

Noções Básicas sobre Automação Industrial

Sumário

REDES DE COMUNICAÇÃO INDUSTRIAIS	2
SISTEMA DE SUPERVISÃO	3
CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL - CLP OU PLC	6
INTERFACE HOMEM-MÁQUINA	7
INSTRUMENTAÇÃO	9
SENSOR DE CARGA	11
SENSOR DE DESLOCAMENTO	12
SISTEMAS DE CONTROLE	13
DEFINIÇÕES	13
PRINCÍPIOS BÁSICOS DE PROJETO DE SISTEMAS DE CONTROLE	14
ETAPAS DO PROJETO DE UM SISTEMA DE CONTROLE	15
AÇÕES DE CONTROLE BÁSICAS	16
EFEITOS DAS AÇÕES DE CONTROLE INTEGRAL E DERIVATIVA SOBRE O DESEMPENHO DO SISTEMA	17
CONTROLADOR AUTOMÁTICO, ATUADOR E SENSOR	19
CONTROLADORES PNEUMÁTICOS	20
TIPOS DE ATUADOR	20
INDUTOR ELETROMAGNÉTICO	20
CILINDRO HIDRÁULICO	22
CILINDRO PNEUMÁTICO	26
CILINDRO ELÉTRICO	26
SISTEMAS PNEUMÁTICOS X SISTEMAS HIDRÁULICOS	27

REDES DE COMUNICAÇÃO INDUSTRIAIS

Os sistemas de automação e controle tem se apoiado cada vez mais em redes de comunicação industriais, seja pela crescente complexibilidade dos processos industriais, seja pela distribuição geográfica que se tem acentuado nas novas instalações industriais. Assim, praticamente não tem sido implementados sistemas que não incluam alguma forma de comunicação de dados, seja local, através de redes industriais, seja remota, implementadas em sistemas SCADA - sistema para aquisição, supervisão e controle de processos.

Embora essa disseminação de aplicação de comunicação seja recente, já de há muito que tem sido desenvolvidos diferentes esquemas de comunicação de dados em ambientes industriais, buscando sempre estruturas que garantam a segurança na transmissão dos dados, bem como a velocidade de comunicação. Um modelo bastante abrangente para os vários requisitos de comunicação no ambiente industrial é o de três níveis diferentes de requisito:

- Nível de informação: caracterizado por grandes volumes de troca de dados com constantes de tempo da ordem de grandeza de segundos (tempo não crítico). Essencialmente de domínio da informática;
- Nível de automação e controle: caracterizado por volumes moderados de dados com constantes de tempo da ordem de grandeza de centenas de milisegundos. Orientado para integração entre unidades inteligentes, de natureza diversa. Aplicações de característica contínua, de baixa velocidade e alta segurança. Mensagens complexas, com razoável nível de informações de diferentes propósitos;
- Nível de dispositivos de campo: caracterizado por volumes menores de dados com constantes de tempo da ordem de grandeza de dezenas de milisegundos (tempos de resposta muito curtos). Orientada a sensores e atuadores, tipicamente de natureza discreta. Ações executadas no nível dos dispositivos, sem necessidade de interação com níveis superiores;

Difícilmente uma única rede de comunicação local poderá atender todos os três níveis, havendo em geral, uma implementação de diferentes redes para atender cada característica específica. De forma geral, quando se está analisando o desempenho da rede, é usual colocar-se como primeira questão, qual é a taxa de transmissão de bits, para depois inquirir sobre o protocolo usado, e finalmente, sobre o mecanismo de troca de dados. Entretanto, o impacto sobre o desempenho de uma rede nesse aspecto é exatamente oposto a essa consideração: o efeito maior sobre o desempenho é dado pelo modelo, seguido pelo protocolo e finalmente pela taxa de transmissão. Concluído-se, não adianta comunicar a altas velocidades, com informações mal dispostas ou redundantes.

A camada de enlace, responsável pelo mecanismo de entrega de pacotes, tem sido implementada tradicionalmente em redes industriais com a estrutura origem/destino. Essa implementação agrega a cada mensagem enviada o endereço da estação de destino.

Observe-se que esta implementação, em determinadas circunstâncias, pode ser ineficiente: suponha-se que um mesmo dado deve ser transmitido a vários nós de uma mesma rede. O dispositivo que está transmitindo este dado deverá emitir uma mensagem com ambos endereços origem/destino para cada nó que deva receber tal mensagem. Portanto, aumentando o tráfego da rede e constituindo um operação repetitiva em conter sempre o endereço do dispositivo a ser enviado tal mensagem. Além disso, caso haja necessidade de

sincronizar vários dispositivos pertencentes a uma mesma rede, havendo alguma dificuldade em fazer tal sincronismo, uma vez que ao ser necessário mandar mensagens consecutivas a todos os dispositivos a serem sincronizados, ocorre um deslocamento desse instante de sincronismo.

Redes industriais mais recentes usam um modelo diferente para implementar a camada de enlace, chamado produtor/consumidor. Esta implementação está baseada no conceito de que alguns dispositivos são produtores de informações e outros são consumidores dessas. Nessa implementação, quando um produtor disponibiliza sua informação, esta é colocada na rede disponível para todos os dispositivos que sejam seus consumidores ao mesmo tempo, reduzindo o número de mensagens a serem emitidas, bem como reduzindo o próprio comprimento da mensagem, uma vez que não será necessário incluir ambos endereços de remetente e destinatário, sendo necessário tão somente identificar a informação a ser transmitida. Logo, o modelo produtor/consumidor, empregado nas redes de mercado mais recentes como Foundation Fieldbus, WorldFIP, ControlNet e DeviceNet, apresentam um modelo de rede eficiente, quanto a maximização de troca de dados, além de se ter um aumento da flexibilidade da rede.

SISTEMA DE SUPERVISÃO

O software de supervisão, localizado no nível de controle do processo das redes de comunicação, é o responsável pela aquisição de dados diretamente dos controladores lógico programáveis - CLP para o computador, pela sua organização, utilização e gerenciamento dos dados. Poderá ser configurado para taxas de varredura diferentes entre CLP's e inclusive, entre pontos de um mesmo CLP.

Os dados adquiridos devem ser condicionados e convertidos em unidades de engenharia adequadas, em formato simples ou de ponto flutuante, armazenando-os em um banco de dados operacional. A configuração individual de cada ponto supervisionado ou controlado, permite ao usuário definir limites para alarmes, condições e textos para cada estado diferente de um ponto, valores para conversão em unidade de engenharia, etc..

O software deve permitir que estratégias de controle possam ser desenvolvidas utilizando-se de funções avançadas, através de módulos dedicados para implementação de funções matemáticas e booleanas, por exemplo. Através destes módulos, poderá ser feito no software aplicativo de supervisão, o controle das funções do processo.

Os dados adquiridos podem ser manipulados de modo a gerar valores para parâmetros de controle como "set-point's". Os dados são armazenados em arquivos de dados padronizados. Estes arquivos poderão ser acessados por programas de usuários para realização de cálculos, alteração de parâmetros e dos seus próprios valores.

O software supervisor é visto como o conjunto de programas gerado e configurado no software básico de supervisão, implementando as estratégias de controle e supervisão, as telas gráficas de interfaceamento homem-máquina, a aquisição e tratamento de dados do processo, a gerência de relatórios e alarmes. Este software deve ter entrada de dados manual, através de teclado. Os dados serão requisitados através de telas com campos pré-formatados que o operador deverá preencher. Estes dados deverão ser auto-explicativos e possuírem limites para as faixas válidas. A entrada dos dados deve ser realizada por telas individuais, seqüencialmente, com seleção automática da próxima entrada. Após todos os

dados de um grupo ser inserido, esses poderão ser alterados ou adicionados pelo operador, que será o responsável pela validação das alterações.

A estratégia de supervisão e controle é desenvolvida com o software básico de supervisão que cria um banco de dados operacional com todos os dados de configuração do sistema. Os dados podem ser referentes a configuração da própria estratégia ou referentes aos pontos supervisionados (ou controlados). Em ambos os casos, o método e recursos utilizados para entrada de dados deve ser composta por ferramentas do tipo "Windows", com menus dirigidos, preenchimento de campos pré-formatados e múltiplas janelas.

Os dados da estratégia são gerais, afetando todo o banco, como por exemplo, a configuração de impressoras, os tipos de equipamentos conectados, as senhas, etc.. Os dados referentes aos pontos são individuais e abrangem os "TAG" (variáveis de entrada/saída - I/O - ou internas), as descrições, os limites de alarme, a taxa de varredura, etc.. Alterações podem ser realizadas com o sistema "on-line" (ligado ou à quente). Após a estratégia configurada, o software básico deve executar, gerenciar e armazenar o resultado de cálculos e operações realizadas, o estado dos pontos e todas as informações necessárias neste banco de dados.

O conjunto de telas do software de supervisão deve permitir os operadores, controlar e supervisionar completamente toda a planta. As telas deverão ser organizadas em estrutura hierárquica do tipo árvore, permitindo um acesso seqüencial e rápido. A seguir, é descrito as principais telas que o aplicativo deve conter:

- Telas de visão geral: são telas que apresentarão ao operador uma visão global de um processo, sob visualização imediata na operação da planta. Nestas telas são apresentados os dados mais significantes à operação e objetos que representam o processo. Os objetivos devem ser dotados de características dinâmicas, representando o estado de grupos de equipamentos e áreas do processos apresentado. Os dados devem procurar resumir de forma significativa os principais parâmetros a serem controlados (ou monitorados) do processo específico;
- Telas de grupo: são telas representativas de cada processo ou unidade, apresentando objetos e dados de uma determinada área de modo a relacionar funções estanques dos processos. Os objetos devem ser dotados de características dinâmicas representando o estado e/ou condição dos equipamentos da área apresentada. Os dados apresentados devem representar valores quantitativos dos parâmetros supervisionados (ou controlados). As telas de grupo também possibilita ao operador, acionar os equipamentos da área através de comandos do tipo abrir/fechar ou ligar/desligar. Além disso, o operador poderá alterar os parâmetros de controle ou supervisão, tais como "set-point's", limites de alarme, modos de controle, etc.;
- Telas de detalhe: são telas que atendem a pontos e equipamentos controlados (ou monitorados) individualmente. Serão compostas, quando possível, por objetos com características dinâmicas, representando o estado do equipamento. Os dados apresentam todos os parâmetros do ponto supervisionado (ou monitorado). As telas devem possibilitar ao operador alterar os parâmetros do equipamento, seus limites, os seus dados de configuração, etc.;
- Telas de malhas: são telas que apresentam o estado das malhas de controle. Todas as telas devem apresentar os dados das variáveis controladas exibidas, como "set-point's", limites e condição dos alarmes, valor atual e valor calculado, etc., em forma de gráfico de barras e em valores numéricos;
- Telas de tendência - histórica e real: são telas normalmente padrão do software básico de supervisão. Estas telas apresentam várias (em média seis) variáveis

simultaneamente, na forma gráfica, com valores coletados em tempo real ("on-line"), na forma de tendência real e na forma histórica "off-line" - valores de arquivos pré-armazenados em disco. Estas tendências podem ser apresentadas em forma de gráficos ou em forma tabular, com os últimos valores coletados para cada variável;

- Telas de manutenção: são compostas por informações de problemas, alarmes, defeitos e dados de manutenção das diversas áreas referentes ao processo e equipamentos destes, incluindo o próprio sistema de controle. As informações são do tipo histórico de falhas, programa de manutenção dos equipamentos (corretiva e preventiva), e informações gerais dos equipamentos (comerciais, assistências técnica, etc.). O histórico de falhas por equipamento ou área fica armazenado em arquivos no banco de dados do software de supervisão, possibilitando o tratamento destas informações através de telas orientativas à manutenção, ou através de programas de usuário para estatísticas de utilização e defeitos.

O software básico de supervisão possui um módulo para desenvolvimento de relatórios. Criados em formatos padrão, para os relatórios do tipo históricos, permitem ao operador a escolha de quais variáveis deseja visualizar. Os dados podem ser apresentados nas telas das estações com campos de identificação para "TAG", data, hora e descrição do ponto. Os relatórios poderão ser solicitados manualmente pelo operador e destinados para impressoras ou terminais de vídeo. Os dados históricos são armazenados em arquivos de modo que podem ser acessados pelos programas de relatórios, para serem trabalhados e apresentados à operação. Deste modo, os arquivos podem ser armazenados em meios magnéticos para utilização futura.

Dentro deste perfil de aplicativos de supervisão, encontram-se vários fabricantes como: WIZCON e WIZFACTORY- PC Soft International, Inc., RSI - Rockwell Automation, LabVIEW - National Instruments e ELIPSE WINDOWS - Elipse Software Ltda.

O Elipse Windows é um software para criação de aplicativos de supervisão e controle de processos nas mais diversas áreas, tais como: química, automação predial, manufatura, elétrica, segurança, laboratórios de testes, saneamento e máquinas. Desenvolvido em um ambiente avançado, orientado a objetos e de fácil configuração, permite a visualização e acionamento de variáveis, bancos de dados, relatórios, receitas e conectividade com todo tipo de sistemas, inclusive via Internet. Este aplicativo oferece sofisticados recursos que otimizam o tempo de desenvolvimento e a manutenção dos sistemas:

- Interface clara, lógica e intuitiva;
- Conectividade com a maioria dos equipamentos disponíveis no mercado ou mesmo com outros aplicativos Windows;
- Biblioteca gráfica para criação de telas; Suporte à rede e arquitetura cliente/servidor;
- Configuração e reconhecimento de alarmes;
- Relatórios formatados, graficamente customizados pelo usuário;
- Registro de dados em disco e análise histórica;
- Receitas que permitem a programação de valores para o envio ao processo;
- Scripts que permitem a criação de rotinas exclusivas, definindo lógicas e criando seqüências de atitudes através de uma linguagem de programação interativa, personalizando ao máximo o aplicativo;
- Suporte a banco de dados via ODBC (Open Data Base Connectivity) - Access, SQL Server, Oracle, dBase, etc.;
- CEP (Controle Estatístico de Processos);
- Módulo matemático para a formulação de equações;

- Controle de acesso por nível de usuário;
- Acesso remoto via Internet;
- Captura, registro e transmissão digital de imagens;
- Aquisição de eventos com precisão de 1ms;
- Criação de instrumentos virtuais.

O aplicativo Elipse Windows contém vários aplicativos que possibilitam a adequação do software, ao tamanho e complexibilidade do processo. A versão recomendada para o caso específico desse projeto é o Elipse MMI (MAN MACHINE INTERFACE). Esta versão é indicada para aplicações de médio porte, onde é necessária a coleta de dados e o tratamento de informações. Este é um software de supervisão completo com banco de dados proprietário, relatórios formatados, históricos, receitas, alarmes e controle estatístico de processos. Este aplicativo não possui ODBC, não permite Cliente NetDDE e não é Cliente de Rede, isto é, não possui aplicações remotas. A TAB. 1 apresenta a configuração exigida pelo software Elipse MMI.

TABELA 1 - Configuração exigida pelo software Elipse MMI

CONFIGURAÇÃO MÍNIMA	CONFIGURAÇÃO RECOMENDADA
PC 486DX2 66MHz	Pentium 133MHz
30 Mb de espaço livre em disco	30 Mb de espaço livre em disco
8 Mb RAM	32 Mb RAM
Monitor VGA	Monitor SVGA colorido
Windows 3.11	Windows 95 / NT
1 porta paralela para o Hardkey	1 porta paralela para o Hardkey
Mouse (para configuração)	Mouse (para configuração)

FONTE: Elipse Software Ltda., 1998

CONTROLADOR LÓGICO PROGRAMÁVEL - CLP OU PLC

Os Controladores Lógicos Programáveis - CLP - são um microcomputador de propósito específico dedicado para o controle de processos. Os CLP's foram desenvolvidos para o controle de sistemas com entradas e saídas binárias (de dois estados apenas: ligado - desligado, alto - baixo, etc.); porém, hoje têm adquirido muitas outras funções com alta confiabilidade, como é o caso de tratamento de sinais analógicos, controle contínuo multi-variáveis, controle de posição de alta precisão, etc. Os CLP's nasceram para substituir reles na implementação de intertravamentos e controle seqüencial se especializando no tratamento de variáveis digitais. Algumas características mais relevantes dos CLP's são:

- Caráter modular dos CLP's: permite adequar o controlador para qualquer aplicação, já que o projetista especifica só o número e tipos de módulos que precisa de acordo com o número de entradas, saídas e outras funções, que requer o processo a ser controlado, se adequando o controlador à aplicação;
- Flexibilidade dada pela programação: pode ser aplicado a qualquer tipo de processo e facilmente mudadas as funções através do programa, sem mexer na instalação;
- Comunicação: cada fabricante possui redes de comunicação proprietárias e possibilidades para comunicação com outros CLP's ou componentes como inversores de frequência, o que possibilita a distribuição de tarefas de controle e a centralização

das informações através de computadores onde rodam aplicativos de supervisão. Diversos meios físicos são possíveis: fios trançados, fibras ópticas ou ondas de rádio;

- Redundância: quando o sistema assim o requer, são fornecidos módulos e CPU's (Unidade Central de Processamento) redundantes (com mais de uma CPU) que garantem uma altíssima confiabilidade de operação até nos processos mais exigentes.

As linguagens de programação desenvolvidos para eles são fundamentalmente representados de três formas:

- Redes de contatos: similar aos esquemas elétricos de relês e contadores;
- Blocos funcionais: similares aos esquemas elétricos de circuitos digitais (AND, OR, XOR, etc.);
- Lista de instrução mnemônicas: similares aos programas escritos em assembler.

Os CLP's nasceram para substituir relês na implementação de intertravamentos e controle seqüencial, se especializando no tratamento de variáveis digitais. É caracterizado por:

- Fornecimento via projeto de integração;
- Sistema dividido em diversas CPU's de CLP's a fim de obter melhor performance em aplicações críticas. Redundância proporcionada pela duplicação de cartões de I/O (entrada / saída), fontes e CPU's;
- Redes de comunicação antes proprietárias, agora buscam obedecer a padrões internacionais. Uso recente de fibras ópticas;
- Total liberdade de escolha de parceiros de equipamentos e engenharia;
- Programação do supervisor independente da programação do CLP;
- As variáveis devem ser definidas duas vezes: na base de dados do SCADA e no programa do CLP;
- Tecnologia em geral aberta;
- Muito eficiente no tratamento de variáveis discretas com poder e flexibilidade crescentes no tratamento de variáveis analógicas;
- Hardware e software padrões de mercado;
- Custos globais baixos quando comparado a SDCD - Sistemas Distribuídos para Controle Digital.

INTERFACE HOMEM-MÁQUINA

Embora existam diversas tecnologias de controle, deve existir o interfaceamento entre o controle com o comando, proporcionando uma melhor integração do homem com a máquina. Para esta finalidade, utilizou-se com frequência anunciadores de alarmes, sinaleiros chaves seletoras botoeiras, etc..., que nos permitiam comandar ou visualizar estados definidos com ligado e desligado, alto ou baixo, temperatura elevada ou normal, mas não nos permitia visualizar os valores de alto, quanto alto, ou normal quão normal. Surgiram então os “displays” e chaves digitais ("thumbweel switches"). Os “displays” nos permitiam visualizar os valores das variáveis do processo, bem como mudar parâmetros pré definidos, como por exemplo, temporizações através das chaves digitais.

No entanto, este tipo de interface trazia dois problemas claros, o primeiro a dimensão da superfície do painel, que por muitas vezes necessitava de ser ampliada, somente para alojar tantos botões, ou informações que eram necessárias. Com o desenvolvimento das interfaces homem-máquina – IHM - com visores alfanuméricos, teclados de funções e

comunicação via serial com o dispositivo de controle, o qual muitas vezes era um computador pessoal – PC - estas traziam consigo os seguintes benefícios:

- Economia de fiação e acessórios, pois a comunicação com o CP seria serial com um ou dois pares de fio transados, economizando vários pontos de entrada ou saída do CP, e a fiação deste com os sinaleiros e botões.
- Redução da mão-de-obra para montagem, pois ao invés de vários dispositivos, agora seria montado apenas a IHM.
- Diminuição das dimensões físicas do painel
- Aumento da capacidade de comando e controle, pois a IHM pode ajudar em algumas funções o CP, com por exemplo massa de memória para armazenar dados, etc.
- Maior flexibilidade frente a alterações no campo.
- Operação amigável
- Fácil programação e manutenção.

A evolução seguinte foi a utilização de interfaces gráficas ao invés de alfanuméricas.

Quando utilizadas, as interfaces gráficas, em alguns casos mais simples substituem os sistemas supervisórios, ou quando usadas em sistemas de controle, integradas a sistemas supervisórios, estas além das funções das IHM's alfanuméricas já citadas, executam também funções de visualização que aliviam o sistema supervisório para que a performance das funções de supervisão, alarme, tendências, controle estatístico de processo entre outras possa ser elevada.

Logo, os softwares que tem a finalidade de servir como uma Interface Homem Máquina, não tem a finalidade de controlar nenhuma parte da máquina ou processo, ou seja, se ocorrer qualquer problema durante a sua execução, não prejudicará a automação da máquina ou processo. Normalmente estes softwares apresentam facilidades de configuração, mas estão limitados em segurança de dados, comunicação em rede, comunicação remota, controles de processo, etc.

Os softwares que possuem as mesmas funções dos softwares IHM, além de poderem efetuar controle, distribuir informações entre estações via rede com performance e segurança, etc., são os softwares do tipo “sistema de controle e aquisição de dados”-SCADA. Estes softwares normalmente são mais robustos e confiáveis para aplicações de grandes porte e para aplicações distribuídas em varias estações.

Uma tipo de IHM é o indicador de alta frequência modelo 2300, fabricado pela Gefran Brasil. A FIG. 1 apresenta a fotografia deste componente. Algumas de suas especificações técnicas:

- Dimensão: 96mm x 48mm por 152mm de profundidade;
- Tecnologia: microprocessador de 16 bits;
- Entradas: duas entradas analógicas 0...10V, 4...20mA;
- Faixa de indicação: -1999...+9999;
- Resolução: 4.000 steps;
- Comunicação serial: RS485 – 4fios;
- Tempo de aquisição: 2ms.



Figura 1 – Indicador de alta frequência (IHM)

FONTE: Gefran Brasil, 1997.

INSTRUMENTAÇÃO

Instrumentação é a ciência que aplica e desenvolve técnicas de medição, indicação, registro e controle de processos de fabricação, visando a otimização na eficiência desses processos. A utilização de instrumentos nos permite:

- Incrementar e controlar a qualidade do produto;
- Aumentar a produção e o rendimento;
- Obter e fornecer dados seguros da matéria prima e da qualidade produzida, além de ter em mãos dados relativos a economia dos processos.

Com o advento da eletrônica dos semicondutores, no início dos anos 50, surgiram os instrumentos eletrônicos analógicos, sendo então os instrumentos pneumáticos substituídos gradativamente pelos eletrônicos nos processos onde não existia o risco de explosão. Embora atualmente as indústrias estejam optando por sistemas eletrônicos mais modernos que utilizam instrumentos digitais, microprocessadores e, mais recentemente o "single-loop", o "multi-loop" e o sistema de controle distribuído - SDCD - os instrumentos pneumáticos ainda encontram aplicações nos processos industriais. Entretanto, já se fabricam instrumentos eletrônicos cujo risco de explosões não existe. De um modo geral, os elementos de controle são divididos em dois grupos: de campo e de painel.

Os elementos de campo são:

- a) Elementos primários: são dispositivos com os quais conseguimos detectar alterações na variável de determinado processo;
- b) Transmissor: instrumento que mede uma determinada variável e a envia à distância para um instrumento receptor, normalmente localizado no painel. O elemento primário pode ser ou não parte integrante do transmissor;
- c) Elemento final de controle: dispositivo que atua e modifica diretamente o valor da variável manipulada de uma malha de controle.

Os elementos de painel são:

- a) Indicador: instrumento que nos fornece uma indicação visual da situação das variáveis no processo. Um indicador pode se apresentar na forma analógica ou digital;
- b) Registrador: instrumento que registra a variável através do traço contínuo, pontos de um gráfico, etc.;
- c) Conversor: instrumento que recebe uma informação na forma de um sinal, altera a forma da informação e o emite como um sinal de saída. O conversor é também conhecido como transdutor. Todavia, transdutor é um termo genérico cujo emprego específico para a conversão de sinal não é recomendada;

- d) Controlador: instrumento que tem um sinal de saída que pode ser variável para manter a variável de processo (pressão, temperatura, vazão, nível, etc.) dentro do "set-point" estabelecido, ou para alterá-la de um valor previamente determinado. Pode ser dividido em:
- Analógico - possuem construção de tecnologia analógica, pneumática ou eletrônica;
 - Digital - possuem construção de tecnologia digital, podendo ser do tipo "single-loop" (controlador que atua apenas em uma malha de determinada variável - pressão, temperatura, vazão, nível, etc.) ou "multi-loop" (controlador que atua em várias variáveis - com um controlador pode-se controlar uma malha de pressão e uma de temperatura, simultaneamente, por exemplo).
- e) SDCD: sistema digital de controle distribuído
- Sistema: conjunto integrado de dispositivos que se completam no cumprimento das suas funções;
 - Digital: utiliza técnicas de processamento digital (discreto) em contraposição ao análogo (contínuo);
 - de Controle: com vistas a manter o comportamento de um dado processo dentro do preestabelecido;
 - Distribuído: descentralizado dos dados, do processamento e das decisões (estações remotas). Além de oferecer uma interface homem-máquina - IHM - de grande resolução, permite o interfaceamento com controladores lógicos programáveis - CLP, equipamentos inteligentes (comunicação digital) e sistemas em rede.

Para a escolha apropriada de sensores eletrônicos, a seguinte terminologia é adotada:

- a) Faixa de medida (RANGE): conjunto de valores da variável medida que estão compreendidos dentro dos limites inferior e superior da capacidade de medida ou de transmissão do instrumento. Expressa-se determinando os valores extremos;
- b) Alcance (SPAN): é a diferença algébrica entre os valores superior e inferior da faixa de medida do instrumento. Por exemplo, um instrumento com faixa de medida de 100°C a 250°C, possui um alcance de 150°C.
- c) Erro: é a diferença entre o valor medido ou transmitido pelo instrumento, em relação ao valor real da variável medida. Se tivermos o processo em regime permanente, estável, chamaremos de "erro estático" que será positivo ou negativo, dependendo da indicação do instrumento que poderá estar indicando a mais ou a menos. Quando tivermos a variável se alterando, teremos um atraso na transferência de energia do meio para o medidor, onde o valor medido estará geralmente atrasado em relação ao valor real da variável. Esta diferença é chamada de "erro dinâmico";
- d) Precisão: define-se como sendo o maior valor de erro estático que um instrumento pode ter ao longo de sua faixa de trabalho. Pode ser expressa de diversas maneiras como: porcentagem do alcance, unidade da variável e porcentagem do valor medido;
- e) Zona morta: é a não alteração na indicação ou no sinal de saída de um instrumento ou em valores absolutos da faixa de medida do mesmo, apesar de ter ocorrido uma sensível variação da variável. Por exemplo, um instrumento com faixa de medida entre 0°C a 200°C possui uma zona morta de $\pm 0,1\%$ do alcance, ou seja $\pm 0,2^\circ\text{C}$. Portanto, para variações inferiores a este valor, o instrumento não apresentará alteração da medida;

- f) Sensibilidade (linearity): é a razão entre a variação do valor medido ou transmitido para um instrumento e a variação da variável que o acionou, após ter alcançado o estado de repouso. Pode ser expressa em unidades de medida de saída e de entrada. Por exemplo, um termômetro de vidro com faixa de medida de 0°C a 500°C possui uma escala de leitura de 50cm, portanto, a sua sensibilidade é de 0,1cm/°C;
- g) Histerese: é a diferença máxima apresentada por um instrumento, para um mesmo valor, em qualquer ponto da faixa de trabalho, quando a variável percorre toda a escala nos sentidos ascendente e descendente;
- h) Repetibilidade: é a máxima diferença entre diversas medidas de um mesmo valor da variável, adotando sempre o mesmo sentido de variação. Expressa-se em porcentagem do alcance;
- i) Resolução: é a menor variação que se pode detectar. A resolução está relacionada com o número de "bit" do instrumento: quanto maior o número de "bit" melhor a resolução. O cálculo da resolução de um instrumento é dado pelo quociente da faixa de medida por $2^{\text{número de "bit" do mesmo}}$. Por exemplo, para um transdutor linear de 100mm e 12 bit, tem-se uma resolução de 0,024mm.

SENSOR DE CARGA

As células de carga são sensores projetados para medir cargas estáticas e dinâmicas de tração e compressão, princípio extensométrico e cargas de 0 a 300t. As células são totalmente estanques (proteção IP67) e podem ser utilizadas em atmosferas agressivas. Externamente o transdutor é usinado a partir de um único bloco de aço inoxidável sem qualquer parte soldada. As células de carga são, ainda, resistentes à vibração e impacto. O seu tamanho compacto permite sua aplicação em pequenos espaços e em locais de difícil acesso.

Um tipo de célula de carga é a Doc 438, modelo TU-K5C, para cargas de tração e compressão da Gefran Brasil, com flange para a aplicação de cargas suspensas, FLA703, e articulação esférica, SND022. A FIG. 2 apresenta as dimensões mecânicas da célula de carga Doc 438 e sua montagem com junta esférica dupla e flange para cargas suspensas. Algumas especificações técnicas desta célula:

- Precisão: 0,2%;
- Faixa de medição: 0 a 500Kg;
- Sensibilidade: 2mV/V;
- Erro combinado - não linearidade/histerese/repetibilidade: $\pm 0,2\%$ do fundo de escala;
- Tensão nominal de alimentação: 10V;
- Tensão máxima de alimentação: 15V;
- Faixa de temperatura permissível: -20°C a 60°C;
- Carga estática máxima: 130% a capacidade máxima;
- Carga dinâmica máxima: 100% a capacidade máxima;
- Carga máxima aplicável: 150% a capacidade máxima;
- Carga de ruptura: 300% a capacidade máxima;
- Grau de proteção (DIN 40050): IP67;
- Ligações elétricas: cabo blindado 4x0,25 / 3m;

- Material do elemento elástico: aço inoxidável.



Figura 2 - Célula de Carga
 FONTE: Gefran Brasil, 1997.

Embora a resolução da célula de carga seja infinita, pois depende da IHM (GEFRAN, 1997), o conjunto célula de carga – IHM (FIG. 1) permitirá uma resolução de 0,015Kg.

SENSOR DE DESLOCAMENTO

Transdutores lineares de deslocamento são sensores projetados para medir deslocamentos, pelo princípio da fita plástica condutiva (filme espesso), para cursos de 10mm a 2.000mm. A máxima velocidade de deslocamento é de 10m/s, com vida útil de 25×10^6 metros de deslocamento percorrido, ou 100×10^6 operações, válido para aquele que ocorrer primeiro.

Um tipo de transdutor linear de deslocamento é o Doc 074, modelo PZ 34F da Gefran Brasil, com fixação através de flange. A FIG. 3 apresenta a fotografia deste transdutor linear de deslocamento. Algumas de suas especificações técnicas:

- Curso elétrico útil (mm): 25 a 250;
- Linearidade independente: $\pm 0,2\%$ / 25mm
 $\pm 0,1\%$ / 50mm a 100mm
 $\pm 0,05\%$ / 125mm a 250mm
- Faixa de temperatura permissível: -30°C a 100°C;
- Velocidade máxima de deslocamento: 10m/s;
- Força de acionamento: <0,5N;
- Grau de proteção (DIN 40050): IP60;
- Ligações elétricas: cabo blindado 3x0,25 / 1m;
- Dimensão do corpo: 83,5 a 308,5 mm.



Figura 3 - Transdutor linear de deslocamento
 FONTE: Gefran Brasil, 1997.

Embora a resolução do transdutor linear seja infinita, pois depende da IHM, o conjunto transdutor linear – IHM (FIG. 1) permite uma resolução de 0,0038mm.

SISTEMAS DE CONTROLE

Geralmente, existem várias condições internas e externas que afetam o desempenho de um processo. Estas condições são denominadas de variáveis de processo, tais como: temperatura, pressão, nível, vazão, volume, etc. Um processo pode ser controlado através de um sistema de controle medindo-se variáveis, parâmetros que representam o estado deste processo, ajustando-as automaticamente de maneira a se conseguir um valor que representa o estado desejado para este processo. As condições de ambiente devem sempre ser incluídas na relação de variáveis do processo.

DEFINIÇÕES

- A) Variável controlada: é a grandeza ou condição que é medida ou controlada. Normalmente é a saída do sistema;
- B) Variável manipulada: é a grandeza ou condição que é variada pelo controlador de modo a afetar o valor da variável controlada;
- C) Controle: medição do valor da variável controlada do sistema e aplicação da variável manipulada ao sistema para corrigir ou limitar o desvio do valor medido de um valor desejado;
- D) Plantas: é uma parte do equipamento ou um conjunto de itens de uma máquina que funcionam juntos, cuja finalidade é desempenhar uma dada operação (qualquer objeto físico a ser controlado);
- E) Processo: qualquer operação a ser controlada;
- F) Sistema: é uma combinação de componentes que atuam conjuntamente e realizam um certo objetivo;
- G) Perturbação ou distúrbio: é um sinal que tende a afetar adversamente o valor da saída do sistema. Uma perturbação é considerada externa quando é gerada fora do sistema e constitui uma entrada;
- H) Sistema de controle de processos: é um sistema regulador automático no qual a saída é uma variável controlada;
- I) Sistema regulador automático: é um sistema de controle em que a entrada de referência ou a saída desejada, ou é constante ou varia lentamente com o tempo. Além disso, a tarefa principal consiste em manter a saída real no valor desejado na presença de perturbações;
- J) Servossistema ou servomecanismo: é um controle em que a saída é uma posição mecânica, velocidade ou aceleração;
- K) Sistema de controle em malha fechada: muitas vezes também chamado de sistema de controle realimentado, está intimamente relacionado com o erro do sistema. O sinal de erro atuante, que é a diferença entre o sinal de entrada e o sinal realimentado (que pode ser o próprio sinal de saída ou uma função do sinal de saída e suas derivadas), é introduzido no controlador de modo a reduzir o erro, trazendo a saída do sistema a um valor desejado;
- L) Sistema de controle em malha aberta: é o sistema em que a saída não tem nenhum efeito sobre a ação de controle, ou seja, a saída não é medida nem realimentada para comparação com a entrada;
- M) Sistema de controle adaptativo: é o sistema que possui a capacidade de detectar variações nos parâmetros da planta, fazendo os ajustes necessários nos parâmetros do controlador a fim de manter um desempenho ótimo. Adaptação significa auto-ajustar, uma vez que em muitos sistemas, as características dinâmicas não são constantes

- devido a várias razões (deterioração de componentes ao longo do tempo ou variações nos parâmetros e no ambiente). Portanto, são sistemas que levam em conta as suas características dinâmicas, desde modo, aumentando a sua confiabilidade;
- N) Sistema de controle de aprendizado: são sistemas de controle que possuem uma habilidade para aprender;

PRINCÍPIOS BÁSICOS DE PROJETO DE SISTEMAS DE CONTROLE

Qualquer sistema de controle deve ser estável. Esta é uma exigência primordial. Além da estabilidade absoluta, um sistema de controle deve Ter uma estabilidade relativamente razoável; assim, a resposta deve apresentar amortecimento razoável. Além disso, a velocidade de resposta deve ser razoavelmente rápida e o sistema de controle deve ser capaz de reduzir erros a zero ou a algum valor pequeno tolerável.

A exigência da estabilidade relativa razoável está relacionada a exigência de precisão no estado estacionário, razão de incompatibilidade entre esses dois fatores. Portanto, no projeto de sistemas de controle, é necessário fazer o compromisso mais efetivo entre estas duas exigências.

Existem duas teorias de controle: clássica e moderna. A primeira teoria utiliza o conceito de função de transferência. A análise e projeto são feitos no domínio "s" e/ou no domínio de frequência, entretanto, não pode manipular sistemas de controle com entradas e saídas múltiplas. A Segunda, baseia-se no conceito de espaço de estados, utilizando-se a análise vetorial-matricial. A análise e o projeto são feitos no domínio do tempo

Os componentes envolvidos nos sistemas de controle são amplamente diferentes. Eles podem ser eletromecânicos, hidráulicos, pneumáticos, eletrônicos, etc. Em engenharia de controle, em vez de tratar os dispositivos de "hardware", substitui-se os tais dispositivos ou componentes pelos seus modelos matemáticos.

Obter um modelo matemático razoavelmente preciso de um componente físico é um dos problemas mais importantes em engenharia de controle. Um modelo matemático não deve ser nem muito complicado nem muito simplificado. Um modelo matemático deve representar os aspectos essenciais de um componente físico. As previsões do comportamento do sistema baseadas no modelo matemático devem ser razoavelmente precisas. Embora as relações entre entrada-saída de muitos componentes sejam não-lineares, normalmente lineariza-se tais relações em torno de pontos de operação, limitando a faixa de variáveis para ser pequena - facilitando o tratamento analítico e computacional.

A análise de um sistema de controle corresponde a investigação, sob condições específicas, do desempenho do sistema cujo modelo matemático é conhecido. Visto que qualquer sistema é constituído de componente, a análise deve começar por uma descrição matemática de cada componente. Uma vez que o modelo matemático do sistema completo tenha sido deduzido, a maneira pela qual a análise é executada independe do fato do sistema físico ser pneumático, elétrico, mecânico, etc. Por análise da resposta transitória geralmente determina-se as respostas de uma planta para comandar entradas e entradas de perturbações. Por análise no estado estacionário determina-se a resposta depois da resposta transitória ter desaparecido.

Projetar um sistema significa achar um sistema que realize uma dada tarefa. Se as características da resposta dinâmica e/ou as características no estado estacionário não forem satisfatórias, deve-se adicionar um compensador ao sistema. Em geral, um projeto de um compensador adequado não é direto, mas exigirá métodos experimentais.

Nos últimos anos, os computadores digitais têm representado um papel importante na análise, no projeto e na operação de sistemas de controle. O computador pode ser usado para executar computações necessárias, para simular uma planta ou componentes de sistema, ou para controlar um sistema. O controle por computador tem se tornado cada vez mais comum, e muitos sistemas de controle industriais, sistemas de aviação e sistemas de controle de robôs utilizam controladores digitais.

O método básico para o projeto de qualquer sistema de controle prático necessariamente envolverá procedimentos experimentais. A síntese de sistemas de controle linear é teoricamente possível, e o engenheiro de controle pode determinar sistematicamente os componentes necessários para desempenhar o objetivo dado. Na prática, no entanto, o sistema pode ser submetido a muitas restrições ou pode ser não-linear, e em tais casos nenhum dos métodos de síntese está disponível atualmente. Além disso, as características dos componentes podem não ser precisamente conhecidas. Assim, procedimentos experimentais são sempre necessários.

O engenheiro de controle deve satisfazer as especificações dadas na realização de uma tarefa. Estas especificações podem incluir fatores tais como a velocidade de resposta, amortecimento razoável, precisão do estado estacionário, confiabilidade e custos. Todos os requisitos devem ser interpretados em termos matemáticos, não se esquecendo de certificar de que o sistema de malha fechada é estável e tem características aceitáveis na resposta transitória (velocidade e amortecimento razoável) e precisão aceitável no estado estacionário.

A especificação do sinal de controle sobre o intervalo de tempo de operação é chamado lei de controle. Matematicamente, o problema básico de controle é determinar a lei do controle ótimo, sujeita a várias restrições de engenharia e de economia, o que minimiza (ou maximiza, conforme possa ser o caso) um dado índice de desempenho. Este índice de desempenho pode ser uma integral de uma função variável de erro que deve ser minimizada.

ETAPAS DO PROJETO DE UM SISTEMA DE CONTROLE

Dada uma planta, deve-se primeiro escolher sensores e atuadores apropriados. Deve-se obter modelos matemáticos da planta, dos atuadores e dos sensores. Então, usando o modelo matemático obtido, projeta-se um controlador tal que o sistema em malha fechada satisfaça as especificações dadas. O controlador projetado é a solução para a versão matemática do problema de projeto. Neste estágio, a teoria de controle ótimo é muito útil porque fornece o limite superior de desempenho do sistema para um dado índice de desempenho.

Depois do projeto matemático ter sido concluído, o engenheiro de controle simula o modelo em um computador para testar o comportamento do sistema resultante em resposta a vários sinais e perturbações. Usualmente, a configuração inicial do sistema não é satisfatória. Então o sistema deve ser reprojetoado e a análise correspondente concluída.

Este processo de projeto e análise é repetido até que um sistema satisfatório seja obtido. Então, pode-se concluir o sistema físico do protótipo.

Este processo de construção de um protótipo é o inverso daquele de modelamento. O protótipo é um sistema físico que representa o modelo matemático com razoável precisão. Uma vez que o protótipo tenha sido construído, o engenheiro o testa para ver se ele é ou não satisfatório. Se for, o projeto está concluído. Se não, o protótipo deve ser modificado e testado novamente. Este processo continua até que o protótipo seja completamente satisfatório.

No caso de alguns sistemas de controle de processo, formas padronizadas de controladores, tais como controladores PD (proporcional-mais-derivativo), PI (proporcional-mais-integral) e PID (proporcional-mais-integral-mais-derivativo) podem ser usados. Os parâmetros do controlador são determinados experimentalmente seguindo um procedimento padrão estabelecido. Neste caso, não são necessários modelos matemáticos. No entanto, este é um caso tanto especial..

AÇÕES DE CONTROLE BÁSICAS

Os controladores analógicos industriais podem ser classificados, de acordo com a ação de controle, como:

- Controladores de duas posições ou liga-desliga (on-off);
- Controladores proporcionais;
- Controladores do tipo integral;
- Controladores do tipo proporcional-mais-integral;
- Controladores do tipo proporcional-mais-derivativo;
- Controladores do tipo proporcional-mais-integral-mais derivativo;

Em um sistema de controle de duas posições, o elemento atuante possui apenas duas posições fixas que são, em muitos casos, simplesmente ligado e desligado (do inglês, on-off). O controle de duas posições é relativamente simples e barato e, por esta razão, extremamente utilizado, tanto em sistemas de controle industriais, como domésticos. São geralmente dispositivos elétricos, e uma válvula operada por solenóide elétrico é extensivamente usada nestes controladores. O tamanho do intervalo diferencial deve ser determinado a partir de considerações relativas à precisão exigida e à vida do componente.

Para um controlador com ação de controle proporcional, a relação entre a saída do controlador, $u(t)$, e o sinal de erro atuante, $e(t)$, é igual a uma constante, K_p , denominada sensibilidade proporcional ou ganho. Independentemente do mecanismo real, ou da forma da potência de operação, o controlador proporcional é essencialmente um amplificador com um ganho ajustável.

Em um controlador com ação de controle integral, o valor da saída do controlador, $u(t)$ é variado em uma taxa proporcional ao sinal de erro atuante, $e(t)$. A Eq. 1 apresenta esta taxa de variação, onde K_i é a constante ajustável do controlador integral. A ação de controle integral é muitas vezes denominada controle de restabelecimento (reset).

$$\frac{du(t)}{dt} = K_i \cdot e(t)$$

ou

(1)

$$u(t) = K_i \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt$$

A ação de controle de um controlador proporcional-mais-integral é definida pela Eq. 2, onde T_i é chamado tempo integral. Tanto K_p como T_i são ajustáveis. O tempo integral ajusta a ação de controle integral, enquanto uma mudança no valor de K_p afeta tanto a parte proporcional, como a parte integral da ação de controle. O inverso do tempo integral T_i é denominado taxa de restabelecimento (reset), que é o número de vezes, por minuto, que a parte proporcional da ação de controle é duplicada. Esta taxa é medida em termos de repetições por minuto.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt$$
(2)

A ação de controle de um controlador proporcional-mais-derivativo é definida pela Eq. 3, onde T_d é chamado tempo derivativo. Tanto K_p como T_d são ajustáveis. O tempo derivativo é o intervalo de tempo pelo qual a ação de taxa avança o efeito da ação de controle proporcional. A ação de controle derivativa, algumas vezes denominada controle de taxa, é onde a magnitude da saída do controlador é proporcional à taxa de variação do sinal de erro atuante. Sua ação tem o caráter antecipatório, entretanto, a ação de controle derivativo nunca pode antecipar uma ação que ainda não ocorreu. Porém, possui a desvantagem de amplificar os sinais de ruído e causar efeito de saturação no atuador. Logo, nunca se usa este controle sozinho porque somente é efetivo durante os períodos transitórios.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_p \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$
(3)

A ação de controle de um controlador proporcional-mais-integral-mais-derivativa é uma combinação da ação de controle proporcional, ação de controle integral e ação de controle derivativa, definida pela Eq. 4. Esta ação combinada possui as vantagens de cada uma das três ações de controle individuais.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \frac{K_p}{T_i} \cdot \int_0^t e(t) \cdot dt + K_p \cdot T_d \cdot \frac{de(t)}{dt}$$
(4)

EFEITOS DAS AÇÕES DE CONTROLE INTEGRAL E DERIVATIVA SOBRE O DESEMPENHO DO SISTEMA

No controle proporcional de um processo cuja função de transferência não possui um integrador, $1/s$, há um erro em regime estacionário, ou desajuste, na resposta à entrada ao degrau. Este desajuste pode ser eliminado se for incluída no controlador uma ação de controle integral.

No controle integral de um processo, o sinal de saída do controlador, em qualquer instante é igual à área sob a curva sinal de erro atuante até aquele instante. A FIG. 4 mostra os efeitos de um controlador integral e de um controlador proporcional em um sistema. Observa-se que a ação de controle integral, embora remova o desajuste ou erro em regime estacionário, pode resultar em uma resposta oscilatória com amplitude lentamente decrescente ou mesmo com amplitude crescente, ambas usualmente indesejáveis.

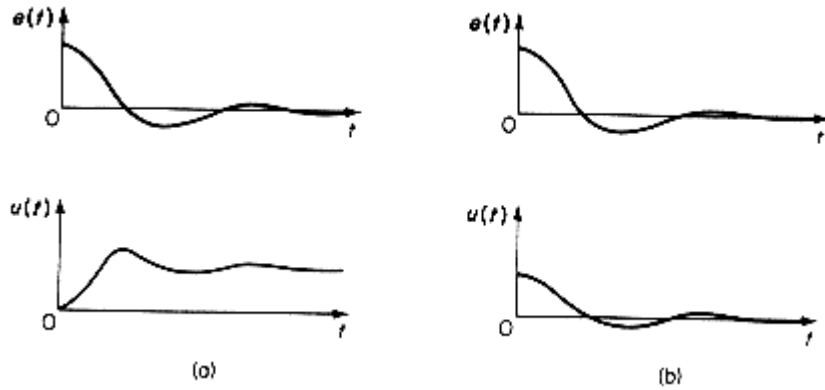


Figura 4 - Curvas de erro, $e(t)$, e sinal de saída, $u(t)$, de controlador
 (A) Controle integral
 (B) Controle proporcional
 FONTE: Ogata, 1993, p.175

O erro em regime estacionário pode ser reduzido pelo aumento do valor do ganho K_p . O aumento deste valor, entretanto, resultará em uma resposta mais oscilatória do sistema. Já que o valor do ganho não pode ser demasiadamente aumentado, é desejável modificar o controle proporcional para um controle proporcional-mais-integral. Curvas de respostas típicas para um pequeno e um grande valor de K_p são mostrados na FIG. 5:

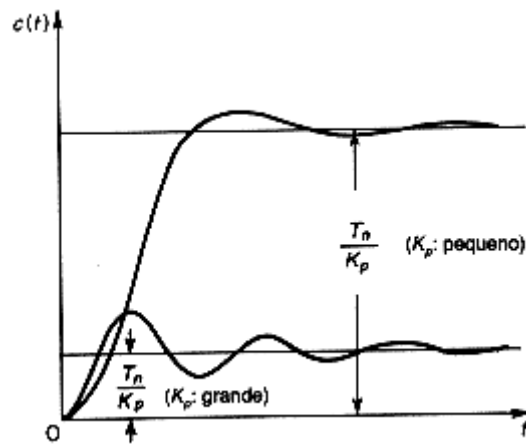


Figura 5 - Curvas de resposta típicas para o distúrbio de torque em degrau
 FONTE: Ogata, 1993, p.176

Se for adicionado ao controlador uma ação de controle integral, então, enquanto houver um sinal de erro, haverá um sinal desenvolvido pelo controlador para reduzir este erro, desde que o sistema de controle seja estável. Logo, a ação de controle proporcional tende a estabilizar o sistema, enquanto a ação de controle integral tende a eliminar ou reduzir o erro em regime estacionário em resposta a várias entradas.

A ação de controle derivativa, quando adicionada a um controlador proporcional, possibilita um meio de obter um controlador com alta sensibilidade. Uma vantagem em usar ação de controle derivativa é que ela responde à taxa de variação do erro atuante e pode produzir uma correção significativa antes de o valor do erro atuante tornar-se demasiadamente grande. O controle derivativo, portanto, antecipa o erro atuante e inicia uma ação corretiva mais cedo, tendendo a aumentar a estabilidade do sistema.

Embora o controle derivativo não afete diretamente o erro em regime estacionário, ele produz amortecimento no sistema e portanto, permite o uso de um valor maior de ganho do sistema, o que resulta em uma melhora na precisão em regime estacionário.

Devido ao fato de o controle derivativo operar sobre a taxa de variação do erro atuante e não sobre o próprio erro atuante, este modo nunca é usado sozinho. É sempre utilizado em combinação com ação proporcional ou ação proporcional-mais-integral.

CONTROLADOR AUTOMÁTICO, ATUADOR E SENSOR

A FIG. 6 é um diagrama de blocos de um sistema de controle industrial, que consiste em um controlador automático, um atuador, uma planta e um sensor (elemento de medição). O controlador detecta o sinal de erro atuante, que usualmente está em um nível de potência muito baixo, e o amplifica até um nível suficientemente alto. Junto com o amplificador, pode-se alterar o sinal de erro atuante amplificando-o e às vezes diferenciando e/ou integrando-o para produzir um melhor sinal de controle.

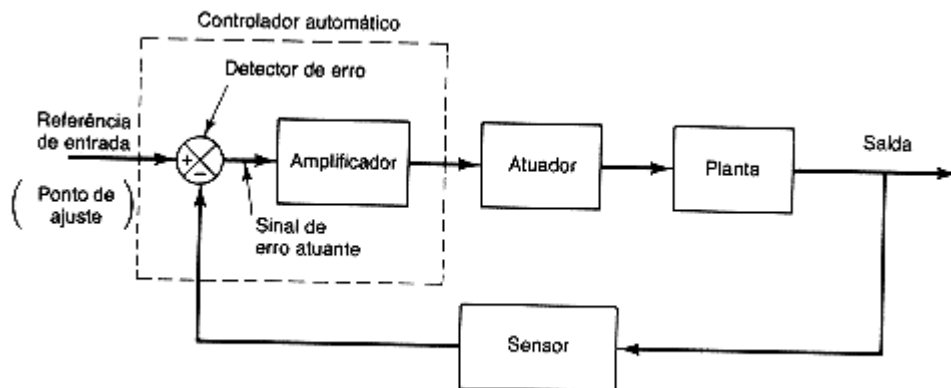


Figura 6 - Diagrama de blocos de um sistema de controle automático
FONTE: Ogata, 1993, p.147

O atuador é um dispositivo de potência que produz a entrada para a planta de acordo com o sinal de controle, de modo que o sinal de realimentação corresponderá ao sinal de entrada de referência. A saída de um controlador automático é introduzida em um atuador, tal como um motor hidráulico ou válvula pneumática ou motor elétrico.

O sensor ou elemento de medição é um que converte a variável de saída em uma outra variável adequada, tal como um deslocamento, uma pressão ou uma tensão (voltagem), que pode ser usada para comparar a saída ao sistema de entrada de referência. Este elemento está no caminho de realimentação do sistema de malha-fechada. O ponto de ajuste do controlador deve ser convertido a uma entrada de referência com as mesmas unidades que o sinal de realimentação proveniente do sensor ou elemento de medição.

CONTROLADORES PNEUMÁTICOS

Os sistemas pneumáticos são extensivamente utilizados na automação industrial, convertendo a energia de fluídos (geralmente ar comprimido) em energia mecânica. Portanto, envolvem o fluxo de ar através de tubulações e recipientes com pressão em conexão. Para se desenvolver o modelo matemático de um sistema pneumático, deve-se fazer as seguintes considerações:

- O fluxo de gás através de uma restrição é uma função da diferença de pressão, $p_1 - p_0$, do gás;
- A resistência do fluxo, R , é definida como a razão entre a variação da diferença de pressão de gás, pela variação na taxa de fluxo de gás. O cálculo desta resistência pode ser bastante demorado. Experimentalmente, entretanto, pode ser facilmente determinado através de um gráfico relacionando a diferença de pressão com o fluxo, e calculando-se a inclinação desta curva em uma dada condição de operação;
- A capacitância do recipiente sob pressão é dada como a razão entre a variação no gás armazenado, pela variação na pressão do gás. Portanto, depende do tipo de processo de expansão envolvido, podendo ser calculada pelo uso da lei dos gases ideais. Logo, a capacitância do recipiente é constante se a temperatura permanecer constante

O modelo matemático que descreve um sistema pneumático é dado pela Eq. 5, onde p_i é a entrada do sistema, e p_0 é a saída do sistema. Os passos seguintes para o projeto de um controlador pneumático, foram discutidos no item "Sistemas de Controle", sendo que as ações de controle irá depender do tipo de controlador (válvula pneumática) a ser utilizado.

$$p_i = p_0 + R \cdot C \cdot \frac{dp_0}{dt} \quad (5)$$

TIPOS DE ATUADOR

INDUTOR ELETROMAGNÉTICO

O movimento das cargas elétricas, e em particular a corrente elétrica, é responsável por um fenômeno de atração ou repulsão designado por força magnética. Dois condutores percorridos por uma corrente elétrica atraem-se um ao outro se os sentidos dos respectivos fluxos forem concordantes, e repelem-se no caso contrário. A força magnética, encontram-se associados o campo magnético, o fluxo e a densidade de fluxo magnético, a permeabilidade magnética, a indutância ou coeficiente de auto-indução, e o coeficiente de indução mútua.

Considerem-se os dois fios condutores paralelos e imersos no espaço vazio representados na FIG. 7, e admita-se que o comprimento, l , é muito superior à distância respectiva ($l \gg d$), que a secção é infinitesimal ($r \ll d$) e que ambos são percorridos por correntes elétricas, i_1 e i_2 , lentamente variáveis no tempo.

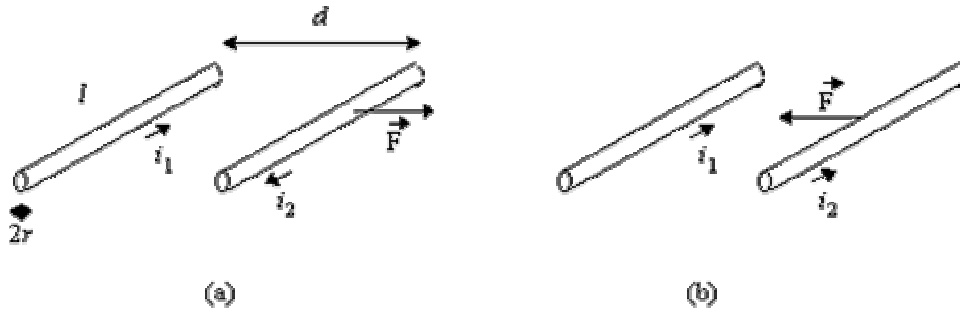


Figura 7 - Força magnética exercida entre dois fluxos de corrente elétrica

Nestas condições, entre os dois fios condutores estabelece-se uma força de índole magnética cuja intensidade é dada pela Equação 6, onde $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} [\text{Wb/A.m}]$ - define a constante universal designada por permeabilidade magnética do vazio.

$$F = \frac{\mu_0 i_1 i_2 l}{2 \pi d} \quad [\text{N}] \quad (6)$$

A força é tanto maior quanto mais longos e próximos se encontrarem os condutores ou, em alternativa, quanto mais elevadas forem as correntes que os percorrem. A direção da força magnética e da corrente elétrica são perpendiculares entre si, sendo de repulsão o sentido da força no caso de fluxos discordantes (FIG. 7a), e de atração no caso inverso (FIG. 7b). Convém lembrar que a ausência de corrente em qualquer dos dois fios condutores determina a ausência da força magnética. Por conseguinte, cargas elétricas em repouso são transparentes do ponto de vista do campo magnético, isto é, não geram nem são afetadas pelo campo magnético.

Se se considerar a ação exercida pela corrente i_1 sobre o condutor-2, por exemplo por unidade de comprimento e normalizada relativamente à corrente i_2 , obtém-se a intensidade do campo magnético, H_1 , criado pelo condutor-1

$$\frac{F}{i_2 l} = \frac{\mu_0 i_1}{2 \pi d} = \mu_0 H_1 \quad (7)$$

$$H_1 = \frac{1}{2 \pi d} i_1 \quad [\text{A/m}]$$

Neste caso, a intensidade da força magnética, F [N], pode ser expressar em função do campo magnético, H_1 [A/m]:

$$F = \mu_0 H_1 i_2 l \quad (8)$$

A análise de um circuito com bobinas exige a obtenção e a resolução de uma ou várias equações diferenciais. As condições iniciais da corrente, do fluxo magnético e da energia armazenada, em conjunto com a imposição da sua continuidade, constituem a informação necessária para determinar os valores das constantes da solução da equação diferencial. A FIG. 8 ilustra os diversos caminhos fechados de corrente vulgarmente utilizados na realização de bobinas: a espira (a), a bobina com N espiras e núcleo cilíndrico (b) e a bobina com N espiras e núcleo toroidal (c).

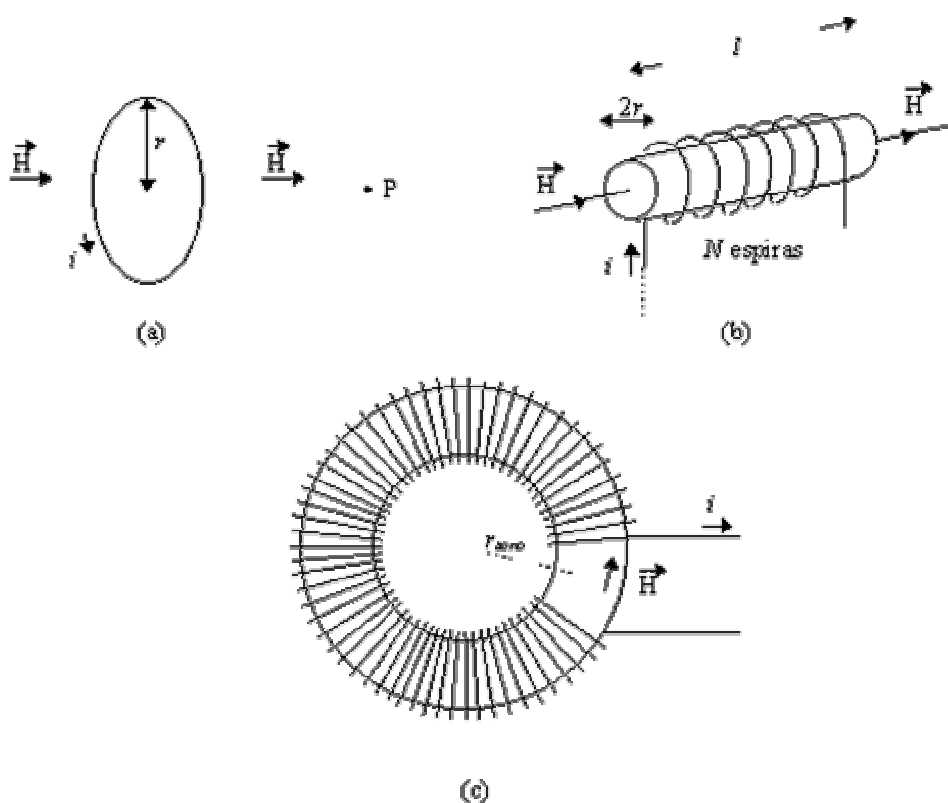


Figura 8 - Caminhos fechados de corrente utilizados na realização de bobinas

- (a) Espira
- (b) Bobinas com núcleo cilíndrico
- (c) Toroidal

CILINDRO HIDRÁULICO

O cilindro hidráulico é componente do sistema hidráulico que recebe o fluido, sob pressão, de uma linha de alimentação. No cilindro, o fluido atua sobre um pistão para realizar trabalho numa direção retilínea. O trabalho realizado é o produto da pressão do fluido pela área do orifício do cilindro, como ilustrado pela FIG. 9. A velocidade ou razão de realização de trabalho depende da quantidade de fluido distribuída para o cilindro.

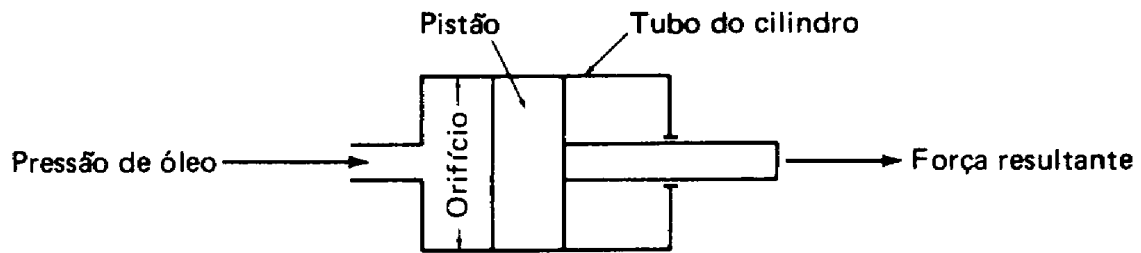


Figura 9 - Diagrama esquemático de um cilindro hidráulico
 FONTE: Stewart, 1981a, p.289

As funções de um fluido hidráulico são a de transmitir uma força aplicada em um ponto do sistema de fluido para outro ponto do sistema e reproduzir rapidamente qualquer variação na força aplicada. Assim, o fluido deve fluir prontamente, e deve ser relativamente incompressível. A escolha do fluido hidráulico mais satisfatória a uma aplicação industrial envolve duas condições distintas: o fluido para cada sistema deve possuir certas características e propriedades físicas essenciais de fluxo e funcionamento; e o fluido deve apresentar convenientes características de operação durante um período de tempo (evitar a variação do efeito desejado em projeto).

O fluido hidráulico deve proporcionar uma vedação ou película adequada entre as peças móveis, para reduzir o atrito. É aconselhável que o fluido não produza variações físicas ou químicas adversas enquanto estiver no sistema hidráulico. O fluido não deve provocar oxidação ou corrosão no sistema, e deve atuar como um lubrificante adequado para criar uma película resistente o bastante para separar as peças móveis e minimizar o desgaste entre elas.

Os cilindros hidráulicos podem ser de simples ou dupla ação. No primeiro tipo, o fluido exerce pressão em apenas um lado do cilindro, sendo o seu retorno por ação de uma mola, ou pelo peso próprio da haste, após o alívio da pressão fluídica. A aplicação do cilindro hidráulico de simples ação é recomendada somente quando é possível aceitar pequena passagem de óleo entre câmaras, pois não existe cilindro hidráulico com vazamento "zero". No segundo tipo, o fluido exerce pressão em ambos os lados do cilindro, de forma que o trabalho possa ser realizado em ambos os sentidos.

A forma e as dimensões da haste do cilindro varia de acordo com a aplicação desejada. Segundo a PARKER, os tipos de haste de cilindro mais comuns são: haste simples e haste passante. O primeiro tipo possui uma área de aplicação de pressão fluídica diferente em cada lado do cilindro, portanto, o trabalho realizado em um sentido é superior ao trabalho realizado no sentido oposto. O segundo tipo possui a mesma área de aplicação de pressão, e o trabalho realizado é o mesmo em ambos os sentidos. A grande vantagem da utilização da haste passante em cilindros é a possibilidade de montagem de outros sistemas ou componentes de máquina.

Para a especificação de um cilindro hidráulico, são necessários os seguintes dados:

- Designação da série;
- Diâmetro do cilindro;
- Conexões;
- Diâmetro da haste;

- Rosca na extremidade da haste;
- Amortecimento;
- Opções (características opcionais ou especiais);
- Tipo de montagem;
- Curso;
- Acessórios;

Todos esse dados são obtidos nos catálogos de fabricante de cilindros hidráulicos. Especial atenção deve ser tomada com relação a especificação da capacidade do cilindro, velocidade do pistão e dimensão da haste. Apesar dos fabricantes seguirem a norma ISO 6431 que garante a intercambiabilidade do conjunto montado, o projeto e fabricação dos cilindros é de responsabilidade do fabricante. Logo, as características técnicas e os fatores de segurança (ou serviço ou de trabalho) a ser utilizado são diferentes entre os fabricantes, não se devendo especificar um cilindro com gráficos e fórmulas fornecidos por outro fabricante.

O desempenho de um sistema, consistindo de vários componentes, é muito importante, razão pela qual os sistemas de controle automáticos têm se tornado muito comuns (STEWART, 1981b). O controle automático pode envolver a regulagem de uma dada função ou variável, como temperatura, velocidade, pressão, força, deslocamento ou aceleração, de acordo com uma operação desejada que possa ser realizada sem ação ou atenção humana direta. Os sistema de controle são usados para regular ou orientar um fluxo de energia.

O dispositivo de leitura diferencial (detecção de diferença ou erro) é uma peça importante de um sistema de controle. O dispositivo funciona da mesma maneira que o operador atua em um sistema de controle manual. Os detetores de erros podem ser usados para determinar quantidades diferentes de deslocamento lineares e angulares mecânicos.

A FIG. 10a ilustra um servossistema hidráulico, mostrando o controle automático e o diagrama de blocos de operações funcionais. O fluído hidráulico de uma bomba pode ser usado para mover um motor de fluído rotativo. O motor de fluído, por sua vez, move uma carga de saída. A bobina da válvula de controle pode ser virada para parar o fluxo de fluído; então a rotação da carga de saída é zero. A bobina da válvula pode ser virada para várias posições para girar o eixo de saída em vários sentidos em diferentes valores da rotação de saída, N_0 . Um dispositivo de leitura de erro é colocado na carga de saída. A rotação de carga, N_0 , é comparada com a rotação de comando ou de entrada, N_1 , por um dispositivo diferencial ou de leitura de erro (um sistema de alavancas ou de engrenagens diferenciais). O dispositivo diferencial desenvolve um sinal de erro que retorna à válvula de controle. Se o sinal de erro envolver a rotação de um eixo, a rotação do eixo poderá ser ligada à haste de impulsão da válvula por um arranjo, como o de cremalheira pinhão. O sinal de erro pode acionar a válvula e mudar o fluxo de fluído para o motor rotativo, assim mudando a rotação da carga de saída impulsionada. O objetivo principal é projetar um sistema de controle para reduzir o erro. A FIG. 10b mostra o diagrama de blocos de operações ou atividades funcionais.

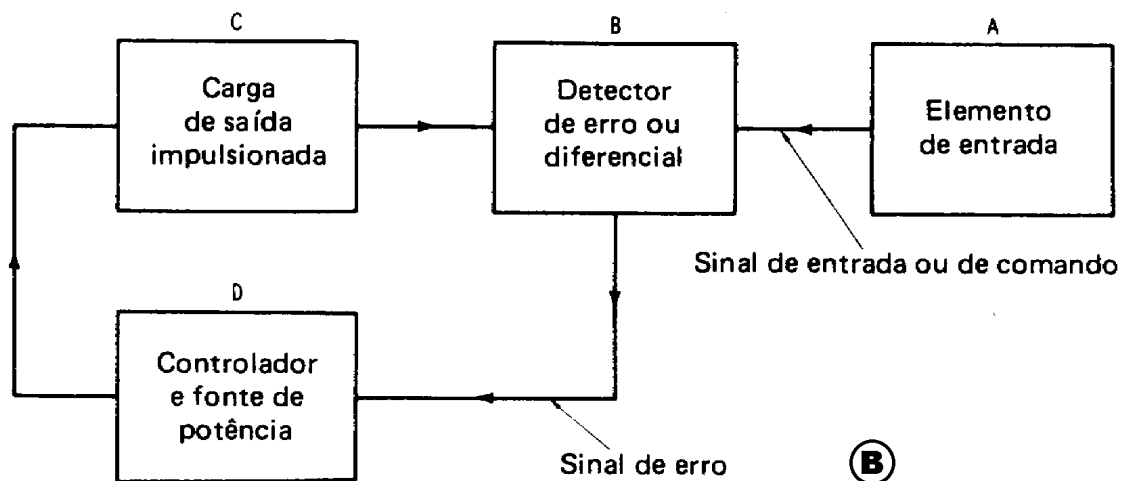
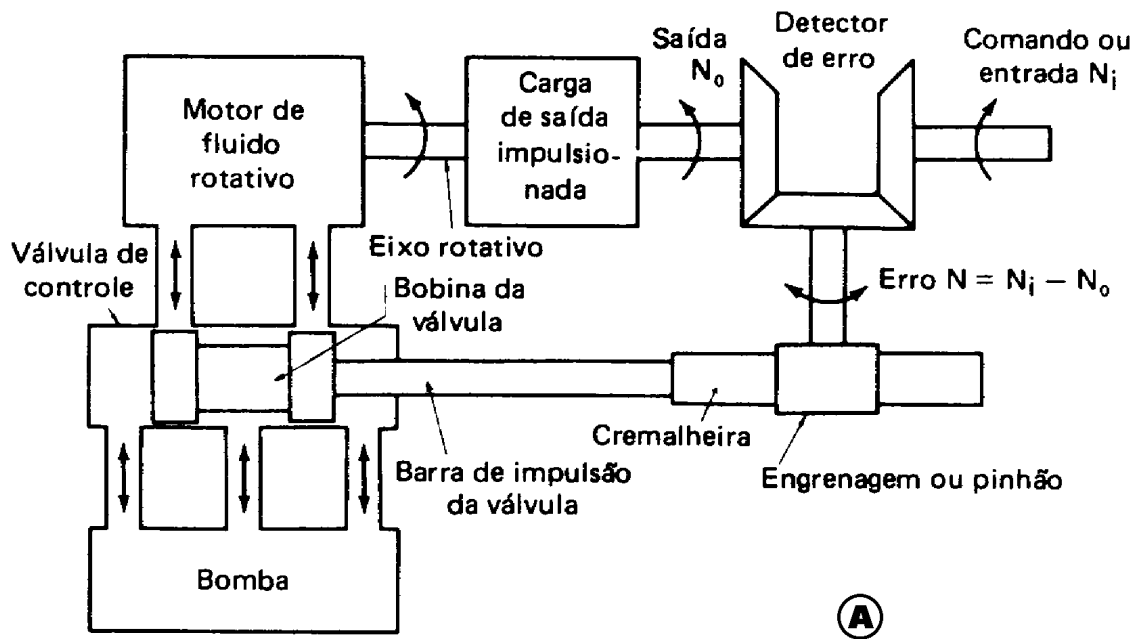


Figura 10 - Diagrama para um servossistema hidráulico

(A) - Controle automático

(B) - Diagrama de blocos de operações funcionais

FONTE: Stewart, 1981b, p.426

Na seleção, projeto e desenvolvimento dos servossistemas, características como estabilidade, velocidade de resposta e precisão da resposta devem ser considerados, em adição aos fatores de custos usuais - disponibilidade, confiabilidade e manutenção.

Uma análise completa de um servossistema pode tornar-se muito intrincada e bastante complicada. Várias técnicas analíticas têm sido imaginadas para estudar a estabilidade dos servossistemas. Em geral, uma equação diferencial é mostrada para o sistema, e as características da solução são estudadas para determinar a estabilidade.

Com relação ao diagrama de blocos do servossistema (FIG. 10b), um sinal de erro vindo do detetor de erro, B, retorna para o controlador e fonte de potência, D. A ação de controle, por sua vez, determina a saída, C, da carga movida. Vários tipos de controladores são possíveis, dependendo dos componentes utilizados e do arranjo dos componentes. Se um sinal de erro, N, for levado ao controlador, D, será possível arranjar um controle ou ação de correção diretamente proporcional ao erro. A correção é pequena para um erro pequeno; para um grande erro, a correção é maior.

Também é possível arranjar um controle ou ação de correção diretamente proporcional à razão temporal do erro. Se o erro variar rapidamente, a correção será grande, se o erro variar lentamente, a correção será menor. Este tipo de correção envolve um reconhecimento de um possível erro futuro. Uma ação de controle diretamente proporcional à soma de tempo ou integral do tempo de erro é possível; neste caso, o produto do erro multiplicado pela variação do tempo é totalizado para um intervalo de tempo. Este tipo de correção envolve um reconhecimento do histórico do erro anterior.

Várias combinações de controle podem ser arranjadas, como a combinação de erro, a taxa de erro, e integral do erro. O atrito também pode ser incluído. Em cada caso, deve ser feito um estudo das características resultantes, e deve-se chegar a uma decisão quanto à combinação mais adequada para os requisitos de função desejada.

CILINDRO PNEUMÁTICO

O cilindro pneumático possui as mesmas características e funções descritas no item sobre o cilindro hidráulico. A principal diferença é o fluido usado para realizar trabalho: no cilindro pneumático é o ar. Portanto, o princípio de funcionamento é o mesmo. Entretanto, principalmente a capacidade de carga e a velocidade do êmbolo - dentre outros parâmetros - são diferentes.

No caso de um sistema pneumático, a pressão do ar é exercida por um compressor. O sistema de compressor pode incluir um pós-esfriador, uma válvula de segurança, um separador de água e um receptor. O ar comprimido que sai do sistema compressor é distribuído então através da tubulação para os cilindros pneumáticos.

Em um sistema pneumático, o ar deve passar por um filtro de ar, um regulador de pressão e um lubrificador em linha, antes de ser distribuído para o dispositivo ou máquina que realiza trabalho. Às vezes é recomendado que não mais de dois cilindros sejam servidas por um único filtro, regulador ou lubrificador.

CILINDRO ELÉTRICO

O cilindro elétrico consiste de um cilindro cujo trabalho é fornecido por um motor elétrico. O motor elétrico pode ser um motor de passo ou um servo motor, garantindo ao sistema precisão de posicionamento, deslocamento suave e livre de ressonância em operação. A aceleração e desaceleração realizada de maneira suave elimina os problemas de vibração, impacto e erro do sistema. O controle do sistema é realizado através de um driver de interface homem-máquina (IHM) de grande flexibilidade, capaz de programar ações passo-a-passo. A FIG. 11 mostra um cilindro elétrico em corte, onde pode-se ver todos os componentes do sistema.

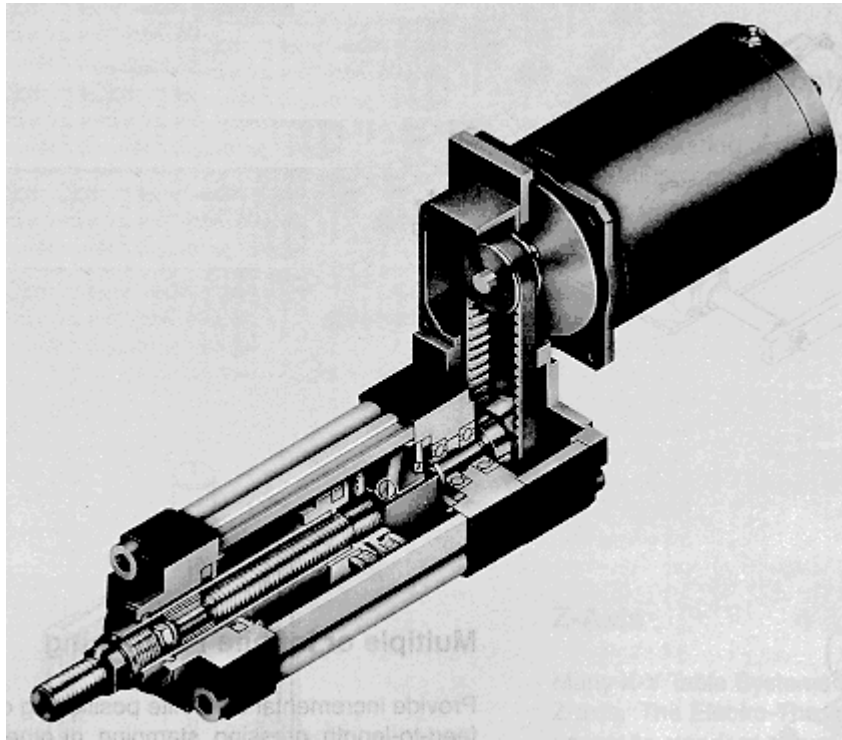


Figura 11 - Cilindro elétrico
FONTE: Parker, 1998

As principais características do cilindro elétrico são:

- Precisão em deslocamentos;
- Deslocamento suaves;
- Funcionamento sem golpes, vibração ou deslizamentos indesejáveis;
- Baixa manutenção;
- Baixo nível de ruído;
- Suporta carregamentos radial e longitudinal (em relação a haste);
- Alta eficiência (baixo atrito do sistema);
- Deslocamentos de 50mm a 1500mm, velocidade máxima de 1588mm/s e força máxima (de avanço) de 23.500N, faixa de temperatura de operação entre 0-60°C, repetibilidade do sistema de $\pm 0,013$ mm;

SISTEMAS PNEUMÁTICOS x SISTEMAS HIDRÁULICOS

As principais diferenças entre estes sistemas esta relacionado com as propriedades dos fluídos envolvidos. O fluído geralmente achado em sistema pneumáticos é o ar; em sistemas hidráulicos é o óleo. Essas diferenças podem ser relacionadas da seguinte forma:

A) O ar e os gases são compressíveis, enquanto o óleo é incompressível;

- B) O ar não tem propriedades lubrificantes e sempre contém vapor d'água. O óleo funciona como um fluido hidráulico bem como um lubrificador, além de levar o calor gerado no sistema para um trocador de calor conveniente;
- C) A pressão de operação normal de sistemas pneumáticos é muitíssimo mais baixa do que a dos sistemas hidráulicos;
- D) As potências de saída dos sistemas pneumáticos são consideravelmente menores do que as dos sistemas hidráulicos;
- E) A precisão dos atuadores pneumáticos é deficiente nas baixas velocidades, enquanto que a precisão dos atuadores hidráulicos pode ser feita satisfatoriamente em todas as velocidades;
- F) Em sistemas pneumáticos a fuga externa é permissível até um certo ponto, mas a fuga interna deve ser evitada porque a diferença de pressão efetiva é um tanto pequena. Nos sistemas hidráulicos a fuga interna é permissível até um certo ponto, mas a fuga externa deve ser evitada;
- G) Não são requeridas tubulações de retorno em sistemas pneumáticos quando é usado o ar, enquanto que elas são sempre necessárias em sistema hidráulicos. Além disso, os sistemas hidráulicos necessitam de tubulações especiais;
- H) A temperatura de operação normal em sistema hidráulicos é de 5 a 60°C. O sistema pneumático, no entanto, pode ser operado na faixa de 0 a 200°C. Sistemas pneumáticos são insensíveis às variações de temperatura, em contraste com os sistemas hidráulicos, onde o atrito dos fluidos devido à viscosidade depende grandemente da temperatura;
- I) Sistemas pneumáticos são à prova de fogo e explosão, enquanto que os sistemas hidráulicos não o são;
- J) A potência hidráulica não é prontamente disponível, comparada à potência elétrica;
- K) O custo de um sistema hidráulico pode ser mais alto do que um sistema elétrico ou pneumático, comparável que desempenhe uma função similar;
- L) Perigos de fogo e de explosões existem, a menos que sejam usados fluidos resistentes ao fogo;
- M) Devido a ser difícil manter um sistema hidráulico que esteja livre de fugas, o sistema tende a ser desarranjado. Consequentemente, o projeto de controle sofisticados está comprometido devido as suas características não-lineares;
- N) Óleo contaminado pode causar falhas no funcionamento adequado de um sistema hidráulico;