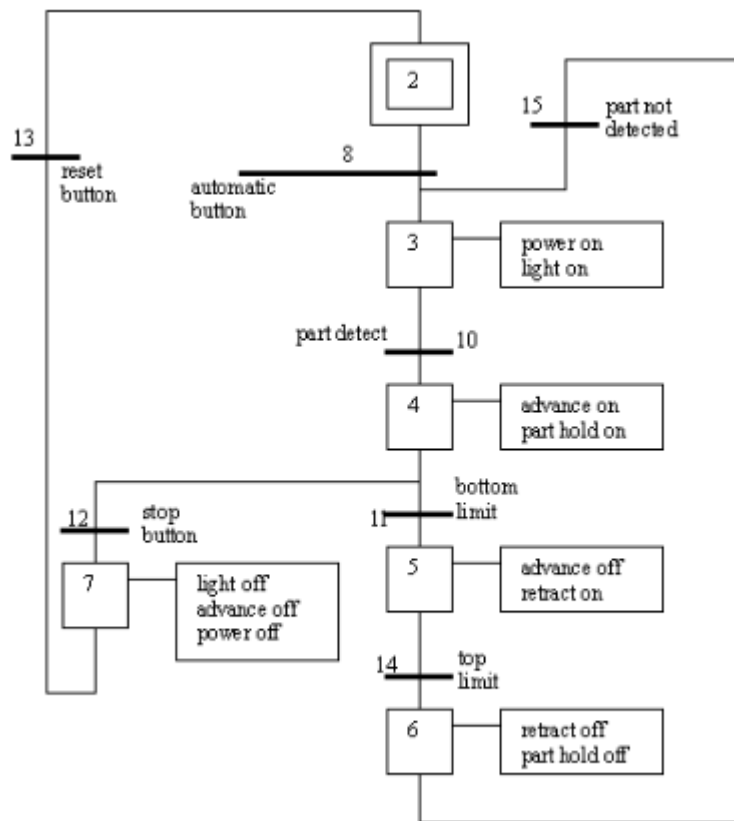


Figura 4.6: Exemplo de um programa feito em formato de Funções Gráficas de Sequenciamento.

4.3.1 Ladder Diagram

Também conhecido como o Diagrama de Escada, o Diagrama Ladder é baseado na lógica de contatos a relés, assim como foi apresentado no capítulo de hidráulica, no tópico de circuitos eletrohidráulicos.

Os principais elementos presentes em sua estrutura, podem ser vistos na Tabela 4.1 à seguir.

À respeito dos elementos, tem-se o esquema abaixo detalhando o funcionamento destes dentro de programas e lógicas de clp:

NA Tal contato está fechado quando a variável booleana associada (nome do contato) é verdadeira, caso contrário, ele está aberto;

Nome	Imagem
Contato Normalmente Aberto (NA)	
Contato Normalmente Fechado (NF)	
Saída Lógica Direta	
Saída Lógica Inversa	

Tabela 4.1: Principais elementos do Diagrama Ladder

NF Tal contato está aberto quando a variável booleana associada é verdadeira, caso contrário, ele está fechado;

Saída direta A bobina normalmente aberta fica energizada quando a variável booleana associada é verdadeira.;

Saída inversa A bobina normalmente fechada fica energizada quando a variável booleana associada é falsa.;

A Figura 4.7 apresenta a estrutura básica que aloja os elementos, os quais, juntos, irão formar o Diagrama Ladder propriamente dito.

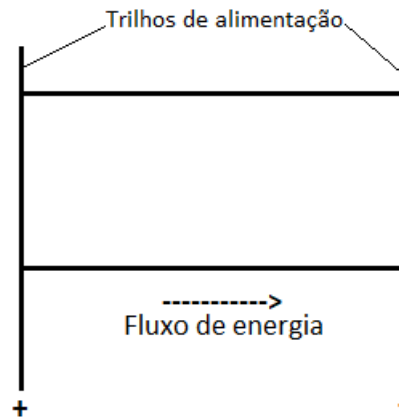


Figura 4.7: Estrutura básica de um Diagrama Ladder

Para fins didáticos, pode-se fazer uma comparação de circuitos eletrohidráulicos com o programas em Ladder. Na Figura 4.8, por exemplo, é feito uma analogia entre o circuito elétrico para o circuito hidráulico com seu respectivo programa

em Ladder, à fim de realizar as mesmas ações porém de maneiras diferentes, sendo a primeira em sistema elétrico e a segunda com o uso de CLP.

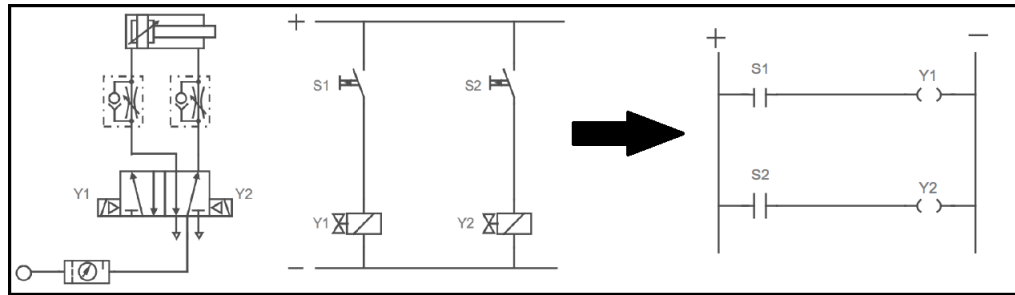


Figura 4.8: Exemplo de analogia entre circuitos eletrohidráulicos e programa feito em Diagrama Ladder.

4.4 Álgebra Booleana

Álgebra Booleana é uma estrutura algébrica que "capta as propriedades essenciais" dos operadores lógicos e de conjuntos, ou ainda oferece uma estrutura para se lidar com "afirmações". Tal termo é uma homenagem ao matemático inglês George Boole.

É criada em cima de lógica binária, isto é, de 1 ou 0 (Verdadeiro ou Falso, respectivamente). A Figura 4.9 apresenta as principais funções lógicas presentes dentro da álgebra booleana, que serão detalhadas posteriormente.

AND	$\begin{matrix} A \\ B \end{matrix} \rightarrow \text{AND} \rightarrow S$	$S = A \cdot B$
NORAND	$\begin{matrix} A \\ B \end{matrix} \rightarrow \text{NORAND} \rightarrow S$	$S = \overline{A \cdot B}$
OR	$\begin{matrix} A \\ B \end{matrix} \rightarrow \text{OR} \rightarrow S$	$S = A + B$
NOR	$\begin{matrix} A \\ B \end{matrix} \rightarrow \text{NOR} \rightarrow S$	$S = \overline{A + B}$
NOT	$A \rightarrow \text{NOT} \rightarrow S$	$S = \overline{A}$

Figura 4.9: Principais funções lógicas dentro da álgebra booleana.

Tal álgebra é utilizada dentro dos diagramas Ladder para simbolizar quais entradas influenciam (diretamente e/ou inversamente) a saída, dentro de várias outras entradas. Além do desenho esquemático e da expressão lógica vistos na

Figura 4.9, existe ainda a **Tabela Verdade**, que representa a resposta da saída mediante variações entre "0" ou "1" das entradas.

Sobre a tabela verdade: é uma tabela onde são pressupostas todas as condições possíveis de entrada do sistema e, de acordo com estas entradas, a saída poderá ser verdadeira ou não. O número de condições possíveis das entradas depende do número de entradas, podendo ser calculado pela seguinte expressão:

$$\text{Condições possíveis} = 2^{n^{\circ} \text{ de entradas}} \quad (4.1)$$

As Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 apresentam as representações completas das três principais funções lógicas que serão utilizadas dentro dos diagramas Ladder.

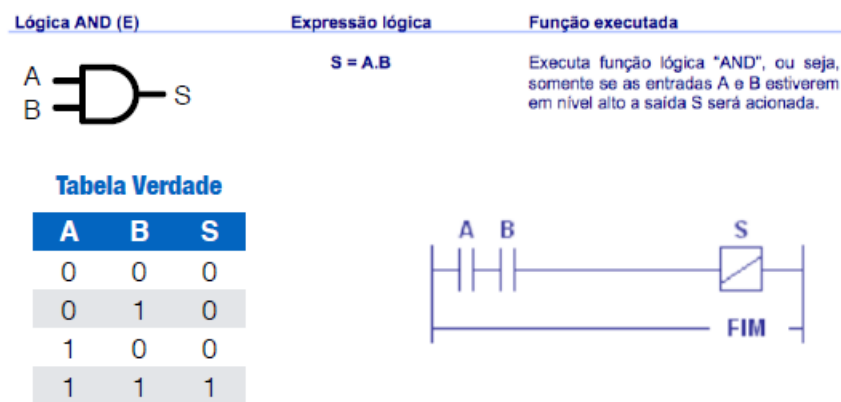


Figura 4.10: Lógica "E"

Das Figuras anteriores, serão utilizados a expressão lógica, a tabela verdade e o diagrama Ladder. O esquema à seguir, apresenta uma sequência de passo-a-passo para a construção de soluções com CLP para problemas de lógicas industriais:

- 1 À partir do texto informativo à respeito do problema, deve-se extrair a lógica por trás da situação, isto é, definir quais são as entradas, as saídas e como estas são afetadas pelas primeiras. Assim, monta-se a Tabela Verdade do problema;
- 2 Extrair as expressões booleanas referentes a cada saída;
- 3 Montar o programa Ladder com todas as saídas e suas entradas lógicas;

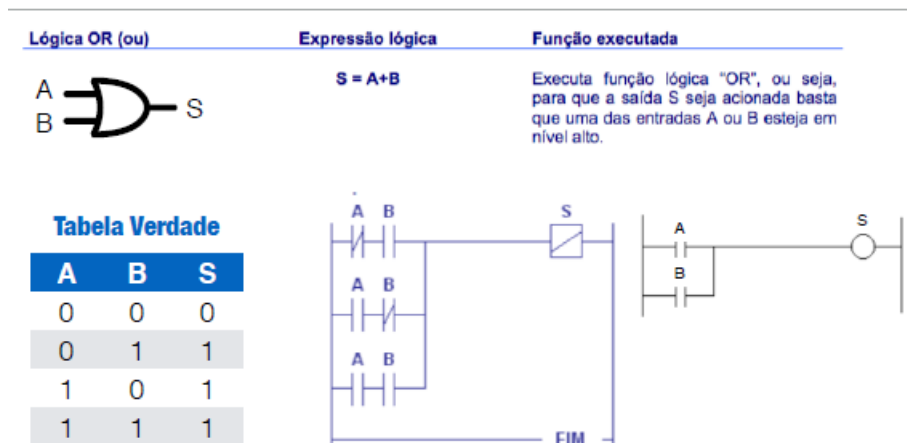


Figura 4.11: Lógica "OU"

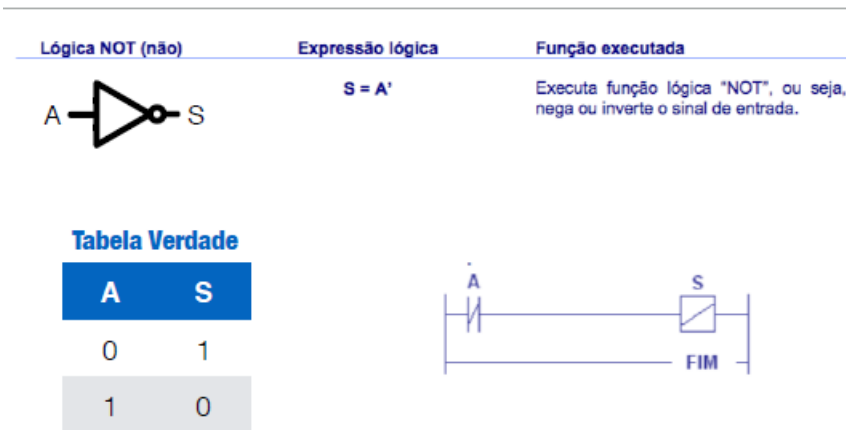


Figura 4.12: Lógica "NÃO".

4.4.1 Propriedades de álgebra Booleana

Dentro da álgebra booleana, existem propriedades que facilitaram e simplificaram os problemas e por isso devem ser apresentadas com certo nível de detalhamento. O esquema à seguir permite visualizar melhor cada uma dessas propriedades e as Figuras 4.13 e 4.14 representam, de forma esquemática, as seis propriedades básicas dentro da álgebra Booleana.

Básica 1 $S = A + 0 = A$. Ver Figura 4.13;

Básica 2 $S = A + 1 = 1$. Ver Figura 4.13;

Básica 3 $S = A + A = A$. Ver Figura 4.13;

Básica 4 $S = A + \bar{A} = A$. Ver Figura 4.14;

Básica 5 $S = A \cdot \bar{A} = 0$. Ver Figura 4.14;

Básica 6 $S = A \cdot A = A$. Ver Figura 4.14;

Comutativa $A + B = B + A$ e $A \cdot B = B \cdot A$;

Associativa $(A + B) + C = A + (B + C)$ e $(A \cdot B) \cdot C = A \cdot (B \cdot C)$;

Distributiva $A \cdot (B + C) = A \cdot B + A \cdot C$;

Teorema de Morgan $\overline{A \cdot B \cdot \dots} = \bar{A} + \bar{B} + \dots$ e $\overline{A + B + \dots} = \bar{A} \cdot \bar{B} \cdot \dots$;

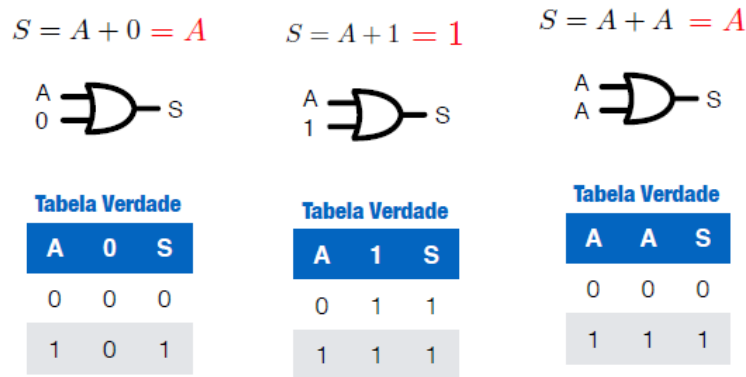


Figura 4.13: Propriedades 1, 2 e 3

Assim, à partir das propriedades anteriores, tem-se alguns exemplos de simplificações, na sequência:

$$\begin{aligned}
 &1) \\
 S &= A \cdot B + A(B + C) + B(C + B) \\
 S &= A \cdot C + B(A + A + C + B) \\
 S &= A \cdot C + B(1 + C + B) \\
 S &= A \cdot C + B(1) \\
 S &= A \cdot C + B
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$



Figura 4.14: Propriedades 4, 5 e 6

$$\begin{aligned}
 &2) \\
 &S = A \cdot B \cdot C + A \cdot \bar{C} + A \cdot \bar{B} \\
 &S = A(B \cdot C + \bar{C} + \bar{B}) \\
 &S = A(1) \\
 &S = A
 \end{aligned}$$

(4.3)

$$\begin{aligned}
 &3) \\
 &S = (A + \bar{B}) \cdot (A + C) \\
 &S = A \cdot A + A \cdot C + \bar{B} \cdot A + \bar{B} \cdot C \\
 &S = A + A \cdot C + A \cdot \bar{B} + \bar{B} \cdot C \\
 &S = A + A(C + \bar{B}) + \bar{B} \cdot C \\
 &S = A(1 + C + \bar{B}) + \bar{B} \cdot C \\
 &S = A(1) + \bar{B} \cdot C \\
 &S = A + \bar{B} \cdot C
 \end{aligned}$$

(4.4)

$$\begin{aligned}
& 4) \\
S &= A \cdot B \cdot C(A \cdot B + \bar{C} \cdot (B \cdot C + A \cdot C)) \\
S &= A \cdot B \cdot C(A \cdot B + \bar{C} \cdot C(B + A)) \\
S &= A \cdot B \cdot C(A \cdot B + 0(B + A)) \\
S &= A \cdot B \cdot C(A \cdot B + 0) \\
S &= A \cdot B \cdot C(A \cdot B) \\
S &= A \cdot A \cdot B \cdot B \cdot C \\
S &= A \cdot B \cdot C
\end{aligned}
\tag{4.5}$$

4.4.2 Mapas de Karnaugh

É uma ferramenta gráfica para simplificação de expressões lógicas, sendo feita à partir da Tabela Verdade, para cada uma das saídas.

A ideia é montar uma tabela informando qual o sinal da saída ("0" ou "1") mediante as possíveis combinações das entradas do problema. Na sequência, agrupar as saídas "1" em duplas e verificar qual(is) entrada(s) permanece(m) constante(s) e, assim, escrever a saída como soma destas duplas ou grupos. Um aspecto importante é considerar estas tabelas como "esferas" ao agrupá-las em duplas.

As Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 apresentam possíveis agrupamentos e suas respectivas expressões lógicas.

Mapa de Karnaugh

A/B	0	1
0	0	0
1	1	1

$$S = A$$

Figura 4.15: Exemplo de mapa de Karnaugh.

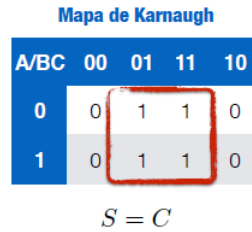


Figura 4.16: Exemplo de mapa de Karnaugh.

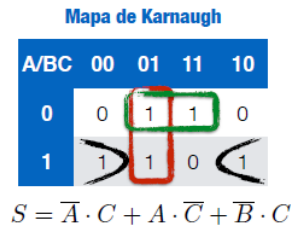


Figura 4.17: Exemplo de mapa de Karnaugh.

4.5 Máquina de Estados Finitos

É um modelo matemático usado para representar programas de computadores ou circuitos lógicos. A máquina está em apenas um estado por vez, o qual é chamado de estado atual. Um estado armazena informações sobre o passado, isto é, ele reflete as mudanças desde a entrada num estado, no início do sistema, até o momento presente. Uma transição indica uma mudança de estado e é descrita por uma condição que precisa ser realizada para que a transição ocorra. Uma ação é a descrição de uma atividade que deve ser realizada num determinado momento.

São utilizados em sistemas complexos e é de fácil transformação para ladder desde que não haja muitas ramificações, sendo este um dos motivos de utilizarmos este tipo de modelo. Uma máquina de estados é composta por estados, transições e saídas:

Estado Comporta-se como uma memória: armazena todas as informações sobre as saídas em um determinado momento. Normalmente, um estado é introduzido quando o sistema não deve reagir da mesma forma para uma mesma condição, como é o caso de ir para a "próxima" estação de rádio, sendo que a estação posterior será diferente da última colocada, por exemplo;

Transição É a condição para que ocorra a mudança de um estado para outro.

No exemplo anterior, esta condição é avançar para a "próxima" estação;

Saída Descreve a atividade que deve ser realizada num determinado estado;

A máquina de estado é representada por um diagrama bastante simplificado, conhecido como diagrama de transição de estado, que tem como objetivo facilitar o entendimento de qualquer pessoa interessada no processo.

Na sequência, será apresentado um exemplo que foi retirado da Apostila "Automação e Controle", do Clube da Eletrônica (9), de forma mais detalhada do que foi apresentada durante a sala de aula.

4.5.1 Exemplo de Sistema sequencial simples - controle de tráfego (9)

A Figura 4.18 representa o sistema presente do exemplo em questão, à partir do qual será detalhado o passo-a-passo da resolução de problemas de máquinas de estado.

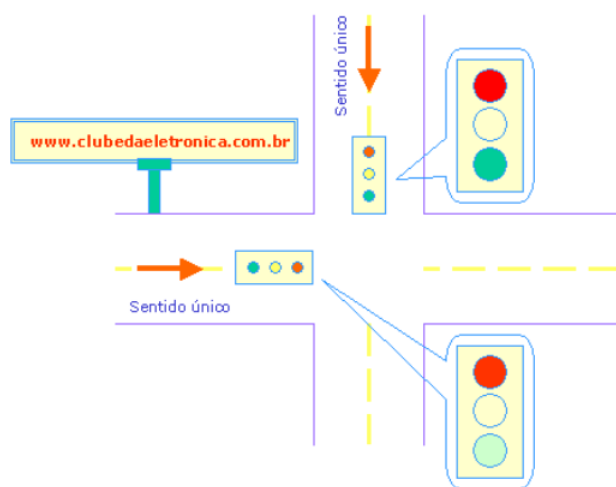


Figura 4.18: Ilustração da ideia proposta.

O esquema à seguir representa uma sequência de passos sugeridos para a resolução de problemas que envolvem máquinas de estados:

- 1 **Descrição de funcionamento:** observar o problema proposto e interpretar a situação;

- 2 Definição de entradas e saídas (I/O):** montar uma tabela onde se define as entradas e as saídas de cada atuador em questão;
- 3 Máquina de estado:** modelar o diagrama de estado para toda a situação, isto é, em uma estrutura circular, definir qual é a situação das saídas para cada atuador e as condições de transição entre os estados. Outra possibilidade, é a montagem de uma tabela de transição de estados padronizada (existem diversos modelos);
- 4 Mapas de Karnaugh:** desenvolvimento de mapas de Karnaugh para a conseqüente elaboração do Programa Ladder;
- 5 Programa Ladder:** com todas os passos realizados anteriormente, deve-se desenhar o programa ladder, o qual deverá ser fiel à máquina de estados;

Descrição de funcionamento

O semáforo terá início quando um botão (BL) tipo “push button” for acionado, dar-se-á então início ao ciclo. O tempo (T) ficará a critério do operador e o sistema poderá ser desligado em qualquer momento através de um botão (BD), também push button.

Definição de entradas e saídas

Entradas e saídas (E/S) ou *input/output* (I/O) são termos comuns na automação, isso porque, em todo sistema há necessidade da inserção de informações (I), que devem ser processadas através de uma unidade central de processamento (CPU) e enviadas às saídas (O), para que uma determinada ação, previamente programada, seja tomada.

A Tabela 4.2 mostra a lista de entradas e saídas para cada atuador.

Entradas	Saídas Semáforo 1	Saídas Semáforo 2
Botão liga = IO	Vermelho 1 = O0	Vermelho 2 = O3
Botão desliga = I1	Amarelo 1 = O1	Amarelo 2 = O4
	Verde 1 = O2	Verde 2 = O5

Tabela 4.2: Lista de entradas e saídas para os semáforos do exemplo

Elaboração da máquina de estado

O objetivo da máquina de estados é modelar através do diagrama de estado o comportamento do projeto, no caso, o controle de tráfego. Sua representação é feita com detalhes à fim de facilitar o entendimento. Na Figura 4.19 abaixo, observa-se sua representação já aplicada aos semáforos.

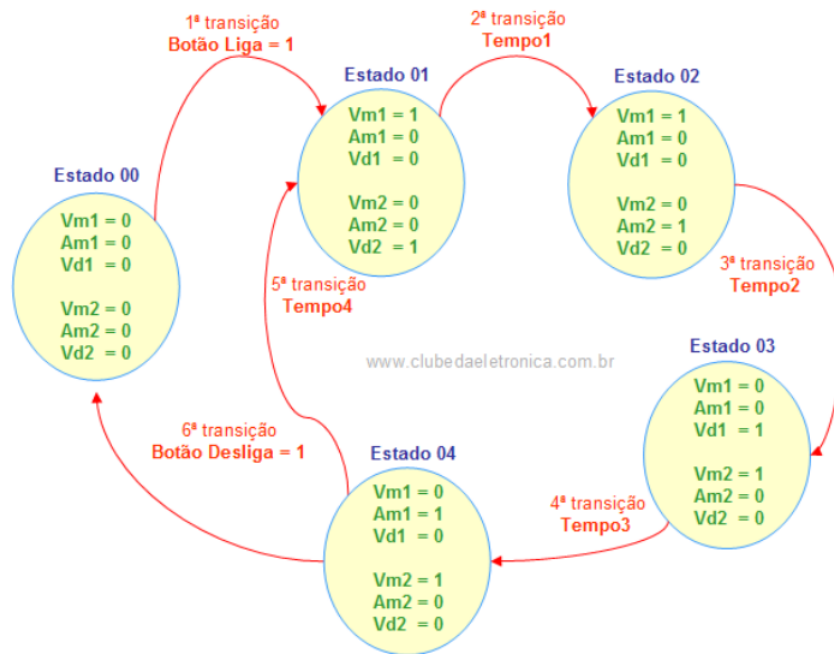


Figura 4.19: Diagrama de Estado do exemplo.

O esquema à seguir mostra uma explicação detalhada de cada estado e de suas, respectivas, transições.

Estado 00 Representa o estado inicial da máquina, ou seja, todas as saídas estão desligadas;

1º Transição Para que o sistema mude de um estado para outro, é necessário que haja o acréscimo de informações. Neste caso, o estado 01 só será ligado se o Botão Liga (BL) for acionado;

Estado 01 Representa o estado após o recebimento da informação. Neste caso, as lâmpadas Vermelho 01 e Verde 02 estarão em nível alto, ou seja, acesas enquanto que as outras estarão apagadas;

2º Transição O estado 01 permanecerá até que termine o tempo previamente estabelecido pelo projetista (Tempo1). Neste caso, o tempo representa uma transição e, por consequência, uma entrada;

Estado 02 Ao terminar o tempo estabelecido na 2ª transição, haverá mudança do estado 01 para o estado 02 e assim, suas saídas serão acionadas. Neste caso, as lâmpadas vermelho 01 e amarelo 02 estarão em nível alto, ou seja, acesas enquanto que as outras estarão apagadas;

3º Transição Mais um tempo é necessário para que ocorra a mudança de estado, ou seja, só mudará do estado 02 para o estado 03 no final do segundo tempo (Tempo2) estabelecido. Este tempo também representa uma transição e, portanto, uma entrada;

Estado 03 Ao final da 2º transição, o estado 03 é acionado, e com ele as lâmpadas verde 01 e vermelho 02 estarão em nível alto, ou seja, acesas enquanto que as outras estarão apagadas;

4º Transição Mais um tempo é necessário para que ocorra a mudança de estado, ou seja, só mudará do estado 03 para o estado 04 no final do tempo (Tempo3) estabelecido no programa;

Estado 04 Ao final da 3º transição, o estado 04 é acionado, e com ele as lâmpadas amarelo 01 e vermelho 02 estarão em nível alto, ou seja, acesas enquanto que as outras estarão apagadas;

5º Transição Um último tempo (Tempo4) é necessário para que o processo reinicie, ou seja, volta ao estado 01 fazendo com que o ciclo recomece;

6º Transição A 6ª transição tem função de parar o sistema. Note que todos os estados serão desligados simultaneamente, ou seja, o próximo estado será o estado 00. Funciona como um "botão de emergência" para o sistema;

A Figura 4.20 mostra a Tabela de transição de estados em um formato padrão. Observe que este modelo se assemelha ao modelo que será utilizado na prática de laboratório.

Estado Atual		Entradas/Varíaveis de controle								Próximo Estado		Saídas					
Nome	A	B	O	BD	BL	T1	T2	T3	T4	Nome	A	B	O	Vm 1	Vd 1	Vm 2	Vd 2
01	0	0	1	0	X	0	X	X	X	01	0	0	1	1	0	0	0
01	0	0	1	0	X	1	X	X	X	02	0	1	0	1	0	0	0
01	0	0	1	1	X	X	X	X	X	00	0	0	0	1	0	0	0
02	0	1	0	0	X	X	0	X	X	02	0	1	0	1	0	0	1
02	0	1	0	0	X	X	1	X	X	03	0	1	1	1	0	0	1
02	0	1	0	1	X	X	X	X	X	00	0	0	0	1	0	0	1
03	0	1	1	0	X	X	X	0	X	03	0	1	1	0	0	1	0
03	0	1	1	0	X	X	X	1	X	04	1	0	0	0	0	1	0
03	0	1	1	1	X	X	X	X	X	00	0	0	0	0	0	1	0
04	1	0	0	0	X	X	X	X	0	04	1	0	0	0	1	0	0
04	1	0	0	0	X	X	X	X	1	01	0	0	1	0	1	0	0
04	1	0	0	1	X	X	X	X	X	00	0	0	0	1	0	1	0

Figura 4.20: Tabela de transição de estados para o exemplo.

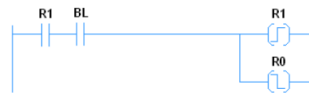
Programa Ladder

Observe que para este exemplo, não foi elaborado e/ou apresentado os mapas de Karnaugh do sistema. Passamos direto aos detalhes da lógica Ladder nos tópicos à seguir.

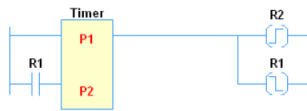
Lógica 01 $\Rightarrow$ Cada estado de seu sistema deve ser associado a um **contato auxiliar (R)**. Como na máquina há quatros estados, temos assim, quatro contatos auxiliares, ligando o estado inicial (tudo desligado).



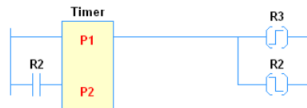
Lógica 02 $\Rightarrow$ Se o estado inicial (R0) estiver acionado e se o Botão Liga (BL) for pressionado, o estado (R1) é setado e o estado (R0) é resetado.



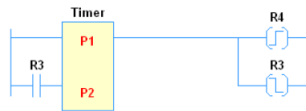
Lógica 03 $\Rightarrow$ Se o estado (R1) estiver setado, será iniciado a contagem do Tempo1 (T1) e ao final o estado (R2) será setado e (R1), resetado.



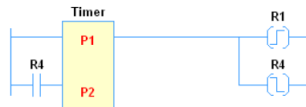
Lógica 04 $\Rightarrow$ Se o estado (R2) estiver setado, dar-se-á início a contagem de Tempo2 (T2) e, ao final, o estado (R3) será setado e (R2) resetado.



Lógica 05 $\Rightarrow$ Se o estado (R3) estiver setado, dar-se-á início a contagem de Tempo3 (T3) e, ao final, o estado (R4) será setado e (R3), resetado.



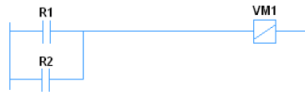
Lógica 06 $\Rightarrow$ Se o estado (R4) estiver setado, dar-se-á início a contagem de Tempo4 (T4) e, ao final, o estado (R1) será setado e (R4), ressetado. O ciclo recomeça.



Lógica 07 $\Rightarrow$ Se o Botão Desliga (BD) for pressionado, todos os estados (R1), (R2), (R3) e (R4) serão resetados.



Lógica 08 $\Rightarrow$ Aciona-se a saída vermelha do semáforo 01 (VM1). Observando a máquina de estado, note que a saída vermelho 01 está em nível lógico alto nos estados (R1) e (R2). Assim, os estados (R1) ou (R2) devem acionar a saída (VM1).



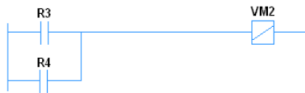
Lógica 09 $\Rightarrow$ Aciona-se a saída amarela do semáforo 01 (AM1). Observando a máquina de estado, note que a saída amarela 01 está em nível lógico alto somente no estado (R4). Assim, o estado R4 deve acionar a saída (AM1).



Lógica 10 $\Rightarrow$ Aciona-se a saída verde do semáforo 01 (VD1). Observando a máquina de estado, note que a saída verde 01 está em nível lógico alto somente no estado (R3). Assim, o estado R3 deve acionar a saída (VD1).



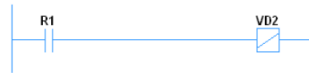
Lógica 11 $\Rightarrow$ Aciona-se a saída vermelha do semáforo 02 (VM2). Observando a máquina de estado, note que a saída vermelha 02 está em nível lógico alto nos estados (R3) e (R4). Assim, os estados (R3) ou (R4) devem acionar a saída (VM2).



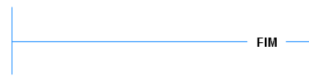
Lógica 12 $\Rightarrow$ Aciona-se a saída amarela 02 do semáforo 02 (AM2). Observando a máquina de estado, note que a saída amarela 02 está em nível lógico alto somente no estado (R2). Assim, o estado (R2) deve acionar a saída (AM2).



Lógica 13 $\Rightarrow$ Aciona-se a saída verde 02 do semáforo 02 (VD2). Observando a máquina de estado, note que a saída amarela 02 está em nível lógico alto somente no estado (R1). Assim, o estado o estado (R1) deve acionar a saída (VD2).



Lógica 14 $\Rightarrow$ Fim de programa.



Capítulo 5

Mecânica

5.1 Dispositivos de movimentação linear e circular

Dentro do ramo de equipamentos mecânicos, existe apenas dois tipos de movimentos: linear e circular. Entretanto, pode-se fazer uma combinação destes movimentos para produzir movimentos interessantes e diferenciados, servindo de aplicação em diversos sistemas. E, para abordar este tema, é necessário apresentar a guiagem de movimentos.

5.1.1 Guiagem de Movimentos

A guiagem de movimentos está diretamente relacionado ao fato de fazer determinada ferramenta ou conjunto realizar o movimento desejado. Existe dois tipos de guiagem: de movimentos lineares e de movimentos circulares.

Para facilitar o entendimento, a guiagem linear pode ser melhor definida através dos seus objetivos principais, apresentados nos tópicos seguintes.

Restringir movimentos indesejados

Este objetivo está ligado ao termo "guiar", onde submete-se o equipamento à realizar apenas a movimentação desejada através da restrição de outros não desejados.

As Figuras 5.1 e 5.2 apresenta os eixos principais de aeronaves, os quais podem-se aplicar a qualquer outro corpo: *Roll*, *Pitch* e *Yaw*.

Para uma construção didática do conhecimento, parte-se da ideia de movimentar um bloco de forma linear e sem rotações, onde o bloco representa uma ferramenta de uma indústria, por exemplo. Sabe-se que ao colocar apenas um

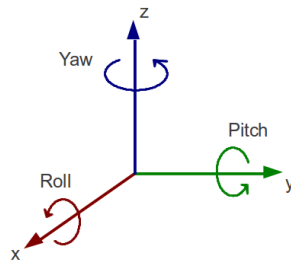


Figura 5.1: Eixos principais de aeronaves.

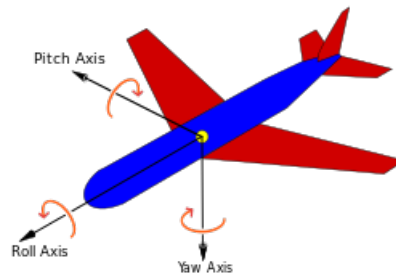


Figura 5.2: Eixos principais de aeronaves apresentados em uma aeronave.

guia no seu centro geométrico, não restringirá todos os movimentos possíveis: ainda haverá *Roll*. Assim, coloca-se duas guias simetricamente dispostas para poder restringir o movimento a apenas ser linear.

Antigamente, utiliza-se buchas de bronze para poder acoplar os eixos corrediços ao bloco do nosso exemplo. O problema referente a este tipo de solução é que precisava de lubrificação constante, o que acarretava em complicações tanto mecânicas quanto econômicas.

Na sequência, surgiu o uso de buchas de teflon. Estas são autolubrificantes entretanto apresenta folgas, interferindo diretamente no atrito entre os elementos e, assim, na movimentação decorrente de tais conjuntos de fatores.

Nos objetivos seguintes, irão ser abordados as soluções utilizadas atualmente e a vantagem e desvantagem de cada uma.

Eliminação de folgas

A presença de folgas no sistema implica a não restrição completa de movimentos indesejados e, portanto, obtem-se medidas indiretas e não condizentes com a realidade. Isso prejudica a instrumentação de equipamentos, acarreta em

vibrações no sistema e dificulta o controle, onde verifica-se a variação de tensão e corrente mas não o movimento.

Para resolver este tipo de situação, utiliza-se pré-carga elástica. Em aplicações com rolamentos, por exemplo, este é acoplado ao sistema e é deformado internamente para se acertar dentro do eixo, retirando-se as folgas. E desde a antiguidade, a solução por atrito também já era utilizada, à qual deu origem à roda: para transportar grandes e pesados objetos, utiliza-se troncos de madeira para servir de apoio para proporcionar a sua rolagem.

Ainda sobre a pré-carga elástica, ao retirar toda a folga, toda a parte do elemento rolante está sobre efeito de cargas sendo, portanto, sujeito a desgastes mecânicos (caso A da Figura 5.3). Uma outra opção, é aplicar pré-carga em somente uma direção, como apresentado no caso C da Figura 5.3.

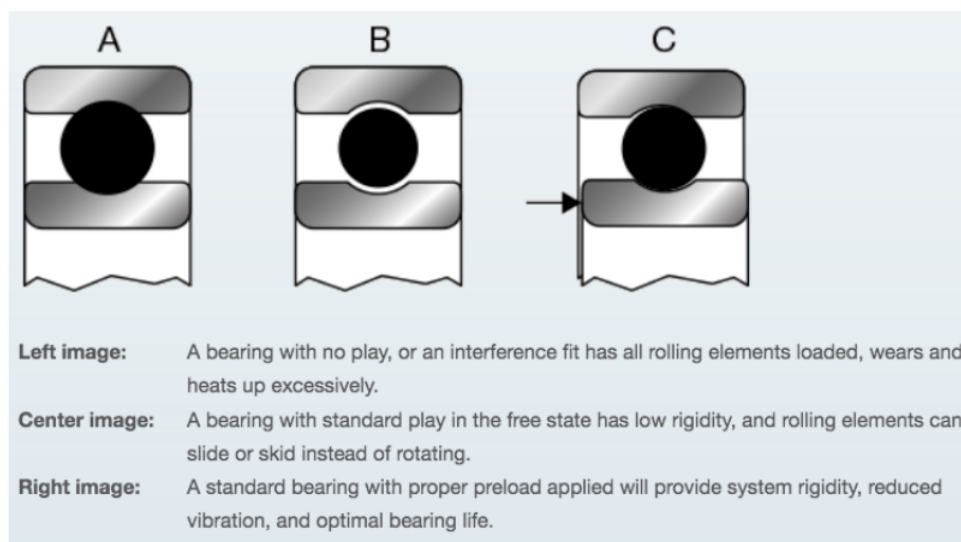


Figura 5.3: Situações de pré-carga elástica.

Finalmente, ainda há o caso de pré-carga elástica com mola, à qual, além de retirar as folgas, aumenta a rigidez da estrutura e miniza os ruídos.

5.1.2 Reduzir atrito

A redução de atrito dentro do ramo de guiagem de movimento consiste na transformação de atrito estático em atrito dinâmico. Para tal finalidade, utiliza-se o conceito de esferas entre a guia e o elemento a ser guiado linearmente, sendo de dois tipos: recirculantes e não-recirculantes. O segundo caso é utilizado em

pequenos trajetos, onde não necessita que as esferas recirculem ao longo do sistema.

Toma-se como caso um eixo muito longo apoiado em suas extremidades, apenas, sendo responsável pela guiagem de um equipamento. O primeiro problema que encontramos é o risco de flambagem da estrutura, caso submetido a altas cargas. Assim, pode-se pensar em duas possíveis soluções:

- 1 **Utilização de rolamento linear de esferas aberto**, o qual possui formato em "U". O problema encontrado ao utilizar este tipo de solução é que ele não suporta forças de baixo para cima, ao longo do eixo vertical z ;
- 2 **Mudança do perfil das guias**, deixando de ser cilíndricas. Um clássico perfil é aquele em formato "i", o qual resolve o problema das forças em todas as direções, e é utilizado junto com blocos lineares. Os **blocos lineares** evitam também o *Roll* através do seu contato interno, sendo classificado em dois tipos: arco circular e arco gótico. O primeiro possui 4 carreiras de esferas e o segundo, apenas 2. O problema deste segundo caso é que a esfera tem contato em algumas superfícies da guia e o diâmetro da esfera é diferente do diâmetro do espaço da guia, provocando movimentos diferentes em diferentes pontos de cada esfera, tornando variações no movimento (escorregamento). Isso não ocorre no primeiro caso: movimento mais suave e com menos atrito. A variação de distribuição da força nos patins e, portanto, da capacidade de carga, depende da variação do ângulo de inclinação entre a superfície de contato da guia e as esferas. Aumentando o ângulo, estará aumentado a força vertical e, logo, diminui a horizontal;

Pode-se ainda fazer uma comparação entre os rolamentos lineares e os blocos lineares, citando-se as vantagens e desvantagens de cada um. A Figura 5.4 apresenta tais comparações.

5.1.3 Suportar cargas

Alem do uso de esferas, pode-se utilizar também roletes. Aquelas tocam apenas em alguns pontos da guia, enquanto que este toca em linhas completas (maior área de contato). Portanto, os roletes suportam maiores cargas que as esferas.

5.1.4 Guiagem de movimentos circulares

Quando se aborda este assunto, é importante ressaltar o uso de rolamentos para a guiagem. O rolamentos circulares variam conforme o número de carreiras de elementos recirculantes, capacidade de suportar cargas radiais e axiais e o formato dos elementos recirculantes. A Figura 5.5 apresenta os diversos tipos de rolamentos e suas características importantes que definem o uso de cada um.



Figura 5.4: Comparação entre rolamentos lineares (esquerda) e blocos lineares (direita), apresentando suas vantagens e desvantagens.

Tipo de rolamento	Capacidade de carga radial	Capacidade de carga axial	Capacidade de desalinhamento
Rolamento de esferas com fileira única e sulco profundo	Boa	Razoável	Razoável
Rolamento de esferas com fileira dupla e sulco profundo	Excelente	Boa	Razoável
Contato angular	Boa	Excelente	Baixa
Rolamento cilíndrico	Excelente	Baixa	Razoável
Agulha	Excelente	Baixa	Baixa
Rolamento esférico	Excelente	Razoável/boa	Excelente
Rolamento cônico	Excelente	Excelente	Baixa

Figura 5.5: Tipos de rolamentos circulares.

Além dos rolamentos convencionais utilizados por elementos em contatos (esferas, por exemplo), existem os rolamentos especiais sem contato: hidrodinâmicos e magnéticos.

No primeiro tipo de rolamento especial, enquanto a máquina giratória está desligada, há uma folga assimétrica entre o eixo e o mancal e o interstício é preenchido com fluídos, cujas propriedades já foram comentadas no capítulo de hidráulica (Capítulo 1).

No segundo tipo de rolamento especial, há a criação de um campo magnético através dos eletroímãs que fazem com que o eixo levite e não entre em contato com o rolamento. Isso é muito utilizado, por exemplo, em trens de altas velocidades, tanto em uso da tecnologia referente quanto em aplicabilidade de redução de atrito e desgastes mecânicos. Finalmente, um último aspecto importante a ser abordado é o fato deste tipo de rolamento ser autocentralizador, isto é, há uma compensação entre as forças magnéticas no caso do eixo sair do alinhamento central.

Capítulo 6

Elétrica

6.1 Motores elétricos

Os motores elétricos possuem, como função majoritária, a transformação de energia elétrica em mecânica. Sua classe de motores é a mais utilizada entre todas as outras pois, além de possuir as vantagens de energia elétrica (limpeza, simplicidade de comando, baixo custo e facilidade de transporte), possui também custo reduzido, melhores rendimentos, grande versatilidade de cargas suportadas e construção relativamente simples.

6.1.1 Princípios Físicos

Em 1820, o cientista André-Marie Ampère realizou uma série de experimentos com fios condutores. A ideia era passar corrente elétrica por dois fios paralelos e próximos entre si e observar as reações de tais elementos: dependendo do sentido da corrente nos fios, estes se repeliam ou se atraíam. Tal fato, deu origem à Lei de Força de Ampère, cuja formulação matemática é dada pela Equação 6.1.

$$\frac{F_m}{L} = 2k_A \frac{I_1 I_2}{r} \quad (6.1)$$

Após algum tempo, houve a formulação da Lei de Lorentz, uma lei vetorial que descrevia parte das observações feitas por Ampère. É dito que o módulo e direção da Força aplicada sobre os fios depende do ângulo entre o campo magnético e o vetor comprimento do fio de propagação. Esta é uma lei importante para o funcionamento de motores elétricos e sua expressão é dada pela Equação 6.2.

$$\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (6.2)$$

onde, F_m é a força magnética resultante, q é a carga elétrica da partícula circulante, v é o vetor velocidade da partícula e B é o vetor campo magnético.

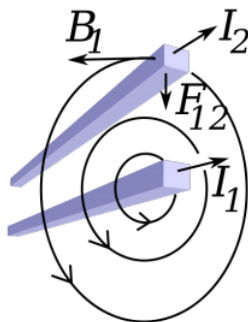


Figura 6.1: Visualização esquemática da Lei de Ámpere.

Após estes estudos mais gerais, Michael Faraday realizou uma série de experimentos com o intuito de aproveitar o movimento provocada por tais forças. Estas constituíam de colocar em solução salina uma peça de alumínio submersa a corrente elétrica com circuito fechado com um outro bastão pendurado em uma haste. Percebia-se que tal bastão realizava um movimento circular em torno da peça de alumínio. Estava-se encaminhado aos motores elétricos. Veja o esquema na Figura 6.2.

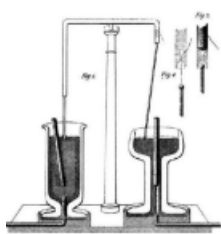


Figura 6.2: Esopo do experimento de Faraday.

6.1.2 Principais tipos de motores

Os motores podem ser classificados em dois grandes grupos: motores de corrente contínua (DC) e de corrente alternada (AC). Os motores DC aqui abordados serão o **Brushed** e o **Brushless**, enquanto que os AC serão de **Passo** e de **Indução**.

Brushed

Neste tipo de motor, o estator é um ímã permanente enquanto que o rotor é um condutor de corrente elétrica do tipo espira, por exemplo. Para seu funcionamento rotacional contínuo é necessário a existência de um comutador que

alterna o sentido da corrente elétrica DC. Este fato do uso de escovas para fazer a comutação levou ao nome deste tipo de motor.

Ao aplicar a regra de mão esquerda para a lei de Lorentz (Figura 6.3), encontra-se o sentido de atuação da força magnética sobre o condutor e, portanto, o sentido de rotação do motor. Quanto maior for o número de espiras e, portanto, de contatos do comutador mais suave será o movimento pois os "gaps" entre a alimentação de corrente elétrica será menor.

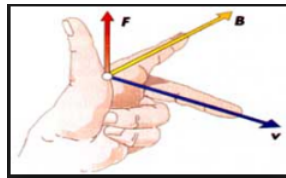


Figura 6.3: Regra da mão esquerda para a Lei de Lorentz.

A Figura 6.4 apresenta um motor Brushed com algumas indicações de suas partes.

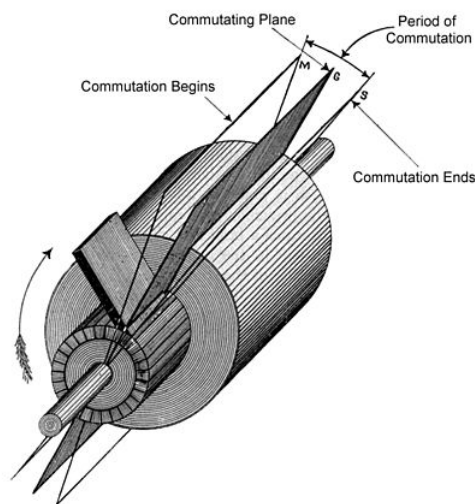


Figura 6.4: Exemplo esquemático de um motor DC Brushed.

Brushless

Pelo fato de não haver escovas, este tipo de motor é menos barulhento que o motor Brushed. O rotor é um ímã permanente e o estator se tornou as bobinas condutoras atuando como eletroímãs, às quais vão sendo energizadas de forma

coerente à manter uma rotação contínua do motor. A ideia é que quando o polo do rotor se aproxima do seu polo oposto no estator energizado, este é descarregado e a próxima espira é energizada para atração.

Um arranjo de funcionamento mais eficiente é colocar uma bobina para atração e, a sua antecessora, para repulsão. Desta forma, consegue-se dobrar a força impulsora da rotação e, portanto, alcança-se maiores velocidades de rotação. Todo esse controle do sequenciamento de energização é feito eletronicamente através de sensores elétricos.

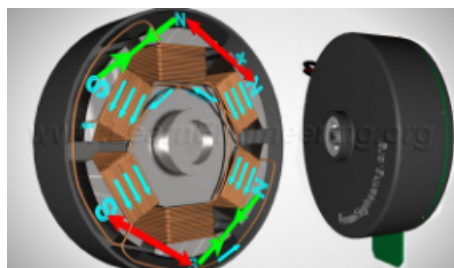


Figura 6.5: Esquemático de funcionamento de um motor Brushless DC.



Figura 6.6: Motor Brushless real.

Fazendo ainda um comparativo entre a passagem dos motores Brushed para Brushless, pode-se listar as alterações: os ímãs permanentes saíram do estator e "foram" para o rotor; não há desgaste de escovas (manutenção); o sistema se tornou mais leve pois troca-se diversas espiras por ímãs. Assim, a resposta dinâmica do sistema se torna mais rápida (rotor mais leve) e consegue-se alcançar velocidades mais elevadas (no caso do Brushed, altas velocidades poderiam ocasionar o rompimento das escovas).

de Passo

É um motor muito utilizado em circuitos de automação e de robótica devido ao fato de não precisar trabalhar em malha fechada. A Figura 6.7 apresenta um esquema do seu interior, na qual podemos observar 4 bobinas. Entretanto, motores de passo mais precisos apresentam maior quantidade de bobinas para que haja melhor precisão e controle de seus movimentos, pois cada passo irá representar um ângulo cada vez menor.

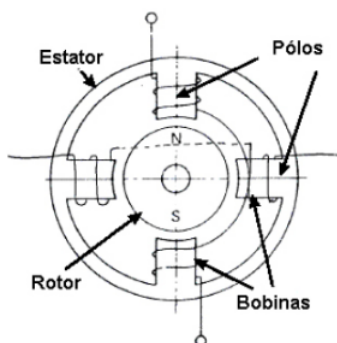


Figura 6.7: Esquema de um motor de passo com quatro bobinas.

A energização das bobinas é feito em duplas, isto é, duas são acionadas simultaneamente e estão localizadas linearmente opostas ao centro do rotor para que haja maior suavidade na rotação e maior torque. Um outro arranjo é o de meio-passo: aciona-se primeiramente um par e, na sequência, aciona-se os pares consecutivos tendo, ao total, 4 bobinas acionadas. Isso permite que o motor ande apenas metade do passo original. Observe a Figura 6.8 para mais detalhes.

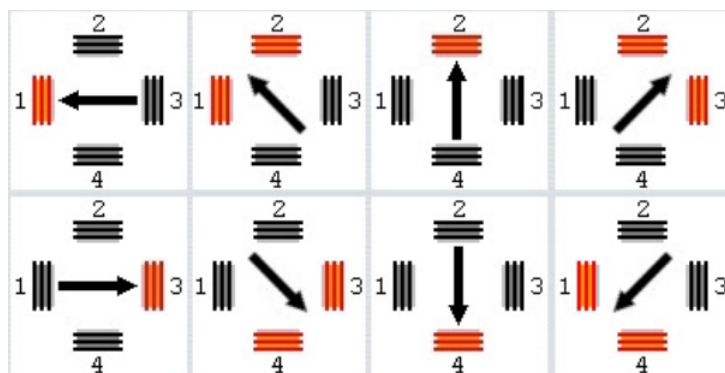


Figura 6.8: Esquema de um motor de passo atuando em meio-passo.

Indução

Nicola Tesla foi o maior contribuinte para a criação deste tipo de motor, que é utilizado em 90% dos casos industriais. O estator é um eletroímã e o rotor é um ímã permanente, o qual está sujeito a um campo magnético rotacional. Tal campo é girante devido ao fato que a corrente é alternada e defasada.

A velocidade de rotação do rotor é menor que do campo magnético para que sempre haja uma força induzida. E, devido a sua fácil construção, há certa facilidade no controle da velocidade, o motor possui auto-iniciação e a rotação do motor é proporcional, portanto, à frequência da rede de alimentação.

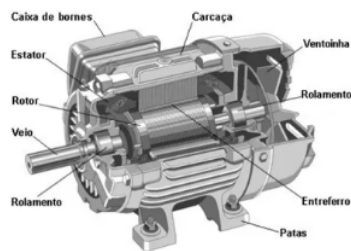


Figura 6.9: Esquemático de motor de indução.

Para controle da velocidade de um motor de indução é necessário o uso de um inversor de frequência. É um equipamento que permite a mudança da frequência de alimentação do motor para que, assim, sua velocidade seja alternada. Além disso, dependendo do tipo de inversor, utiliza-se um esquema em ponte (bridge) com transistores do tipo *Mosfet*, por exemplo, para que seja possível alternar o sentido de rotação do motor; ou tensão PWM (*Pulse Width Modulation*).



Figura 6.10: Inversor de Frequências Weg CFW10.

6.1.3 Dispositivos de segurança/proteção

Em muitos processos industriais e, até mesmo, em residências domésticas é necessário o uso de dispositivos de proteção para se evitar sobrecargas e curto-circuitos nos sistemas e equipamentos. Cada um deles, diferentemente desliga parcela do sistema elétrico nestes casos irregulares e perigosos.

Serão aqui abordados três deles: Fusíveis, Relés de proteção e Disjuntores.

Fusíveis

Por efeito Joule, isto é, aquecimento elevado, este equipamento abre o circuito caso a corrente que passe por ele seja maior que a que foi dimensionada para ele. Ele pode até suportar, por um pequeno intervalo de tempo (menos de 2 segundos), corrente superior a sua dimensionada antes de romper. As Figuras 6.11 e 6.12 apresentam, respectivamente, a simbologia de um fusível e um fusível real.

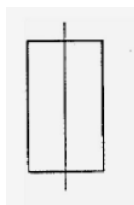


Figura 6.11: ISimbologia de um fusível.



Figura 6.12: Modelo de Fusível real.

Os fusíveis são classificados conforme a norma NBR IEC 60.269-1, conforme a faixa de interrupção (letras minúsculas) e a categoria de utilização (letras Maiúsculas). Pode-se observar pela Figura 6.13 abaixo.

Faixa de interrupção	a	Atuando somente na presença de curto-circuito
	g	Atuando tanto na presença de curto-circuito como sobrecarga
Categoria de utilização	G	Proteção de linha, uso Geral
	M	Proteção de circuitos Motores
	L	Proteção de Linha
	R	Proteção de Semicondutores, Ultra- rápidos

Figura 6.13: Classificação NBR IEC 60.269-1.

Relés de proteção

São equipamentos específicos que atuam para proteger de sobrecargas, as quais podem ser originadas por: rotor bloqueado, partida prolongada, falta de fase e altas acelerações.

Estes trabalham sob o funcionamento de correntes elétricas sendo conectado, internamente, por uma chave de contato auxiliar. Seu arranjo é feito de tal modo que, caso haja excesso de corrente, três barras bimetalicas irão aquecer por efeito térmico e deslocarão, mecanicamente, tal contato, abrindo o circuito. Existem também relés por efeito magnético.



Figura 6.14: Exemplo de Relé de Proteção real.

Disjuntores

Diferente dos fusíveis, este tipo de equipamento pode ser rearmado para continuar protegendo a instalação elétrica. Além de funcionar de forma "automática", isto é, quando passa correntes acima da faixa permitida, pode-se interromper manualmente o funcionamento do circuito elétrico.

Os disjuntores são classificados conforme seu método de funcionamento: térmico (deformação de placas bimetalicas pelo aquecimento que, mecanicamente, inter-

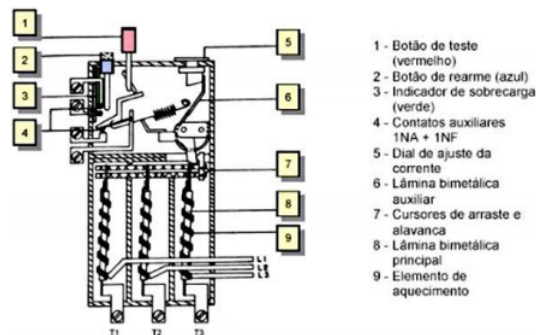


Figura 6.15: Esquema interno de um relé de proteção.



Figura 6.16: Exemplo de Disjuntor real.

rompe um contato que abre o circuito);e magnético (fortes variações da corrente elétrica provocam variações no campo magnético da bobina, desencadeando o deslocamento de um núcleo de ferro que vai abrir o circuito).

Finalmente, mediante cada tipo de funcionamento do disjuntor, estes podem ser classificados segundos a norma NBR IEC 60898 quanto a sua faixa de operação permitida: Tipo B (de 3 até 5 vezes o nominal), Tipo C (de 5 até 10 vezes o nominal) e Tipo D (de 10 até 20 vezes o nominal).

6.2 Sensores

Os sensores podem ser definidos como dispositivo que modifica suas características internas de acordo com um fenômeno externo. Enquanto que os transdutores, à grosso modo, apresenta mesma característica mas já apresenta eletrônica embutida, tornando o sinal útil para a análise do sistema (condicionador de sinal).

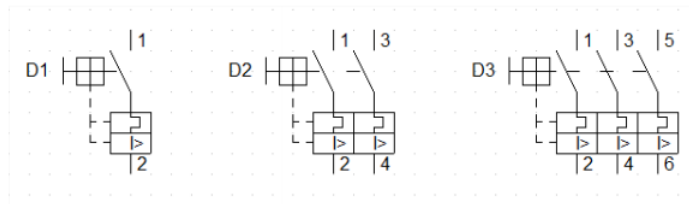


Figura 6.17: Esquemas de disjuntores.

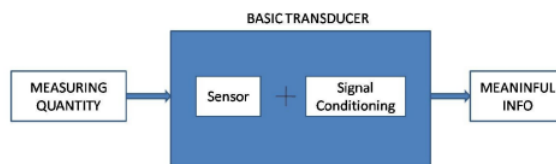


Figura 6.18: Esquema funcional de um transdutor.

A Figura 6.19 apresenta uma comparação entre um sensor de força e um transdutor de força. Observe a eletrônica embarcada na ponta de seus terminais.

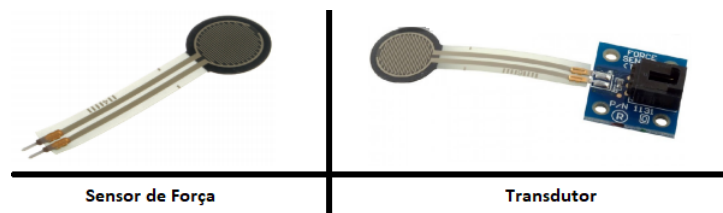


Figura 6.19: Comparação entre um sensor de força e um transdutor.

6.2.1 Características principais

As características principais de sensores podem ser divididas entre estáticas e dinâmicas. A primeira categoria pode ser dividida em: Acurácia e precisão; resolução; sensibilidade e linearidade; e alcance. Enquanto que a segunda, apenas em tempo de resposta.

Acurácia e precisão

Acurácia pode ser definida como o maior valor de erro estático (erro do processo em regime permanente) que um instrumento pode ter ao longo de sua faixa de trabalho. Enquanto que **precisão** descreve as proximidades das medidas obtidas com as desejadas.

A Figura 6.20 mostra um esquema intuitivo de casos combinatórios de acurácia e precisão.



Figura 6.20: Esquema representativo de acurácia e precisão.

Resolução

É o menor incremento da variável física que pode ser detectado pelo sensor.

Sensibilidade e Linearidade

Sensibilidade indica o "ganho" do sensor, isto é, a relação entre os valores de entrada e saída. Enquanto que a **linearidade** indica a proporcionalidade entre as variáveis de entrada e saída.

Alcance

Também conhecida como faixa de medida(range), indica a capacidade de medida ou de transmissão do instrumento, sem destruição ou imprecisão do mesmo. Assim, existem limites na sua captação de dados que, ao serem extrapoladas, acabam proporcionando divergências do esperado.

6.2.2 Classificação

Os sensores podem ser classificados quanto a cinco propriedades: operação, sinal de saída, referencial, princípio de funcionamento e propriedade mensurada.

Operação

Pode ser ativo ou passivo. Ativo é aquele que não precisa de alimentação externa para produzir um sinal de saída. Enquanto que passivo precisa ser alimentado para gerar um sinal de saída.

Sinal de saída

Pode ser analógico ou digital. O Analógico fornece um sinal analógico de saída, isto é, uma gama de valores inteiros ou flutuantes dentro de uma certa faixa dimensionada. Exemplos de propriedades mensuradas: tensão, ângulo de rotação etc.

Enquanto que o Digital fornece um sinal de natureza binária (0 ou 1), onde os valores estão associados aos estados lógicos. Exemplos: chaves, interruptores etc.

Referencial

Para o caso Absoluto, indica o valor real da variável, tomada à partir de um referencial fixo. Enquanto que para o caso Incremental, indica-se uma mudança no valor da variável em relação à medida tomada anteriormente (referencial não-fixo).

Princípio de funcionamento

É definido pela grandeza física utilizada **pelo sensor para avaliar a propriedade mensurada**, podendo ser: mecânico, elétrico, magnético, ótico, acústico, químico e biológico.

Propriedade mensurada

Definido pela grandeza física que **modifica as características do sensor**, podendo ser: posição, velocidade, força, pressão, vazão, temperatura e presença.

6.2.3 Exemplos

Existe uma grande variedade de sensores que são utilizados em diversas aplicações industriais, robóticas e até domésticas. Na sequência, serão listados e discutidos à qual classificação cada sensor se encaixa, mediante seu funcionamento e construção.

Encoder Incremental

É um sensor do tipo **passivo**, isto é, que depende de fonte de alimentação para poder mensurar a **posição** rotacional de um equipamento. Ele é do tipo **incremental**, fornece um sinal **digital** e utiliza-se de princípios de captação **ótica** para poder contabilizar e gerar um sinal padronizado.

A Figura 6.21 apresenta um esquema de funcionamento de um encoder incremental.

Ele conta o número de pulsos (ranhuras) utilizando dois diodos (canais) defasados de 90° para poder detectar o sentido de rotação do encoder/equipamento. Em um sentido detecta-se A e depois o sinal de B; e no outro, o oposto ($B \mapsto A$).

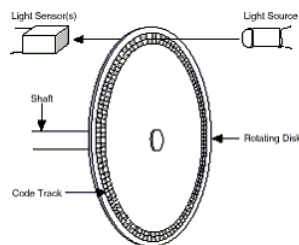


Figura 6.21: Esquema de um encoder incremental.

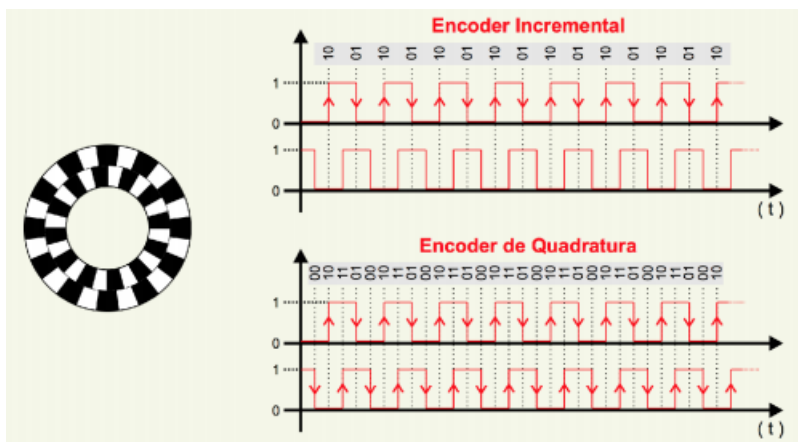


Figura 6.22: Análise de sinais dos diodos de um encoder incremental.

Encoder Absoluto

Apresenta quase todas as classificações que o encoder incremental mas sua construção é muito mais complexa, portanto, apresenta maior preço de mercado.

A Figura 6.23 apresenta detalhes de seu método de funcionamento e construtivo. Observe que ao longo de todo o diâmetro, coloca-se diversas combinações de branco e preto (binário) para conseguir marcar cada posição (número de volta e posição na volta) de forma única.

Resolver

Diferente do funcionamento dos encoders, o resolver apresenta operação do tipo **ativo** pois este utiliza bobinas cujas tensões variam conforme o mensurando. Outro ponto importante é que este é do tipo **analógico**, visto que ocorre alterações da tensão de análise para a determinação da **posição**.

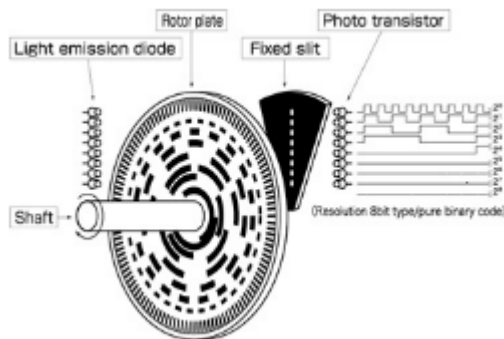


Figura 6.23: Esquema de um encoder absoluto.

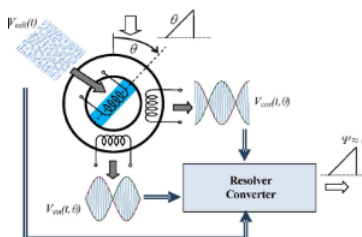


Figura 6.24: Esquema de um resolver.

Potenciômetro

É um equipamento **passivo**, cuja saída é do tipo **analógico**. Seu sinal de referência é **absoluto** e funciona **eletricamente** para poder medir a **posição**.

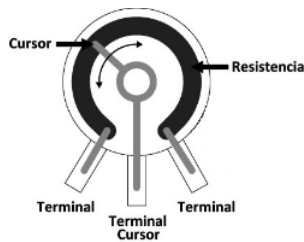


Figura 6.25: Esquema de um potenciômetro.

Termopar

É um sensor utilizado para medir a **temperatura** de uma superfície através da deformação de um fio biometálico, cuja variação é captada e "convertida" em um multímetro. Seu sinal de saída é **analógico** e **absoluto**.

Um arranjo físico utilizado com termopar e multímetro é mostrado na Figura 6.26.

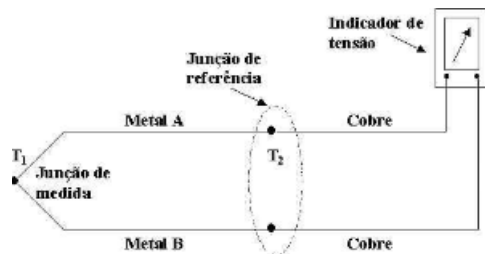


Figura 6.26: Arranjo físico de um termopar instalado.

Extensômetro (Strain Gauge)

É um sensor capaz de medir deformações mecânicas em corpos de provas, às quais alteram a resistência do seu bipolo cuja variação é lida por outro dispositivo e processado para se obter o valor da **força** aplicada. É do tipo **passivo** e seu sinal de saída é **analógico** e **absoluto**.

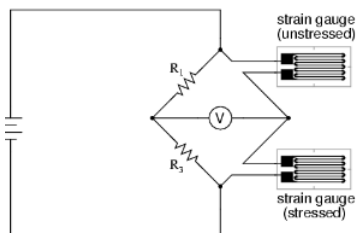


Figura 6.27: Esquema de um extensômetro arranjado em um quarto de ponte.

Sensor de ultrassom

É um sensor de **presença** e/ou **distância** que utiliza de ondas **acústicas** para poder captar o mensurando e recebê-las novamente (um emissor e um receptor). O seu sinal de saída é do tipo **digital** (para o caso de presença) e **absoluto**.

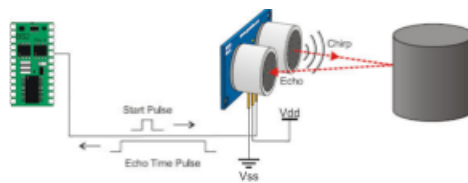


Figura 6.28: Esquema de ultrassom captando o objeto e enviando a informação para um microcontrolador.

Apêndice A

Símbolos Gráficos e Diagramas de Circuitos para hidráulica e pneumática

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS

SISTEMAS E COMPONENTES HIDRÁULICOS E PNEUMÁTICOS: SÍMBOLOS GRÁFICOS E DIAGRAMAS DE CIRCUITOS

PARTE I

SÍMBOLOS GRÁFICOS

1. ESCOPO

A primeira parte da norma estabelece princípios de orientação quanto ao uso dos símbolos gráficos. Os símbolos gráficos representam os elementos internos de um circuito e são construídos a partir de símbolos básicos e elementos funcionais estabelecidos com base em regras gerais instituídas para o planejamento e desenvolvimento dos símbolos funcionais. Os símbolos básicos e as regras de construção são também especificados.

O objetivo principal é o de possibilitar a representação das funções realizáveis com componentes hidráulicos e pneumáticos, independentemente da forma construtiva, das inovações tecnológicas e do fabricante não impedindo ou criando limitações demasiadamente rígidas quanto ao uso e/ou aplicação do símbolo. Desse modo, a norma define os símbolos lógicos básicos e as regras para elaboração dos símbolos compostos.

2. REFERÊNCIA NORMATIVA

ISO 1219-1, Fluid power systems and components – Graphic symbols and circuit diagrams – Part 1: Graphic symbols

ISO 1219-2, Fluid power systems and components – Graphic symbols and circuit diagrams – Part 2: Circuit diagrams

DRAFT INTERNATIONAL STANDART ISO/DIS 14617-5. Graphical symbols for diagrams. Part 5: Measurement and control devices

3. DEFINIÇÕES **3.1. Símbolos básicos:** são representações gráficas utilizadas para a formação de símbolos funcionais.

3.2. Símbolos funcionais: são representações gráficas das funções dos componentes hidráulicos e pneumáticos, sendo constituídos de símbolos básicos.

As definições dadas na NBR 10138 são aplicáveis a esta parte da norma.

4. DECLARAÇÃO DE IDENTIFICAÇÃO.

Use o seguinte enunciado quando a elaboração e construção de circuitos hidráulicos e/ou pneumáticos estiver fundamentada ou em consenso com a presente norma.

“Os diagramas de circuitos estão em concordância com a norma NBR 8896, *Sistemas e componentes hidráulicos e pneumáticos – Símbolos gráficos e diagramas de circuitos.*”

5. GERAL

5.1. Introdução

Os símbolos usados para descrever os componentes hidráulicos e pneumáticos devem ser construídos a partir de símbolos básicos e elementos funcionais baseados na presente norma. As regras apresentadas nesta cláusula têm o intuito de habilitar aos usuários o desenvolvimento de símbolos de componentes ou sistemas formados de vários símbolos funcionais inseridos no circuito. As regras permitem que diferentes usuários, através de uma especificação comum, produzam ao final do trabalho um mesmo símbolo representativo de determinada função, conexão ou componente.

5.2. Regras Gerais

5.2.1. Os símbolos representam funções, modos de operação e conexões externas.

5.2.2. Símbolos não possuem a intenção de mostrar a construção física do componente, nem representam suas dimensões reais.

5.2.3. Para gerar símbolos mais complexos, os símbolos básicos e os elementos funcionais devem ser combinados obedecendo as regras estabelecidas nesta primeira parte da norma.

5.2.4. Os símbolos mostram as vias externas (portas de passagem de fluido) do componente, sem a necessidade de representar a localização exata destas vias.

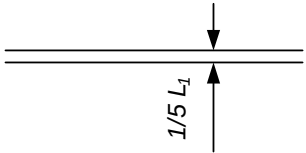
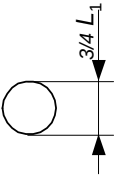
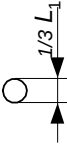
5.2.5. As vias são indicadas através da união de linhas de escoamento com os símbolos dos elementos do circuito.

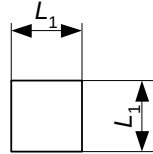
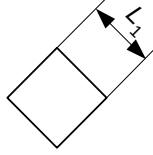
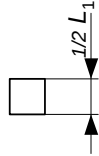
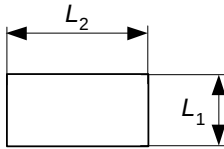
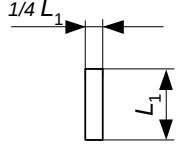
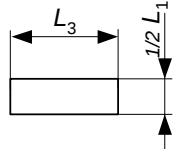
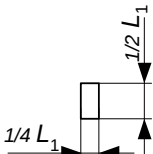
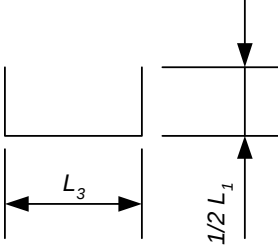
5.2.6. Para símbolos complexos, somente as conexões que são usadas funcionalmente precisam ser mostradas.

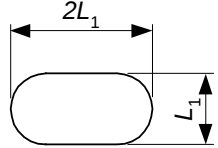
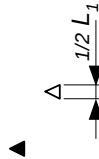
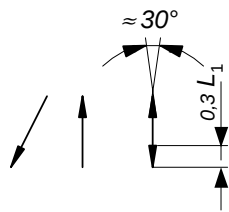
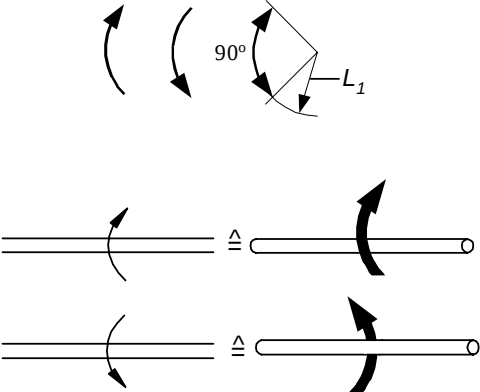
É recomendável que os símbolos associados a equipamentos com o propósito de identificação mostrem todas as conexões possíveis.

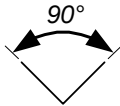
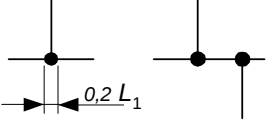
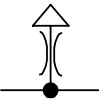
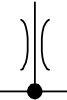
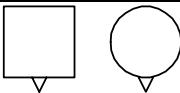
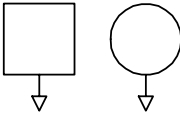
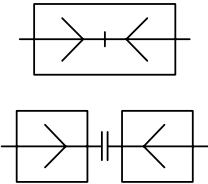
- 5.2.7. As letras, onde usadas, são meramente indicativas e não descrevem parâmetros ou valores de parâmetros.
- 5.2.8. Salvo declaração contrária, os símbolos funcionais podem ser desenhados em qualquer orientação sem alterar o seu significado. São preferidos incrementos de 90°.
- 5.2.9. Os símbolos não indicam grandezas ou quantidades tais como pressão, vazão, deslocamento etc., ou regulagens de componentes.
- 5.2.10. O uso de símbolos simplificados está limitado àqueles apresentados na primeira parte desta norma – Símbolos gráficos.
- 5.2.11. Quando dois ou mais símbolos estão contidos em uma única unidade, estes devem estar envolvidos por meio de uma linha fina tracejada. Excetuam-se os casos particulares nos quais for indicada outra forma de representação.

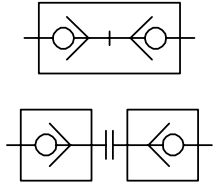
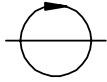
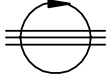
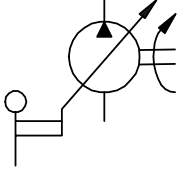
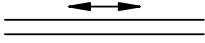
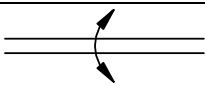
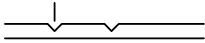
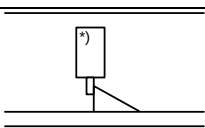
o

Referência	Descrição	Aplicação ou explicação do símbolo	Símbolo
6	Símbolos Básicos		
6.1	Linhas		
6.1.1	Linha Contínua	Linha de trabalho, linha elétrica, linha de retorno, linha de suprimento	
6.1.2	Linha Tracejada	Linha de pilotagem interna e externa (acionamento), linha de dreno, linha de sangria (purga) de ar ou líquidos Filtro Posições transitórias	
6.1.3	Linha Traço-ponto	Indicação de um conjunto de funções ou componentes contidos numa única unidade.	
6.1.4	Linha Dupla	União mecânica (eixo, alavanca, haste de cilindro etc.)	
6.2	Círculos		
6.2.1	Diâmetro L_1	Círculo $\varnothing L_1$ Unidade de conversão de energia (bomba, compressor, motor)	
6.2.2	Diâmetro $\frac{3}{4} L_1$	Círculo $\varnothing \frac{3}{4} L_1$ Instrumento de medição	
6.2.3	Diâmetro $\frac{1}{3} L_1$	Círculo $\varnothing \frac{1}{3} L_1$ Válvula de retenção, junta rotativa, articulação mecânica, rolete (com um ponto central)	
6.3	Semicírculo		
6.3.1	Diâmetro L_1	Semi Círculo $\varnothing L_1$ Motor ou bomba com ângulo de rotação limitado (oscilador)	
6.4	Quadrado		

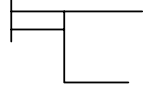
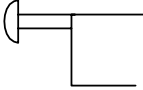
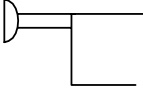
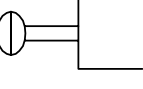
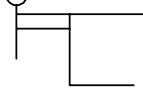
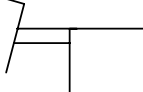
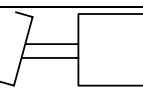
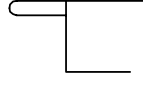
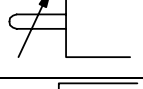
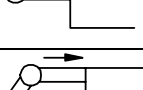
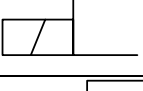
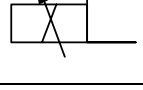
6.4.1	Lado L_1 Conexões perpendiculares aos lados	Componente de comando e controle, unidade de acionamento (exceto motor elétrico)	
6.4.2	Lado L_1 Ligações nos vértices (quadrado inclinado 45°)	Dispositivos de condicionamento (filtro, separador, lubrificador, trocaador de calor)	
6.4.3	Lado $\frac{1}{2} L_1$	Peso no acumulador	
6.5	Retângulo		
6.5.1	Lados L_1 e L_2 Onde $L_1 < L_2$	Cilindro Válvula	
6.5.2	Lados L_1 e $\frac{1}{4} L_1$	Êmbolo	
6.5.3	Lados $\frac{1}{2} L_1$ e L_3 Onde $L_1 \leq L_3 \leq 2L_1$	Usado em algumas formas de acionamento (por exemplo pedal, alavanca, etc.)	
6.5.4	Lados $\frac{1}{4} L_1$ e $\frac{1}{2} L_1$	Elementos de amortecimento em atuadores	
6.6	Símbolos diversos		
6.6.1	Metade de um retângulo	Reservatório	

6.6.2	Cápsula oval	Reservatório pressurizado, acumulador, garrafa de gás, reservatório auxiliar	
7	Elementos funcionais		
7.1	Triângulo Equilátero	Indica o sentido do escoamento e a natureza do fluido Vazio – Pneumático (incluindo exaustão para a atmosfera) Preenchido - Hidráulico	
7.2	Setas		
7.2.1	Setas Retas ou Inclínadas	Indicação de: Movimento retilíneo Direção e sentido do escoamento através de uma válvula Sentido do fluxo de calor	
7.2.2	Setas curvas	Movimento de rotação (As figuras do lado direito são unicamente para explicação e não devem ser usadas como símbolos)	
7.2.3	Seta Inclínada (longa)	Indicação de ajuste ou variação da bomba, solenóide, mola etc.	
7.3	Elementos funcionais diversos		
7.3.1		Linha elétrica	
7.3.2		Passagem ou via bloqueada	
7.3.3		Enrolamentos opostos em conversores eletromagnéticos lineares	
7.3.4		Indicação ou controle de temperatura	
7.3.5		Fonte primária de energia	
7.3.6		Mola	
7.3.7		Restrição	

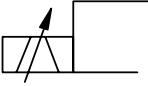
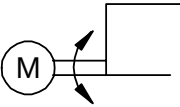
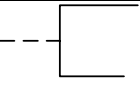
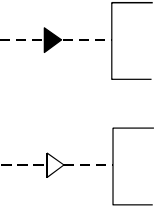
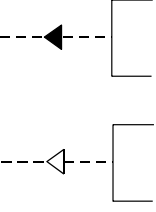
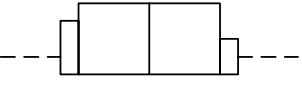
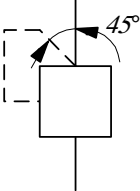
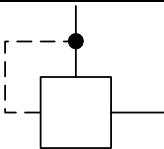
7.3.8		Assento de uma válvula de retenção (símbolo simplificado)	
8	Linhas de escoamento e Conexões		
8.1	Linhas de escoamento		
8.1.1	Exemplos		
8.1.1.2	Conexão das linhas de escoamento (união)		
8.1.1.3	Cruzamento	Linhas não conectadas	
8.1.1.4	Linha flexível	Mangueira	
8.2	Conexões		
8.2.1	Exemplos		
8.2.1.2	Sangria (purga) de ar contínua	Para desaeração contínua	
8.2.1.3	Sangria (purga) de ar temporária	Para desaeração temporária, com conexão aberta	
8.2.1.4	Sangria (purga) de ar temporária	Para desaeração temporária, com saída bloqueada	
8.2.1.5	Via de exaustão do ar		
8.2.1.5.1	Face sem provisão para conexão		
8.2.1.5.2	Face com provisão para conexão		
8.2.1.7	Engate rápido e auto-bloqueante		
8.2.1.7.1	Engate rápido	Sem válvula de retenção (conectado e desconectado, respectivamente)	

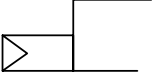
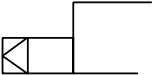
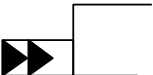
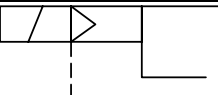
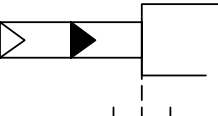
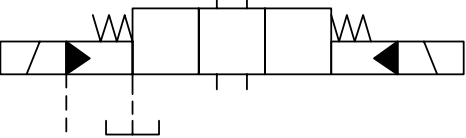
8.2.1.7.2	Engate rápido	Com válvulas de retenção (conectado e desconectado, respectivamente)	
8.2.1.8	Conexão angular e rotativa	União das linhas permite movimento de operação angular ou rotativa	
8.2.1.8.1		Uma conexão	
8.2.1.8.2		Três conexões concêntricas	
9	MECANISMOS DE ACIONAMENTO		
9.1	Geral		
9.1.1	Os símbolos de acionamento das válvulas devem ser desenhados em uma posição conveniente nas extremidades do retângulo da válvula		
9.1.2	Para facilitar o desenho do símbolo de acionamento, a seta de ajuste do componente pode ser estendida e inclinada, para incorporar o elemento de acionamento		
9.2	Componentes Mecânicos		
9.2.1	Exemplos		
9.2.1.1	Haste	Movimento linear bidirecional (setas opcionais)	
9.2.1.2	Eixo	Movimento rotacional bidirecional (setas opcionais)	
9.2.1.3	Detente ²	Dispositivo que mantém uma dada posição contra uma força limitada	
9.2.1.4	Trava ¹	Dispositivo usado para travamento de um mecanismo. O destravamento é feito por um método de comando independente *) O símbolo de comando para destravamento é indicado no interior do retângulo	
9.2.1.5	Desposicionador	Evita a parada do mecanismo na posição de ponto morto central	
9.3	Modos de acionamento		
9.3.1	Acionamento muscular		

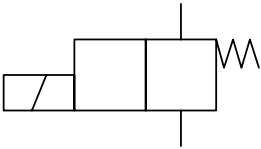
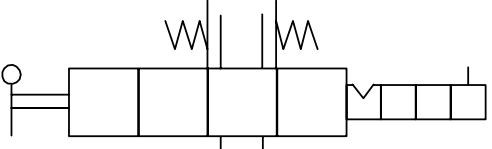
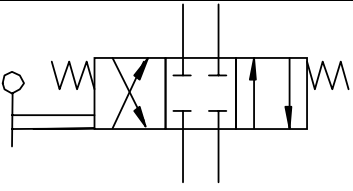
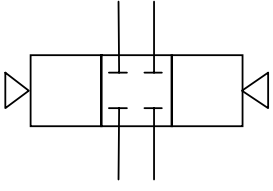
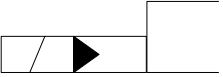
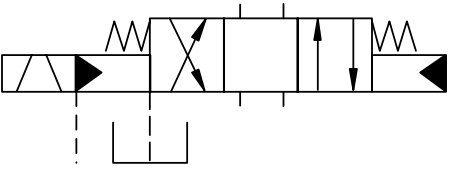
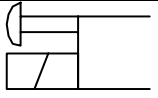
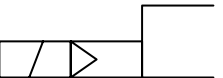
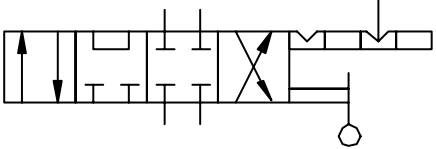
¹ Um sentido de operação² Dois sentidos de operação¹ Um sentido de operação

9.3.1.1	Símbolo geral de acionamento mecânico (sem indicação do tipo de acionamento)		
9.3.1.2	Botão de empurrar ¹		
9.3.1.3	Botão de puxar ¹		
9.3.1.4	Botão de puxar/empurrar ²		
9.3.1.5	Alavanca		
9.3.1.6	Pedal (de simples efeito) ¹		
9.3.1.7	Pedal (de duplo efeito) ²		
9.3.2	Acionamento mecânico		
9.3.2.1	Pino ou apalpador ¹		
9.3.2.2	Pino ou apalpador com comprimento ajustável		
9.3.2.3	Mola ²		
9.3.2.4	Roleta fixo		
9.3.2.5	Roleta articulado ou gatilho ¹		
9.3.3	Acionamento elétrico		
9.3.3.1	Conversor eletromagnético linear com uma bobina ¹	Exemplo: solenóide liga/desliga	
9.3.3.2	Conversor eletromagnético linear com uma bobina e de ação proporcional ¹	Exemplo: Solenóide proporcional	

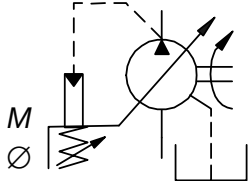
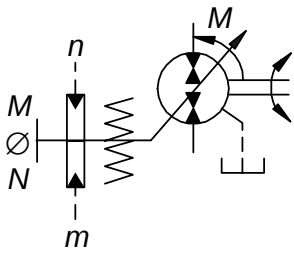
² Dois sentidos de operação¹ Um sentido de operação

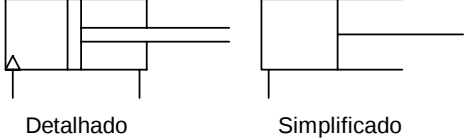
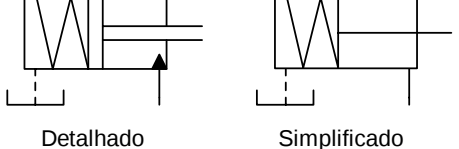
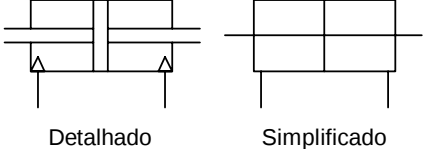
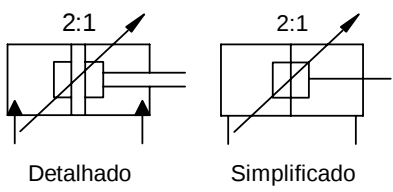
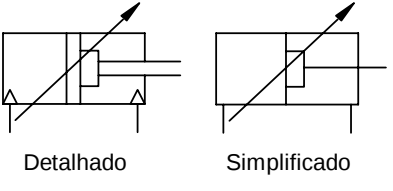
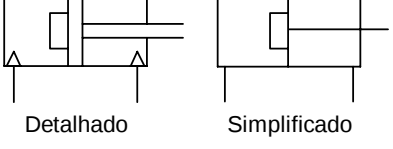
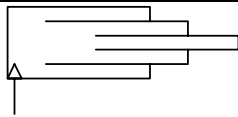
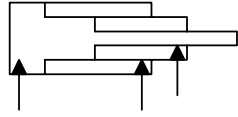
9.3.3.3	Conversor eletromagnético linear com uma bobina ¹	Duas bobinas de atuação oposta unidas em uma única montagem ²	
9.3.3.4	Conversor eletromagnético linear com duas bobinas e de ação proporcional ¹	Duas bobinas de atuação proporcional aptas a operarem alternadamente e progressivamente, unidas em uma única montagem. Exemplo: motor torque, motor linear	
9.3.3.5	Motor elétrico		
9.3.4	Acionamento Hidráulico/Pneumático (Pilotagem)		
9.3.4.1	Acionamento direto		
9.3.4.1.1	Linha de pilotagem	Ação direta por pressão ou depressurização/alívio (genérico)	
9.3.4.1.2	Linha de pilotagem	Por aplicação ou por acréscimo de pressão hidráulica ou pneumática	
9.3.4.1.3	Linha de pilotagem	Por depressurização/alívio hidráulica ou pneumática	
9.3.4.1.4	Linha de pilotagem em áreas diferentes e opostas	Ação por diferença de forças provocadas pela pressão em áreas opostas Caso seja necessário, a relação das áreas pode ser indicada nos retângulos representativos das áreas	
9.3.4.1.5	Acionamento por linha de pilotagem interna	A tomada de pressão está situada no interior da unidade	
9.3.4.1.6	Acionamento por linha de pilotagem externa	A tomada de pressão está situada no exterior da unidade	

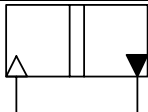
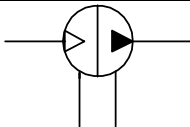
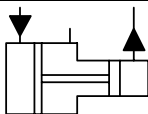
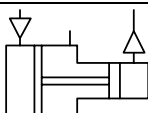
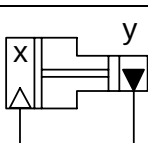
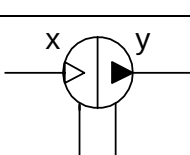
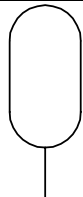
9.3.4.2	Acionamento indireto (por pilotagem interna)		
9.3.4.2.1	Piloto pneumático interno	Por aumento de pressão através de um estágio piloto, com suprimento interno	
9.3.4.2.2	Piloto pneumático interno	Por alívio de pressão através de um estágio piloto	
9.3.4.2.3	Piloto hidráulico interno de dois estágios	Por aumento de pressão através de dois estágios piloto sucessivos, com suprimento e dreno internos	
9.3.5	Acionamento composto		
9.3.5.1	Conversor eletromagnético acionando piloto pneumático	O conversor eletromagnético (ex.: solenóide) aciona o piloto pneumático (segundo estágio do acionamento) Com suprimento externo para a pilotagem	
9.3.5.2	Piloto pneumático interno acionando piloto hidráulico	O piloto pneumático interno (primeiro estágio) aciona o piloto hidráulico (segundo estágio do acionamento), com suprimento interno e dreno externo	
9.3.5.3	Conversores eletromagnéticos acionando pilotos hidráulicos em faces opostas e com centragem por molas	Válvula direcional acionada por dois conjuntos opostos de solenóide que aciona piloto hidráulico e centrada por molas Piloto hidráulico com suprimento e dreno externos	

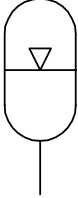
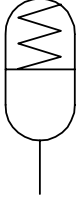
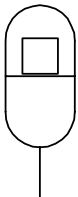
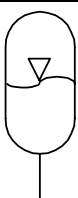
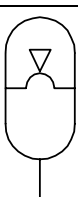
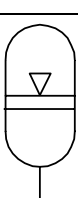
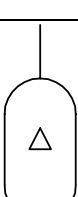
9.4	Aplicação de símbolos de modos de acionamento em símbolos de componentes	
9.4.1	Símbolos para os modos de acionamento com um sentido de operação são desenhados adjacentes ao símbolo do elemento acionado. Deste modo, forças imaginárias provenientes dos elementos de acionamento (neste caso o solenóide e a mola) movimentam o componente para outra posição, em resposta ao sinal de acionamento	
9.4.2	Para válvulas com três ou mais posições distintas, o acionamento específico das posições internas pode ser ilustrado estendendo as fronteiras para cima ou para baixo dos símbolos da válvula e adicionando o acionamento apropriado	
9.4.3	Se o entendimento não for prejudicado, os símbolos dos elementos de acionamento da posição central de válvulas de três posições podem ser desenhados ao lado dos retângulos das extremidades	
9.4.4	Se um elemento acionado é centralizado por meio de pressão, desenha dois triângulos referentes à pressão nas extremidades do retângulo	
9.4.5	Linhas de pilotagem internas e linhas de dreno são usualmente omitidas nos símbolos simplificados Se há uma linha simples de pilotagem externa e/ou uma linha de dreno em um componente acionado indiretamente, ela(s) devem ser mostradas somente em uma das extremidades do componente para os símbolos simplificados. Os símbolos localizados em equipamentos devem mostrar todas as conexões externas	 
9.4.6	Em acionamentos paralelos (OU), os símbolos para os elementos de acionamento devem ser mostrados um ao lado do outro como, por exemplo, um solenóide e um botão de empurrar, os quais atuarão independentemente Para os acionamentos em série (E), os símbolos de acionamento dos sucessivos estágios devem ser mostrados em linha (seqüência). Por exemplo, o solenóide aciona a válvula piloto, a qual, por sua vez, aciona a válvula principal	 
9.4.7	Desenhar o detente dividido de acordo com o número de posições e na mesma disposição do elemento acionado. Os entalhes são mostrados somente nas posições de repouso. Desenhar uma linha indicando o local correspondente à posição inicial da unidade	

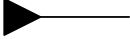
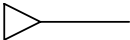
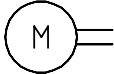
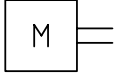
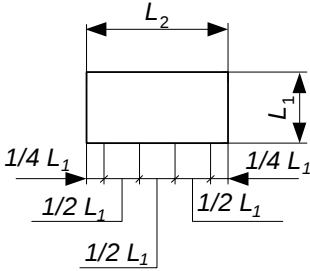
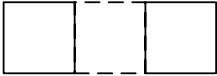
Referência	Descrição	Aplicação ou explicação do símbolo	Símbolo
10	UNIDADES DE CONVERSÃO E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA		
10.1	Conversores rotativos de energia		
10.1.1	As regras gerais para identificação do sentido da rotação, vazão e posição dos elementos de acionamento para conversores rotativos de energia está apresentada no anexo A		
10.1.2	Exemplos		
10.1.2.1	Bomba hidráulica	Bomba hidráulica com um sentido de escoamento, deslocamento fixo e um sentido de rotação	
10.1.2.2	Compressor de ar	Compressor de ar com um sentido de escoamento, deslocamento fixo e um sentido de rotação	
10.1.2.3	Bomba hidráulica	Bomba hidráulica com dois sentidos alternados de escoamento, deslocamento fixo e dois sentidos de rotação	
10.1.2.4	Motor hidráulico	Motor com um sentido de escoamento, deslocamento variável, mecanismo de acionamento indefinido, dreno externo, um sentido de rotação, ligado à duas pontas de eixo.	
10.1.2.5	Motor pneumático	Motor pneumático reversível, com dois sentidos alternados de escoamento, deslocamento fixo e dois sentidos de rotação	
10.1.2.6	Bomba-motor hidráulico	Bomba-motor hidráulico com um sentido de escoamento, deslocamento fixo e um sentido de rotação	
10.1.2.7	Bomba-motor hidráulico	Bomba-motor hidráulico com dois sentidos de escoamento, deslocamento variável, acionamento muscular, dreno (externo) e dois sentidos de rotação	
10.1.2.8	Motor oscilante ou oscilador pneumático	Oscilador com ângulo limitado de rotação e dois sentidos de rotação	
10.1.2.9	Motor oscilante ou oscilador hidráulico	Oscilador com ângulo limitado de rotação e dois sentidos de rotação	
10.1.2.10	Unidade de acionamento hidráulica com velocidade variável	Unidade de acionamento hidráulica com um sentido de rotação, bomba com deslocamento variável	

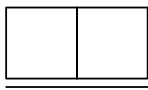
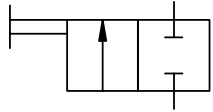
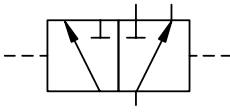
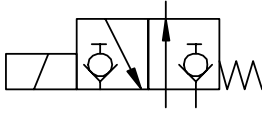
10.1.2.11	Bomba hidráulica com compensação de pressão	Bomba hidráulica com um sentido de rotação e um sentido de escoamento, mola regulável e dreno externo	
10.1.2.12	Bomba-motor variável	Bomba-motor variável com dois sentidos de rotação, mola centralizadora para deslocamento nulo, pilotada externamente com dreno (o sinal de pressão n provoca o deslocamento no sentido N)	

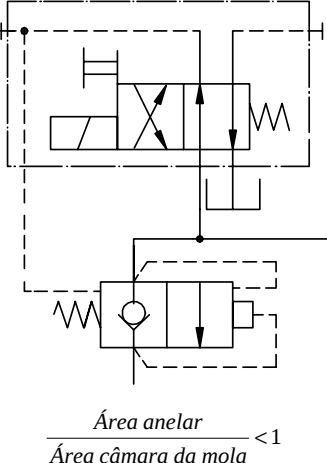
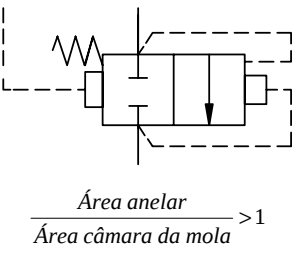
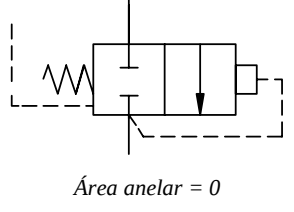
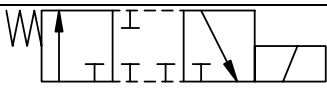
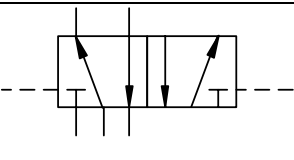
Referência	Descrição	Aplicação ou explicação do símbolo	Símbolo
10.3	Conversores lineares de energia		
10.3.1	Regras gerais Caso seja necessário, a relação entre a área anelar do cilindro e a área sem a haste deve ser fornecida sobre o símbolo do cilindro		
10.3.2	Exemplos		
10.3.2.1	Cilindro pneumático de ação simples e haste simples	Retorno por força não especificada, com haste em somente um lado do êmbolo e exaustão da área anelar para atmosfera	 Detalhado Simplificado
10.3.2.2	Cilindro hidráulico de ação simples e haste simples, com avanço por mola	Avanço por mola, com haste em somente um lado do êmbolo e dreno para o reservatório	 Detalhado Simplificado
10.3.2.3	Cilindro pneumático de ação dupla e haste dupla	Com haste em ambos os lados do êmbolo	 Detalhado Simplificado
10.3.2.4	Cilindro hidráulico de ação dupla e haste simples, com amortecimento	Com haste simples, com amortecimento ajustável em ambos os lados, e razão de áreas do pistão de 2:1	 Detalhado Simplificado
10.3.2.5	Cilindro pneumático de ação dupla e haste simples, com amortecimento	Com haste simples e com amortecimento ajustável no avanço	 Detalhado Simplificado
10.3.2.6	Cilindro pneumático de ação dupla e haste simples, com amortecimento	Com haste simples e com amortecimento fixo no retorno	 Detalhado Simplificado
10.3.2.3	Cilindros telescópicos		
10.3.2.3.1	Cilindro pneumático telescópico de ação simples		
10.3.2.3.2	Cilindro hidráulico telescópico de ação dupla		

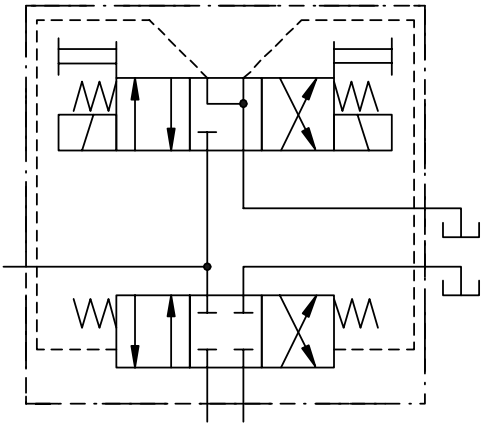
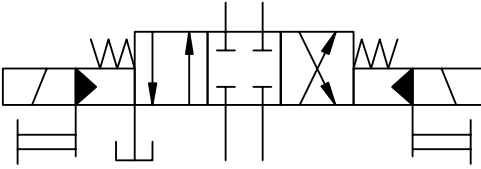
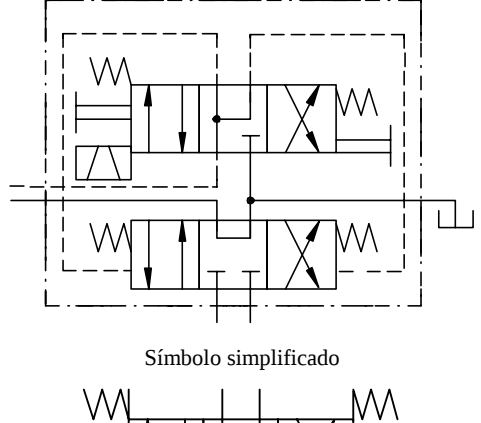
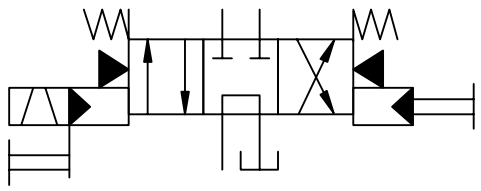
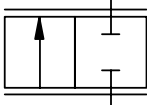
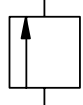
10.4	Conversores especiais de energia		
10.4.1	Atuador hidráulico/pneumático de ação simples ou conversor hidropneumático	Equipamento que transforma pressão pneumática em pressão hidráulica substancialmente igual ou vice versa	
10.4.2	Atuador hidráulico/pneumático de ação contínua ou conversor hidropneumático	Equipamento que transforma pressão pneumática em pressão hidráulica substancialmente igual ou vice versa	
10.4.3	Intensificador de pressão hidráulico		
10.4.4	Intensificador de pressão pneumático		
10.4.5	Intensificador de pressão para dois tipos de fluido, ação simples ou intensificador de pressão hidropneumático	Equipamento que transforma a pressão x em uma pressão y. Por exemplo, uma pressão pneumática x é transformada em uma pressão hidráulica y	
10.4.6	Intensificador de pressão para dois tipos de fluido, de ação contínua	Equipamento que transforma a pressão x em uma pressão y. Por exemplo, uma pressão pneumática x é transformada em uma pressão hidráulica y	
10.5	Armazenamento de energia (acumuladores, garrafa de gás e reservatórios)		
10.5.1	Regras gerais A conexão de trabalho de um acumulador deve ser indicada através de uma linha contínua e ligada à região inferior (fundo) do acumulador A conexão de trabalho de uma garrafa de gás deve ser indicada através de uma linha contínua e ligada à região superior (topo) da garrafa Caso a natureza do acumulador necessite ser indicada (peso, mola, gás), devem ser usados os símbolos apropriados, conforme os exemplos a seguir		
10.5.2	Exemplos		
10.5.2.1	Acumulador (sempre na posição vertical)	Sem indicação da natureza da carga	

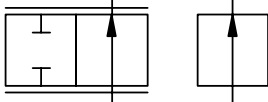
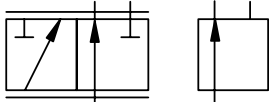
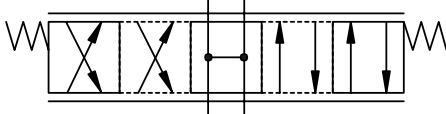
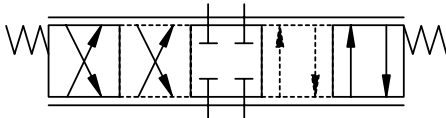
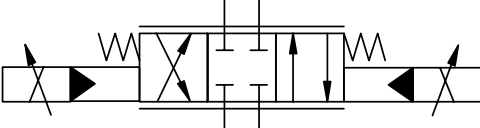
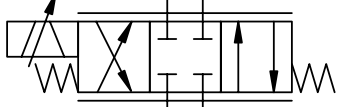
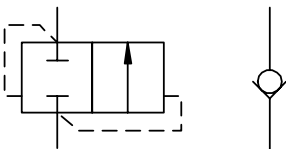
10.5.2.2	Acumulador carregado por gás	O fluido é mantido sob pressão através do gás comprimido (sem separador)	
10.5.2.3	Acumulador por mola		
10.5.2.4	Acumulador por peso morto		
10.5.2.5	Acumulador por gás com bexiga		
10.5.2.6	Acumulador por gás com membrana (diafragma)		
10.5.2.7	Acumulador por gás com pistão		
10.5.2.8	Garrafa de gás auxiliar (sempre na posição vertical)	Capacidade extra de gás visando suplemento dos acumuladores	
10.5.2.9	Reservatório de ar		
10.6	Fontes de energia		

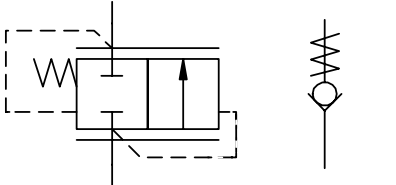
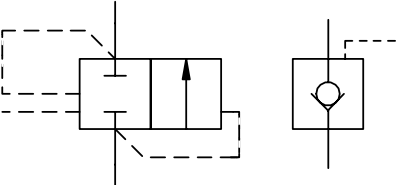
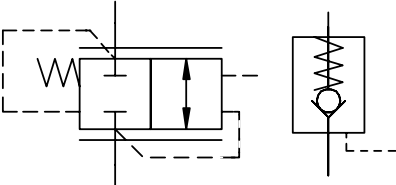
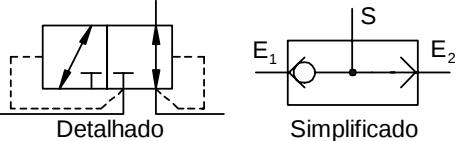
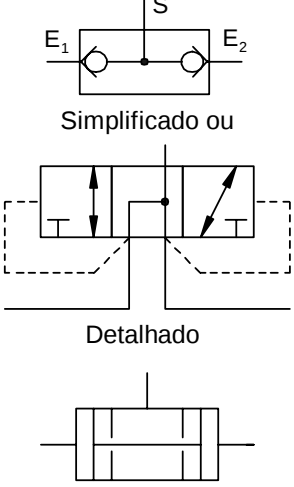
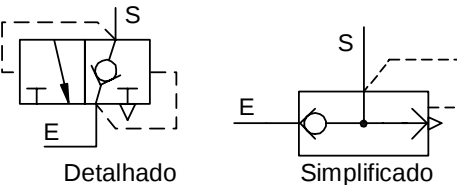
10.6.1	Exemplos		
10.6.1.1	Fonte de energia hidráulica	Símbolo geral: simplificado Indica o sentido e a natureza do fluido	
10.6.1.2	Fonte de energia pneumática	Símbolo geral: simplificado Indica o sentido e a natureza do fluido	
10.6.1.3	Motor elétrico		
10.6.1.4	Motor de acionamento não elétrico		
11	Distribuição e regulação de energia		
11.1	Regras gerais Símbolos para os componentes acionados são compostos de uma ou mais caixas adjacentes desenhadas uma ao lado das outras, onde cada caixa corresponde a uma posição. Por exemplo, dois retângulos adjacentes representam uma válvula com duas posições definidas O termo 'caixa' se refere à um retângulo ou quadrado representativo do símbolo As funções desempenhadas, tais como direção de escoamento, retenção, conexão das vias e resistências, devem ser descritas através dos símbolos apropriados contidos dentro do símbolo principal. A posição de operação pode ser visualizada como sendo uma caixa deslocada, de modo que as conexões externas sejam alinhadas com as portas (linhas internas de escoamento) da caixa, conforme o comando executado Nos circuitos, as conexões são normalmente representadas no quadrado que indica a posição não operada		 Posição não operada Posição não operada
11.1.1	Conexões externas normalmente estão distribuídas na caixa (símbolo) em intervalos regulares, conforme indicado. Se para cada lado do símbolo somente uma conexão externa estiver ligada (uma entrada e uma saída), ela deverá ser desenhada no meio da caixa		
11.1.2	Quando uma condição transitória entre duas posições definidas for representada, está será indicada por um quadrado adicional de linhas horizontais tracejadas, conforme indicado		

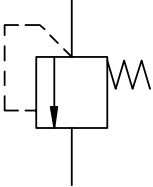
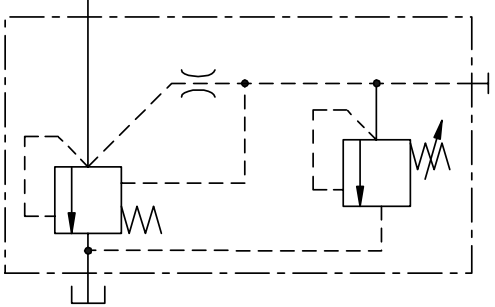
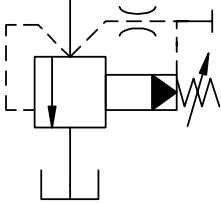
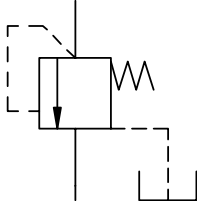
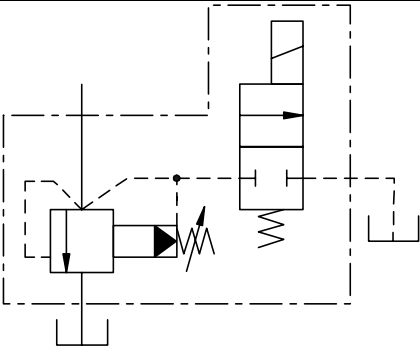
11.1.4	Para válvulas com duas ou mais posições distintas de operação e um número infinito de posições intermediárias que provocam níveis variáveis de abertura, faz-se a indicação através de duas linhas paralelas ao longo do comprimento do símbolo, conforme mostrado		 Duas posições extremas  Com posição central (neutra)
11.2	Válvulas de controle direcional		
11.2.1	Exemplos		
11.2.1.1	Válvula de fechamento	Válvula direcional (VD), duas vias, duas posições(2/2) (NF), acionamento manual	
11.2.1.2		Válvula direcional com três vias, duas posições (3/2), acionada por pressão	
11.2.1.3	Válvula de assento 3/2	Válvula direcional, três vias, duas posições (NA), operada por solenóide atuando contra mola de retorno, com bloqueio por assento	

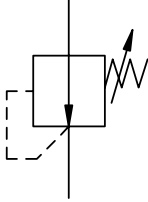
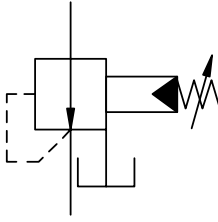
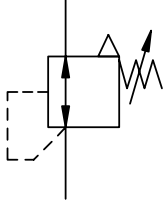
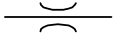
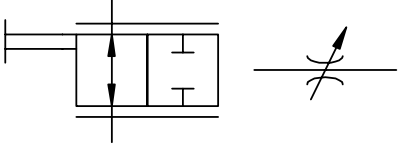
11.2.1.4	Válvula direcional 2/2 com um estágio piloto	Estágio piloto Válvula direcional 4/2, acionada por solenóide e retorno por mola, acionamento manual de emergência, dreno externo do piloto, pressão de suprimento proveniente da área anelar do estágio principal Estágio Principal Duas vias, duas posições (2/2), uma via conectada à área anelar e a outra conectada à área diferencial, acionamento controlado por despressurização do piloto, retorno por mola	 $\frac{\text{Área anelar}}{\text{Área câmara da mola}} < 1$  $\frac{\text{Área anelar}}{\text{Área câmara da mola}} > 1$  $\text{Área anelar} = 0$
11.2.1.5	Válvula direcional 3/2	Com indicação de transição, acionada por solenóide e retorno por mola	
11.2.1.6	Válvula direcional 5/2	Pilotada (acionamento por pressão) para ambas as posições A disposição das conexões externas deve estar de acordo com o item 11.1.1	

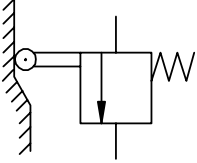
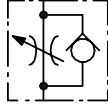
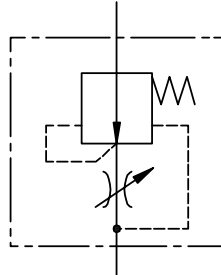
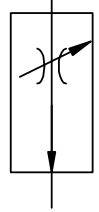
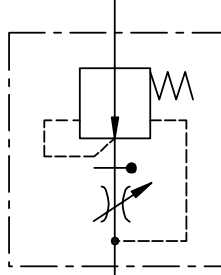
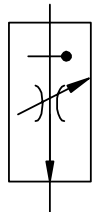
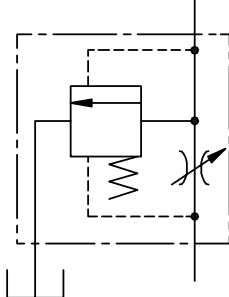
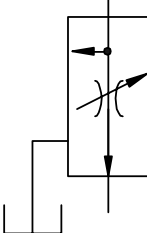
11.2.1.7	Válvula direcional 4/3 Com um estágio piloto	Estágio piloto Válvula direcional 4/3, centrada por mola, acionada por solenóides com comando manual de emergência, dreno do piloto externo Estágio principal Válvula direcional 4/3, centragem por mola, centro fechado, acionamento interno por pressão para ambas as posições As linhas piloto não estão sob pressão na posição central	Símbolo detalhado  Símbolo simplificado 
11.2.1.8	Válvula direcional 4/3 Com um estágio piloto	Estágio piloto Válvula direcional 4/3, centragem por mola, acionada por solenóide de duas bobinas operando em sentido oposto, acionamento de emergência manual, pressão de suprimento piloto externa Estágio principal Válvula direcional 4/3, centragem por mola e pressão, comandada por despressurização da linha piloto, centro em tandem As linhas piloto estão sob pressão na posição central	Símbolo detalhado  Símbolo simplificado 
11.2.1.9	Válvula de controle contínuo direcional	Engloba servoválvulas e válvulas direcionais proporcionais Quatro vias, duas posições finais distintas e uma posição neutra, centragem por mola, posições intermediárias infinitas	
11.2.1.9.1	Duas vias, duas posições (2/2), normalmente fechada (NF) no estado de repouso (não acionado), com variação contínua de posição		 Detalhado  Simplificado

11.2.1.9.2	Duas vias , duas posições (2/2), normalmente aberta (NA) no estado de repouso, com variação contínua de posição		 Detalhado Simplificado
11.2.1.9.3	Duas posições, três vias (3/2), normalmente aberta (NA), com variação contínua de posição		 Detalhado Simplificado
11.2.1.9.4	Com recobrimento negativo (centro aberto)	Com todas as vias abertas na posição central Sinônimos: centro subcrítico, sobreposição negativa	
	Sem recobrimento (centro fechado)	Com todas as vias fechadas na posição central e abertas durante a transição Sinônimos: centro crítico, sobreposição nula	
11.2.1.9.5	Com recobrimento positivo (centro fechado)	Com todas as vias bloqueadas na posição central Sinônimos: centro supercrítico: sobreposição positiva	
	Válvula direcional proporcional	Quatro vias, três posições, centro fechado com centragem por mola, dois estágios, com acionamento por solenóide proporcional	
11.2.1.9.10	Servoválvula	Quatro vias, três posições, centro fechado, centragem por mola, acionada por motor torque, operando proporcionalmente em sentidos opostos	
11.3	Válvulas de Retenção, válvulas alternadoras, válvulas de escape (exaustão)		
11.3.1	Regra Os símbolos simplificados são adequados para a maioria dos propósitos		
11.3.2	Exemplos		
11.3.2.1	Válvula de retenção simples	Válvula de retenção simples (abre quando a pressão de entrada for superior à pressão de saída)	 Detalhado Simplificado

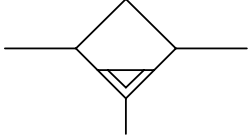
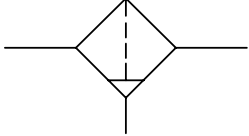
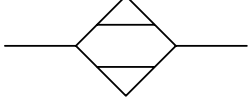
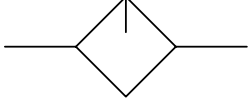
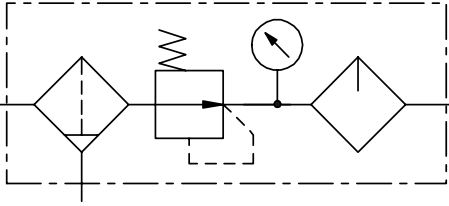
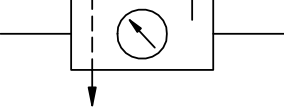
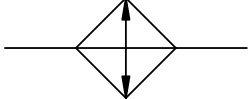
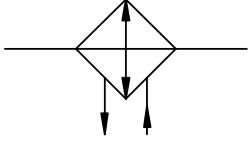
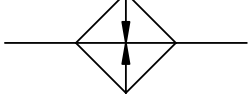
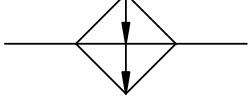
11.3.2.2	Válvula de retenção por mola	Válvula de retenção simples com retorno por mola (abre quando a pressão de entrada for superior à pressão de saída somada à força da mola)	 Detalhado Simplificado
11.3.2.4	Válvula de retenção pilotada	Válvula de retenção pilotada para fechar, sem mola	 Detalhado Simplificado
11.3.2.5	Válvula de retenção pilotada	Válvula de retenção pilotada para abrir, com mola	 Detalhado Simplificado
11.3.2.6	Válvula alternadora	A via de entrada que está com pressão mais elevada é conectada com a via de saída, enquanto que a outra porta de entrada, que está com pressão inferior, é mantida fechada	 Detalhado Simplificado
11.3.2.7	Válvula de simultaneidade	A via de saída da válvula está sob pressão somente se ambas as vias de entrada estão sob pressão	 Simplificado ou Detalhado
11.3.2.8	Válvula de escape rápido	Quando a via de entrada está sem carga a via de saída fica livre para descarga	 Detalhado Simplificado
11.4	Válvulas de controle de Pressão		

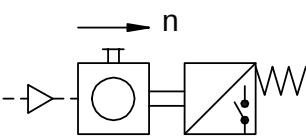
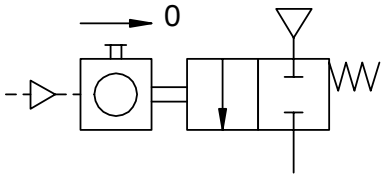
11.4.1	Regras gerais Válvulas de controle de pressão são componentes designados para controle e limitação de pressão A pressão piloto interna ou externa, representada em um lado do quadrado, opera contra uma força presente no outro lado A linha de dreno externa deverá ser indicada		
11.4.2	Exemplos		
11.4.2.1	Válvula de alívio de simples estágio	A pressão de entrada gera uma força que se opõe a uma força decorrente de uma mola, provocando a abertura da via de retorno ou escape e, conseqüentemente, o controle da pressão	
11.4.2.2	Válvula de alívio de duplo estágio	Com via para acionamento por piloto à distância (controle remoto)	 símbolo detalhado  símbolo simplificado
11.4.2.3	Válvula de seqüência	Simples estágio, pressão de ajuste de abertura por mola, com dreno externo	
11.4.2.4	Válvula de alívio operada eletricamente	Para abertura em baixa pressão	

11.4.2.5	Válvula redutora de pressão	Estágio simples, com mola regulável	
11.4.2.6	Válvula redutora de pressão	Duplo estágio, mola de ajuste (pré-carga) com pilotagem hidráulica, piloto externo de retorno	
11.4.2.7	Válvula pneumática redutora de pressão com alívio	Se a pressão na saída excede a pressão regulada, a pressão é descarregada para a atmosfera	
11.5	Válvulas de Controle de Vazão		
11.5.1	Regras gerais Válvulas com compensação podem proporcionar uma vazão controlada praticamente constante, em pelo menos uma das seguintes condições: a.) Com variação na pressão de entrada acima da pressão de saída (compensação de pressão) b.) Com variação na temperatura do fluido (compensação de temperatura) O símbolo simplificado não indica a forma de acionamento nem o estado inicial da válvula		
11.5.2	Exemplos		
11.5.2.1	Válvulas de controle de vazão sem compensação	A vazão através da válvula é alterada em função da variação no diferencial de pressão e/ou na temperatura e/ou na viscosidade do fluido	
11.5.2.1.1	Válvula redutora de vazão fixa Restrição fixa	Com orifício de passagem fixo	
11.5.2.1.2	Válvula redutora de vazão ajustável Restrição variável	Sem indicação do método de acionamento, nem do estado (aberto, fechado) da válvula	 Detalhado Simplificado
11.5.2.1.3	Válvula de bloqueio	Normalmente uma das posições é completamente fechada	

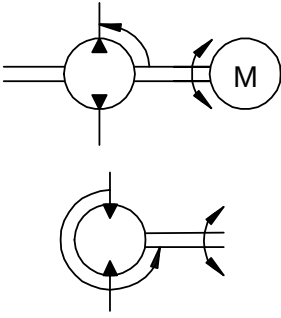
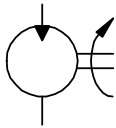
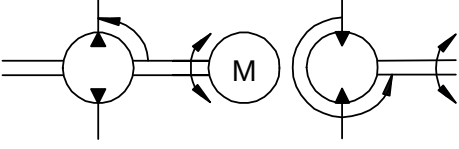
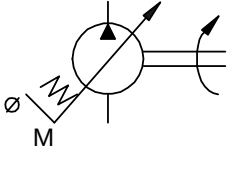
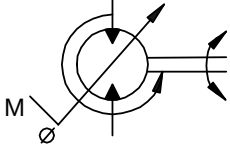
11.5.2.1.4	Válvula redutora de vazão ajustável Restrição variável	Com controle mecânico por rolete contra uma mola de retorno. Por exemplo, válvula de desaceleração ou frenagem	
11.5.2.1.5	Válvula redutora de vazão com retorno livre Restrição unidirecional	Restrição variável, com caminho livre em um dos sentidos do escoamento. No sentido oposto há uma restrição ajustável	
11.5.2.2	Válvulas de controle de vazão com compensação	Válvula com compensação interna para minimizar a influência da alteração na viscosidade do fluido ou da variação na diferença de pressão entre a entrada e a saída da válvula	
11.5.2.2.1	Válvula reguladora de vazão em série	Com restrição (orifício de passagem) regulável. No símbolo simplificado, a seta sobre a linha de escoamento do fluido indica a compensação de pressão.	  Detalhado Simplificado
11.5.2.2.2	Válvula reguladora de vazão em série, com compensação de temperatura	Com compensação de pressão e temperatura	  Detalhado Simplificado
11.5.2.2.3	Válvula reguladora de vazão de três vias	Válvula de controle de vazão de três vias com compensação de pressão e descarga do excedente do fluido para o reservatório (ou via adicional)	  Detalhado Simplificado

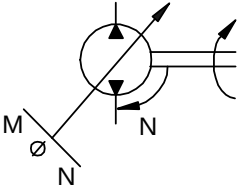
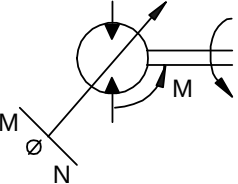
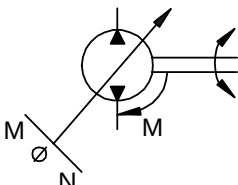
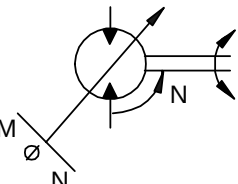
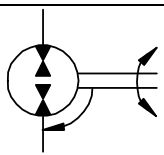
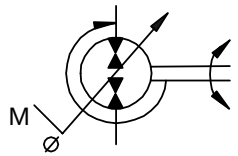
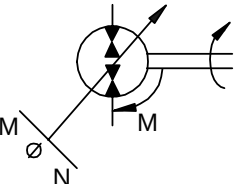
11.5.2.2.4	Válvula divisora de vazão	A vazão é dividida em dois caminhos distintos com uma relação de vazão pré-fixada. A relação da vazão é acentuadamente influenciada pela variação no diferencial de pressão. As setas indicam a compensação de pressão	
12	Armazenamento e Condicionamento do fluido		
12.1	Reservatórios hidráulicos	As linhas de dreno e retorno procedentes de símbolos de componentes podem ser ligadas a um pequeno símbolo local do reservatório	
12.1.2	Exemplos		
12.1.2.1	Reservatório atmosférico (aberto à atmosfera)	Reservatório à pressão atmosférica, com linha de retorno abaixo do nível do fluido e filtro de ar	
12.1.2.2	Reservatório atmosférico	Dreno ou retorno local	
12.1.2.3	Reservatório pressurizado	Pressurizado ou selado, com linhas de escoamento abaixo do nível do fluido, sem conexão para atmosfera	
12.2	Condicionadores		
12.2.1	Regras gerais	Os símbolos de separadores ou de montagens com separadores devem ser desenhadas somente na posição horizontal	
12.2.2	Exemplos		
12.2.2.1	Filtro genérico	Símbolo geral	
12.2.2.2	Filtro com elemento magnético adicional		
12.2.2.3	Filtro com indicador de contaminação		
12.2.2.4	Separador com dreno manual		

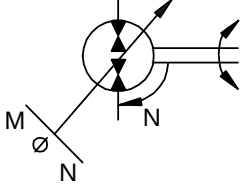
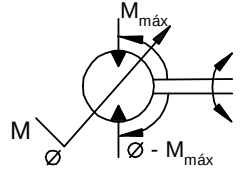
12.2.2.5	Separador com dreno automático		
12.2.2.6	Filtro com separador. Dreno manual		
12.2.2.7	Desumidificador de ar	Uma unidade de secagem de ar através de processo químico, por exemplo	
12.2.2.8	Lubrificador	O óleo é adicionado ao ar objetivando lubrificar o equipamento receptor de ar	
12.2.2.9	Unidade de condicionamento de	Unidade que consiste de filtro com separador, válvula redutora de pressão, manômetro e um lubrificador A seta vertical indica o separador	 Símbolo detalhado  Símbolo simplificado
12.2.3	Trocadores de calor	O sentido das setas no losango indica a dissipação de calor, no caso do resfriador, e introdução de calor no caso de aquecedor	
	Exemplos		
12.2.3.1	Resfriador	Sem indicação das linhas de escoamento do fluido refrigerante	
12.2.3.2	Resfriador	Resfriador com indicação das linhas de escoamento do fluido refrigerante	
12.2.3.3	Aquecedor		
12.2.3.4	Controlador de temperatura	O calor pode ser tanto introduzido quanto dissipado	
13	Equipamentos suplementares		

13.1	Instrumentos de medição e indicadores		
13.1.1	Exemplos		
13.1.1.1	Indicador de pressão	Símbolo genérico	
13.1.1.2	Manômetro/ vacuômetro		
13.1.1.3	Manômetro diferencial		
13.1.1.4	Contador de pulsos	Com sinal de saída elétrico e reinicializador manual	
13.1.1.5	Contador de pulsos	Com sinal de saída pneumático e reinicializador manual	
13.1.1.6	Indicador de nível do fluido	Somente na posição vertical	
13.1.1.7	Termômetro		
13.1.1.8	Indicador de vazão		
13.1.1.9	Medidor de vazão		
13.1.1.10	Medidor de vazão cumulativo (totalizador)		
13.1.1.12	Transdutor de vazão	Gera um sinal elétrico analógico a partir de uma entrada em vazão	
13.1.1.13	Tacômetro	Medidor de frequência da rotação	
13.1.1.14	Medidor de torque (dinamômetro)	Medição de torque	

13.1.2.1	Termopar	Gera um sinal elétrico analógico a partir de uma entrada em temperatura	
13.1.2.2	Pressostato	Fornecer um sinal elétrico à uma pressão pré-ajustada.	
13.1.2.3	Chave de fim de curso		
13.1.2.8	Transdutor de pressão hidráulica	Gera um sinal elétrico analógico a partir de uma entrada em pressão	
13.1.2.9	Transdutor de pressão pneumática	Gera um sinal elétrico analógico a partir de uma entrada em pressão	
13.1.2.10	Chave de nível fixa		
13.1.2.11	Fluxostato		
13.1.2.12	Termostato		
13.1.2	Outros Acessórios		
13.1.2.13	Silenciador pneumático	Reduz o ruído do escape do ar	
	Anexo A Identificação do sentido da rotação, vazão e posição dos elementos de acionamento para conversores rotativos de energia		
A.1	Regras gerais: Para identificar as relações entre: – o sentido do escoamento – o sentido de rotação do eixo – a posição do elemento de acionamento integral As seguintes regras podem ser usadas:		

	O sentido de rotação do eixo é mostrado utilizando uma flecha concêntrica em volta do símbolo principal, com a origem da seta localizada na porta de entrada de potência e a outra extremidade localizada na porta de saída de potência. Para unidades com rotações nos dois sentidos, somente um sentido arbitrário é identificado. Para unidades com eixo passante, deve-se selecionar somente uma extremidade do eixo Para bombas, a origem da seta é localizada no eixo de acionamento e a outra extremidade (ponta da flecha) na linha de saída da vazão (linha de pressão) Para motores, as setas iniciam na linha de entrada da vazão e finalizam com a ponta da flecha localizada no eixo de acionamento A identificação de referência do acionamento de posição é mostrada próxima a extremidade da flecha concêntrica (cabeça da flecha), quando for o caso Se as características de acionamento são diferentes para cada um dos dois sentidos de rotação, as informações devem ser indicadas para ambas as possibilidades Desenhar uma linha mostrando as principais posições e as respectivas identificações de referência do acionamento (neste caso M-Ø-N) perpendicular à seta de controle. Devem-se utilizar preferencialmente os símbolos de identificação de posição contidos no próprio equipamento, onde Ø representa a posição de deslocamento nulo, M e N representam as posições extremas para deslocamentos máximos em ambos os sentidos. A união entre a seta de controle e a linha desenhada é feita no estado de repouso da unidade		
A.2	Exemplos		Símbolos
A.2.1	Unidade de simples função (motor)	Deslocamento fixo, um sentido de rotação	
A.2.2	Unidade de simples função	Unidade com deslocamento fixo e dois sentidos de rotação. Vincular o sentido de rotação ao sentido da vazão	
A.2.3	Unidade de simples função (bomba)	Bomba com deslocamento variável (somente em um sentido), um sentido de rotação. (Quando houver somente uma posição de acionamento, a mesma não precisa ser mostrada. Neste exemplo, a referência M-Ø, está colocada apenas para fins de esclarecimento)	
A.2.4	Unidade de simples função (motor)	Unidade com deslocamento variável (para somente um dos sentidos) e dois sentidos de rotação. Mostra o sentido de rotação relacionado ao sentido da vazão	

A.2.5	Unidade de simples função	Unidade com deslocamento variável (duplo sentido) e um sentido de rotação. Mostra o sentido de rotação e a posição de acionamento (N ou M) relacionada ao sentido do escoamento	 Bomba hidráulica  Motor hidráulico
A.2.6	Unidade de simples função	Unidade com deslocamento variável (duplo sentido) e dois sentidos de rotação. Mostra um único sentido de rotação e a posição de acionamento apropriada relacionada ao sentido do escoamento	 Bomba hidráulica  Motor hidráulico
A.2.7	Unidade bomba/ motor	Unidade com deslocamento fixo e dois sentidos de rotação. Mostra somente o sentido de rotação relacionado ao sentido da vazão, considerando a unidade como se fosse uma bomba	
A.2.8	Unidade bomba/ motor	Unidade com deslocamento variável (em apenas um sentido) e dois sentidos de rotação. Mostrar somente o sentido de rotação relacionado ao sentido da vazão, considerando a unidade como se fosse uma bomba	
A.2.9	Unidade bomba/ motor	Unidade com deslocamento variável (duplo sentido) e um sentido de rotação. Mostrar o único sentido de rotação e a posição de comando apropriada relacionada ao sentido do escoamento, considerando a unidade como se fosse uma bomba	

A.2.10	Unidade bomba/ motor	Unidade com deslocamento variável (duplo sentido) e dois sentidos de rotação. Mostrar somente o sentido de rotação e a posição de comando apropriada relacionada ao sentido do escoamento, considerando a unidade como se fosse uma bomba	
A.2.11	Motor	Motor com dois sentidos de rotação, deslocamento continuamente variável em um sentido de rotação e fixo no outro sentido. Mostrar ambas as possibilidades	

Bibliografia

- 1 BOAVENTURA, Thiago. **Hydraulic Compliance Control of the Quadruped Robot HyQ**. 2013. Tese (Doutorado) – Istituto Italiano di Tecnologia e University of Genoa, Italy.
- 2 JELALI, M.; KROLL, A. **Hydraulic Servo-systems. Modelling, Identification and Control**. [S.l.]: Springer, 2003.
- 3 MERRITT, Herbert E. **Hydraulic control systems**. [S.l.]: Wiley-Interscience, 1967.
- 4 NOF, Shimon Y. **Springer handbook of automation**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2009.
- 5 PARKER. Tecnologia Eletrohidráulica Industrial. **Apostila M1003-1BR, São Paulo: Parker Hannifin Corporation**, 2006.
- 6 _____. Tecnologia Eletropneumática Industrial. **Apostila M1002-2BR, São Paulo: Parker Hannifin Corporation**, 2001.
- 7 _____. Tecnologia Hidráulica Industrial. **Apostila M2001-1BR, São Paulo: Parker Hannifin Corporation**, 1999.
- 8 _____. Tecnologia Pneumática industrial. **Apostila M1001BR, São Paulo: Parker Hannifin Corporation**, 2000.
- 9 SILVA, Clodoaldo. Automação e Controle. **Clube da eletrônica**, 2011.