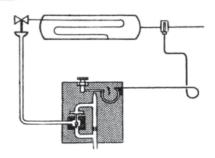
FIRJAN
CIRJ
SESI
SENAI
IEL

CONTROLE AUTOMÁTICO DE PROCESSO Teoria

versão preliminar



SENAI-RJ • Automação



FIRJAN
CIRJ
SESI
SENAI
IEL

CONTROLE AUTOMÁTICO DE PROCESSO Teoria

Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro – FIRJAN **Eduardo Eugenio Gouvêa Vieira** Presidente

Diretoria Operacional Corporativa **Augusto César Franco de Alencar** Diretor

Diretor Regional do SENAI-RJ **Fernando Sampaio Alves Guimarães** Diretor

Diretoria de Educação **Andréa Marinho de Souza Franco** Diretora

FIRJAN
CIRJ
SESI
SENAI
IEL

CONTROLE AUTOMÁTICO DE PROCESSO Teoria



Controle automático de processo: teoria 2006

SENAI-RJ – Rio de Janeiro Diretoria de Educação

FICHA TÉCNICA

Gerência de Educação Profissional - SENAI-RJ Luis Roberto Arruda

Gerência de Produto Carlos de Mello Rodrigues Coelho

Produção Editorial Vera Regina Costa Abreu

Elaboração de Conteúdo Alexandre Gonçalves do Nascimento

Luciano Santos de Oliveira

Revisão Técnica/Atualização Ézio Zerbone

Revisão PedagógicaNeise Freitas da SilvaRevisão GramaticalMaria Ângela Calvão

Revisão Editorial Rita Godoy

ColaboraçãoBruno Souza GomesAndré Luis Campos Vieira

Projeto GráficoArtae Design & CriaçãoEditoraçãoConexão Gravatá

Edição revista das apostilas **Introdução à instrumentação: sistemas de transmissão**. Rio de Janeiro: SENAI-DR/RJ - STE, 1990; **Controle automático de processo**. Rio de Janeiro: SENAI-DR/RJ - STE, 1990.

SENAI-RJ

GEP - Gerência de Educação Profissional

Rua Mariz e Barros, 678 - Tijuca 20270-903 - Rio de Janeiro - RJ

Tel.: (21) 2587-1121 Fax: (21) 2254-2884 GEP@rj.senai.br http://www.rj.senai.br

Prezado aluno,

Quando você resolveu fazer um curso em nossa instituição, talvez não soubesse que, desse momento em diante, estaria fazendo parte do maior sistema de educação profissional do país: o SENAI. Há mais de sessenta anos, estamos construindo uma história de educação voltada para o desenvolvimento tecnológico da indústria brasileira e da formação profissional de jovens e adultos.

Devido às mudanças ocorridas no modelo produtivo, o trabalhador não pode continuar com uma visão restrita dos postos de trabalho. Hoje, o mercado exigirá de você, além do domínio do conteúdo técnico de sua profissão, competências que lhe permitam decidir com autonomia, proatividade, capacidade de análise, solução de problemas, avaliação de resultados e propostas de mudanças no processo do trabalho. Você deverá estar preparado para o exercício de papéis flexíveis e polivalentes, assim como para a cooperação e a interação, o trabalho em equipe e o comprometimento com os resultados. Soma-se, ainda, que a produção constante de novos conhecimentos e tecnologias exigirá de você a atualização contínua de seus conhecimentos profissionais, evidenciando a necessidade de uma formação consistente que lhe proporcione maior adaptabilidade e instrumentos essenciais à auto-aprendizagem.

Essa nova dinâmica do mercado de trabalho vem requerendo que os sistemas de educação se organizem de forma flexível e ágil, motivos esses que levaram o SENAI a criar uma estrutura educacional, com o propósito de atender às novas necessidades da indústria, estabelecendo uma formação flexível e modularizada.

Essa formação flexível tornará possível a você, aluno do sistema, voltar e dar continuidade à sua educação, criando seu próprio percurso. Além de toda a infra-estrutura necessária ao seu desenvolvimento, você poderá contar com o apoio técnico-pedagógico da equipe de educação dessa escola do SENAI para orientá-lo em seu trajeto.

Mais do que formar um profissional, estamos buscando formar cidadãos. Seja bem-vindo!

> Andréa Marinho de Souza Franco Diretora de Educação

Sumário

	APRESENTAÇÃO	. 11
	UMA PALAVRA INICIAL	. 13
1	SISTEMAS DE TRANSMISSÃO	. 17
	Histórico sobre sistemas de transmissão	. 19
	Classificação dos transmissores	. 21
	Quanto à aplicação	21
	Quanto ao funcionamento	21
	Sinais padronizados	. 27
	Funcionamento dos transmissores	. 29
	Praticando	33
	CONTROLE AUTOMÁTICO DE PROCESSO	. 35
	Considerações iniciais cobre o controle automático	37
	Processo	39
	Variáveis de um processo	39
	Tipos de controle	. 41
	Controle manual	41
	Controle automático	42
	Tipos de processo	. 43
	Processo contínuo	43
	Processo em batelada	44
	Principais problemas para o controle de processos	44
	Capacitância	45
	Resistência	45
	Tempo morto	46

Processo monocapacitivo47
Processo bicapacitivo
Processo multicapacitivo
Elementos básicos de uma malha de controle 50
Sistema de medição
Controlador
Modos de controle
Controle de duas posições
Controle proporcional
Controle proporcional + integral (PI)
Controle proporcional + derivativo (PD)
Controle proporcional + integral + derivativo (PID)
Sistemas de controle
Controle feed forward (controle antecipativo)
Controle <i>split range</i> (faixa dividida)
Controle em cascata
Controle de razão (ratio control)
Controle override (controle seletivo)
Controle de limites cruzados
Resposta gráfica de um sistema de controle
Ajustes dos controladores automáticos (otimização ou sintonia) 86
Tecnologias afins ao controle de processo 91
CLP92
SDCD e redes de comunicação
Profibus
Praticando103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 105



Apresentação

A dinâmica social dos tempos de globalização exige dos profissionais atualização constante. Mesmo as áreas tecnológicas de ponta ficam obsoletas em ciclos cada vez mais curtos, trazendo desafios renovados a cada dia, e tendo como conseqüência para a educação a necessidade de encontrar novas e rápidas respostas.

Nesse cenário, impõe-se a educação continuada, exigindo que os profissionais busquem atualização constante durante toda a sua vida - e os docentes e alunos do SENAI/RJ incluem-se nessas novas demandas sociais.

É preciso, pois, promover, tanto para os docentes como para os alunos da educação profissional, as condições que propiciem o desenvolvimento de novas formas de ensinar e aprender, favorecendo o trabalho de equipe, a pesquisa, a iniciativa e a criatividade, entre outros aspectos, ampliando suas possibilidades de atuar com autonomia, de forma competente.

Considerando estas questões, o objetivo deste material é propiciar aos técnicos, que já atuam ou pretendem trabalhar na área de instrumentação, conhecimentos e atualização sobre o controle automático de processo, que é ferramenta fundamental à operação adequada dos processos industriais tanto do ponto de vista da produção, envolvendo quantidade e qualidade, quanto do ponto de vista da segurança.

Por isso, tratamos de dois temas teóricos essenciais no estudo do controle automático de processo.

Considerando que todo processo produtivo tem um sistema de monitoração, apresentamos no primeiro capítulo conhecimentos sobre telemetria, que é a técnica de transportarmos medições obtidas no processo para um instrumento receptor, localizado a curta distância.

Já no segundo, abordamos o controle automático de processo de forma conceitual, abrangendo essencialmente os modos e os principais sistemas de controle.

Ressaltamos que, para obter êxito neste estudo, é necessário ter domínio sobre vários conhecimentos, especialmente aqueles relativos à medição de pressão, de nível, de vazão e temperatura, assim como à classificação dos principais tipos de instrumento.

Temos a certeza de que, com a orientação do docente e o apoio deste material, que apresenta os assuntos em linguagem simples e ilustrados com figuras e tabelas, você vai ampliar ainda mais sua formação profissional quanto à instrumentação industrial e seus sistemas de controle.

Mas seu sucesso depende de dedicação e muito estudo.

Siga em frente e bom estudo!



Uma palavra inicial

Meio ambiente...

Saúde e segurança no trabalho...

O que é que nós temos a ver com isso?

Antes de iniciarmos o estudo deste material, há dois pontos que merecem destaque: a relação entre o processo produtivo e o meio ambiente; e a questão da saúde e segurança no trabalho.

As indústrias e os negócios são a base da economia moderna. Produzem os bens e serviços necessários, e dão acesso a emprego e renda; mas, para atender a essas necessidades, precisam usar recursos e matérias-primas. Os impactos no meio ambiente muito freqüentemente decorrem do tipo de indústria existente no local, do que ela produz e, principalmente, de como produz.

É preciso entender que todas as atividades humanas transformam o ambiente. Estamos sempre retirando materiais da natureza, transformando-os e depois jogando o que "sobra" de volta ao ambiente natural. Ao retirar do meio ambiente os materiais necessários para produzir bens, altera-se o equilíbrio dos ecossistemas e arrisca-se ao esgotamento de diversos recursos naturais que não são renováveis ou, quando o são, têm sua renovação prejudicada pela velocidade da extração, superior à capacidade da natureza para se recompor. É necessário fazer planos de curto e longo prazo, para diminuir os impactos que o processo produtivo causa na natureza. Além disso, as indústrias precisam se preocupar com a recomposição da paisagem e ter em mente a saúde dos seus trabalhadores e da população que vive ao seu redor.

Com o crescimento da industrialização e a sua concentração em determinadas áreas, o problema da poluição aumentou e se intensificou. A questão da poluição do ar e da água é bastante complexa, pois as emissões poluentes se espalham de um ponto fixo para uma grande região, dependendo dos ventos, do curso da água e das demais condições ambientais, tornando difícil localizar, com precisão, a origem do problema. No entanto, é importante repetir que,

quando as indústrias depositam no solo os resíduos, quando lançam efluentes sem tratamento em rios, lagoas e demais corpos hídricos, causam danos ao meio ambiente.

O uso indiscriminado dos recursos naturais e a contínua acumulação de lixo mostram a falha básica de nosso sistema produtivo: ele opera em linha reta. Extraem-se as matérias-primas através de processos de produção desperdiçadores e que produzem subprodutos tóxicos. Fabricam-se produtos de utilidade limitada que, finalmente, viram lixo, o qual se acumula nos aterros. Produzir, consumir e dispensar bens desta forma, obviamente, não é sustentável.

Enquanto os resíduos naturais (que não podem, propriamente, ser chamados de "lixo") são absorvidos e reaproveitados pela natureza, a maioria dos resíduos deixados pelas indústrias não tem aproveitamento para qualquer espécie de organismo vivo e, para alguns, pode até ser fatal. O meio ambiente pode absorver resíduos, redistribuí-los e transformá-los. Mas, da mesma forma que a Terra possui uma capacidade limitada de produzir recursos renováveis, sua capacidade de receber resíduos também é restrita, e a de receber resíduos tóxicos praticamente não existe.

Ganha força, atualmente, a idéia de que as empresas devem ter procedimentos éticos que considerem a preservação do ambiente como uma parte de sua missão. Isto quer dizer que se devem adotar práticas voltadas para tal preocupação, introduzindo processos que reduzam o uso de matérias-primas e energia, diminuam os resíduos e impeçam a poluição.

Cada indústria tem suas próprias características. Mas já sabemos que a conservação de recursos é importante. Deve haver crescente preocupação com a qualidade, durabilidade, possibilidade de conserto e vida útil dos produtos.

As empresas precisam não só continuar reduzindo a poluição, como também buscar novas formas de economizar energia, melhorar os efluentes, reduzir a poluição, o lixo, o uso de matérias-primas. Reciclar e conservar energia são atitudes essenciais no mundo contemporâneo.

É difícil ter uma visão única que seja útil para todas as empresas. Cada uma enfrenta desafios diferentes e pode se beneficiar de sua própria visão de futuro. Ao olhar para o futuro, nós (o público, as empresas, as cidades e as nações) podemos decidir quais alternativas são mais desejáveis e trabalhar com elas.

Infelizmente, tanto os indivíduos quanto as instituições só mudarão as suas práticas quando acreditarem que seu novo comportamento lhes trará benefícios – sejam estes financeiros, para sua reputação ou para sua segurança.

A mudança nos hábitos não é uma coisa que possa ser imposta. Deve ser uma escolha de pessoas bem-informadas a favor de bens e serviços sustentáveis. A tarefa é criar condições que melhorem a capacidade de as pessoas escolherem, usarem e disporem de bens e serviços de forma sustentável.

Além dos impactos causados na natureza, diversos são os malefícios à saúde humana provocados pela poluição do ar, dos rios e mares, assim como são inerentes aos processos produtivos alguns riscos à saúde e segurança do trabalhador. Atualmente, acidente do trabalho



é uma questão que preocupa os empregadores, empregados e governantes, e as conseqüências acabam afetando a todos.

De um lado, é necessário que os trabalhadores adotem um comportamento seguro no trabalho, usando os equipamentos de proteção individual e coletiva; de outro, cabe aos empregadores prover a empresa com esses equipamentos, orientar quanto ao seu uso, fiscalizar as condições da cadeia produtiva e a adequação dos equipamentos de proteção.

A redução do número de acidentes só será possível à medida que cada um – trabalhador, patrão e governo – assuma, em todas as situações, atitudes preventivas, capazes de resguardar a segurança de todos.

Deve-se considerar, também, que cada indústria possui um sistema produtivo próprio, e, portanto, é necessário analisá-lo em sua especificidade, para determinar seu impacto sobre o meio ambiente, sobre a saúde e os riscos que o sistema oferece à segurança dos trabalhadores, propondo alternativas que possam levar à melhoria de condições de vida para todos.

Da conscientização, partimos para a ação: cresce, cada vez mais, o número de países, empresas e indivíduos que, já estando conscientizados acerca dessas questões, vêm desenvolvendo ações que contribuem para proteger o meio ambiente e cuidar da nossa saúde. Mas, isso ainda não é suficiente... faz-se preciso ampliar tais ações, e a educação é um valioso recurso que pode e deve ser usado em tal direção. Assim, iniciamos este material conversando com você sobre o meio ambiente, a saúde e a segurança no trabalho, lembrando que, no exercício profissional diário, você deve agir de forma harmoniosa com o ambiente, zelando também pela segurança e saúde de todos no trabalho.

Tente responder à pergunta que inicia este texto: Meio ambiente, saúde e segurança no trabalho – o que é que eu tenho a ver com isso? Depois, é partir para a ação. Cada um de nós é responsável. Vamos fazer a nossa parte?

Sistemas de transmissão

Nesta seção...

- Histórico sobre sistemas de transmissão
 - Classificação dos transmissores ◀
 - Sinais padronizados ◀
 - Funcionamento dos transmissores ◀
 - Praticando <



Histórico sobre sistemas de transmissão

Para que melhor possamos compreender as modernas técnicas de transmissão, é interessante que nos reportemos a algumas décadas, quando ainda não haviam surgido os primeiros transmissores, o que somente ocorreu na década de 1940. Antes, a leitura dos valores de cada variável do processo era feita apenas no próprio local, mediante instrumentos como manômetros, termômetros, visores de nível etc.

Essa situação pode ser demonstrada por meio do seguinte exemplo: suponhamos uma fabrica que disponha de quatro tanques (TQ1, TQ2, TQ3 e TQ4) para armazenamento de um determinado líquido. Na Figura 1, observamos as localizações dos tanques.

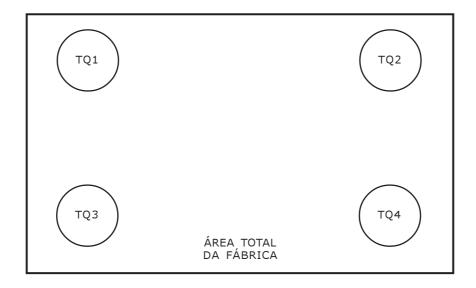


Fig. 1



Considerando-se a importância da monitoração do nível de cada tanque e sabendo-se da inexistência de transmissores, surge a necessidade da instalação de visores de níveis em cada reservatório. Quando o operador da unidade desejasse saber a quantidade estocada em cada tanque, deveria locomover-se até próximo a eles.

Com o uso dos transmissores, todo esse trabalho de locomoção pôde ser evitado, eliminando grande deslocamento por parte do operador.

Os transmissores são instrumentos capazes de medir a variável do processo e transmitir um sinal proporcional a essa variável a distância.

Utilizando o exemplo já citado, imaginemos a mesma fábrica com transmissores instalados em cada tanque. Essa inovação permitirá a centralização das informações, no caso, do nível de cada tanque.

O local para o qual irá convergir a informação referente ao nível de cada reservatório denomina-se Sala de Controle.

Veja, na Figura 2, a planta da fábrica já com a inclusão de modificação.

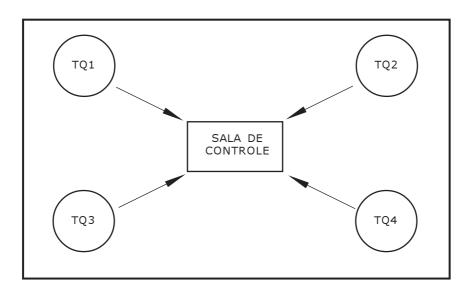


Fig. 2

Com a inclusão de uma Sala de Controle, ou simplesmente um Painel de Controle, o trabalho de monitoração de estoque de líquido da fábrica torna-se, sem dúvida, mais eficiente.

Essa centralização de informações foi a grande contribuição dos transmissores para a automação dos processos.

Embora sua função principal não tenha sido alterada, os transmissores vêm sofrendo um acelerado processo de modernização nas últimas décadas, originando diferentes tipos, com funções cada vez mais aprimoradas.



Classificação dos transmissores

Podem-se classificar os transmissores com base em dois critérios: quanto à aplicação e quanto ao funcionamento.

Quanto à aplicação

Considerando-se a sua aplicação, os transmissores classificam-se de acordo com o tipo da variável medida. Assim, têm-se transmissores de pressão, de nível, de temperatura e outros.

Em razão do grande número de variáveis a serem medidas, existe no mercado uma infinidade de tipos e modelos diferentes de transmissores, o que inviabiliza qualquer análise mais profunda neste momento.

Quanto ao funcionamento

A classificação dos transmissores de acordo com o seu funcionamento é bem mais delimitada do que a anterior. Dentro desse critério poderemos ter, basicamente, três tipos de transmissores: pneumáticos, eletrônicos e microprocessados.

Transmissores pneumáticos

Estes foram os primeiros tipos de transmissores usados industrialmente. Do início da década de 1940 até hoje, os transmissores pneumáticos são utilizados.

O funcionamento básico deste instrumento consiste em converter o sinal de variável medida como pressão, nível, temperatura etc. em um sinal de saída pneumático, proporcional ao valor de variável medida.

A seguir, apresentamos, esquematicamente, alguns exemplos de transmissores pneumáticos.



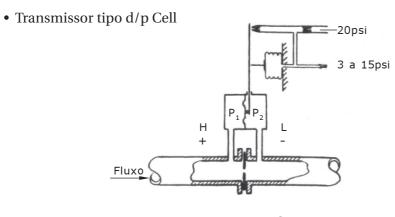


Fig. 3

• Transmissor de pressão diferencial

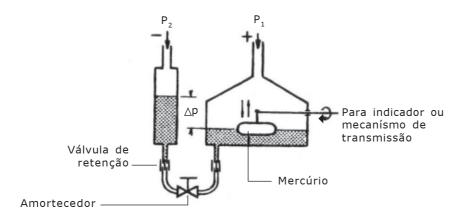


Fig. 4

• Transmissor de temperatura

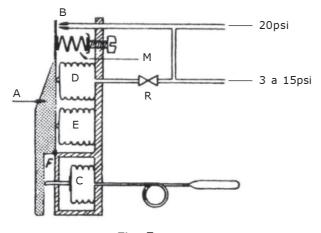


Fig. 5



• Transmissor de pressão

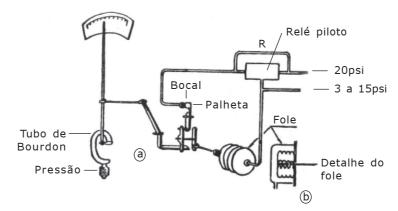


Fig. 6

• Transmissor de nível

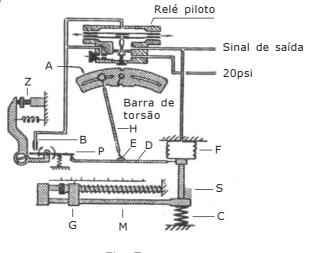


Fig. 7

• Transmissor de densidade

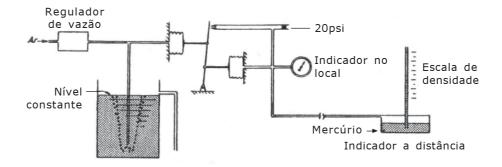


Fig. 8



Observação

Quando a distância entre o transmissor e o receptor é muito grande ou se quer uma resposta rápida no receptor, emprega-se um dispositivo chamado booster ou amplificador de sinal, mostrado na Figura 9.

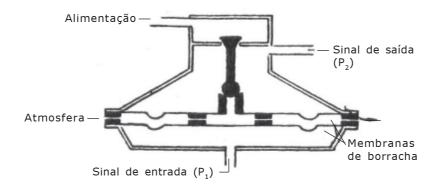


Fig. 9

O *booster* recebe um sinal de entrada fraco, mas transforma-o num sinal de saída ampliado, com uma fonte de alimentação.

Esse dispositivo funciona da seguinte maneira:

- Correspondendo a um aumento de pressão do sinal de entrada, a membrana fecha o escape para a atmosfera, pela válvula esférica do ar de alimentação, o que faz aumentar o sinal de saída.
- Correspondendo a uma diminuição do sinal de entrada, a válvula esférica abre-se, deixando escapar maior quantidade do ar de alimentação, o que faz o sinal de saída diminuir.

Importante

Apesar de possuírem um custo mais elevado, estes transmissores apresentam a grande vantagem de não provocar risco de explosão, quando instalados em áreas perigosas, sujeitas a explosões.

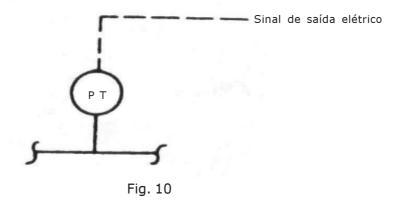


Transmissores eletrônicos

Com o advento da microeletrônica e a crescente confiabilidade dos componentes eletrônicos, os primeiros transmissores eletrônicos puderam ser construídos.

Esse tipo de transmissor emite um sinal elétrico proporcional à variável medida.

Na Figura 10, pode-se observar um transmissor eletrônico de pressão.



No exemplo observado na Figura 10, o transmissor de pressão (PT) envia um sinal elétrico, proporcional à pressão da linha.

Os transmissores eletrônicos permitem o envio de sinais a distâncias muito superiores às conseguidas com transmissores pneumáticos.

Na Figura 11, vemos um transmissor eletrônico de pressão.



Transmissor de pressão HART LD 301

Fig. 11



Transmissores microprocessados

Com a crescente informatização dos sistemas de instrumentação, surgem, no início dos anos 1980, os primeiros transmissores microprocessados, ou, como normalmente são conhecidos, transmissores inteligentes.

Na verdade, esse instrumento diferencia-se do transmissor eletrônico convencional pelo maior número de funções que pode executar.

O fato de possuir um microprocessador dá ao transmissor inteligente a condição de executar tarefas tais como linearização e armazenamento de dados.

É importante salientar que o sinal elétrico de saída é idêntico ao do transmissor eletrônico convencional.

Para exemplificarmos uma aplicação desse tipo de transmissor, Figuras 12 e 13, suponhamos um vaso de formato cilíndrico, colocado na horizontal, no qual se deseja medir o nível com um transmissor de pressão hidrostática.



Fig. 12

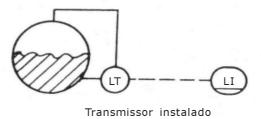


Fig. 13

Como se pode observar na Figura 13, o nível medido no vaso é indicado por um indicador de nível (LI), instalado no painel. Mas, apesar de conhecermos o nível do reservatório, se desejássemos, também, uma informação sobre o volume, esta não seria obtida de forma imediata, pois a relação NÍVEL x VOLUME, nesse caso, não é linear.



Observe, na Figura 14, o gráfico que define a função NÍVEL x VOLUME do exemplo citado.

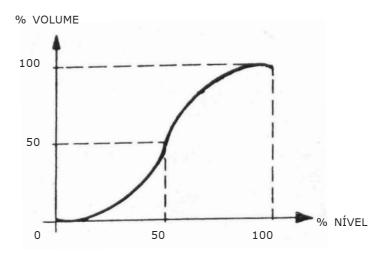


Fig. 14

Na análise da Figura 14, observa-se que, à exceção dos pontos 50% e 100%, nos demais valores não há coincidência entre o percentual de nível e o percentual de volume.

Em outras palavras, quando o nível indicado LI fosse de 50%, o operador saberia de imediato que o volume do líquido contido no vaso era de 50%. Mas, se o valor do nível fosse outro, 70%, por exemplo, seria necessário efetuar alguns cálculos para conhecer o volume.

Essa dificuldade para a obtenção do percentual do volume, no exemplo citado, é solucionada com a utilização de um transmissor microprocessado. Esse instrumento teria condições de gerar um sinal linear, em função do volume.

Esse foi apenas um exemplo de aplicação. Na verdade, os transmissores microprocessados podem executar muitas outras funções. É importante ressaltar que existem transmissores microprocessados para outras variáveis, tais como temperatura, vazão etc.

Sinais padronizados

Independentemente do tipo de transmissor em questão, este sempre atuará enviando um sinal proporcional à variável medida. Esse sinal poderá variar, dependendo da grandeza e do tipo de transmissor.

No caso dos transmissores pneumáticos, o sinal considerado padrão no mercado brasileiro é o de 3 a 15psi; em instrumentos mais antigos, ou importados, podem-se encontrar outras faixas, tais como: 3 a 27psi, 6 a 30psi etc.



No sistema métrico, a faixa de 3 a 15psi é expressa com 0,2 a 1 bar, e são praticamente equivalentes.

Nos transmissores eletrônicos, independentemente de serem microprocessados ou não, o sinal considerado padrão é o de 4 a 20mAcc ou 1 a 5Vcc.

Em escala bem mais reduzida, aparecem outras faixas, tais como: 0 a 20mA, 10 a 50mA etc.

Como se pode perceber, na maioria das faixas utilizadas e, notadamente, nas faixas padronizadas (3-15psi e 4-20mA), o nível mínimo de sinal não é zero. Dizemos que existe um "zero vivo".

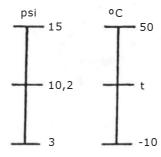
O "zero vivo" adotado no nível mínimo oferece a vantagem de podermos detectar avarias (descalibração ou rompimento do cabo), quando o sinal de entrada for 0%.

Seja o sinal eletrônico ou pneumático, a relação com a variável medida é sempre linear. Assim sendo, torna-se muito fácil correlacionar o sinal enviado pelo transmissor com o valor da variável. Observe o exemplo a seguir.

Exemplo: determinar o valor da temperatura no interior de um vaso cujo transmissor de temperatura é pneumático e está enviando um sinal de 10,2psi.

Dados: Range: -10 a 50°C Sinal padrão: 3 a 15psi

1. Comparando-se as duas faixas, tem-se:



2. Interpolando-se os valores, tem-se:



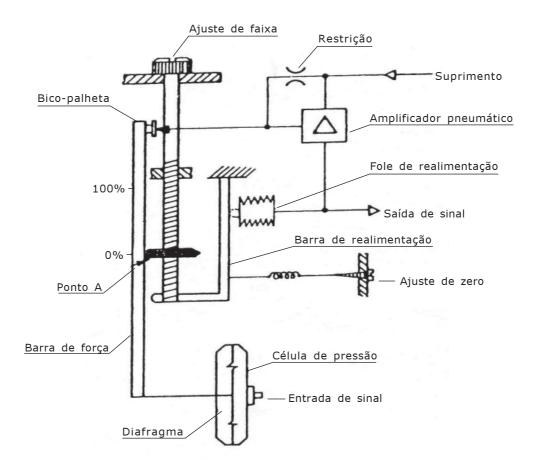
Funcionamento dos transmissores

Apesar de existirem vários fabricantes, o funcionamento básico da maioria dos transmissores encontrados no mercado é semelhante.

Assim sendo, descreveremos, a seguir, o funcionamento de um transmissor pneumático e de um transmissor eletrônico.

O funcionamento do transmissor microprocessado não é transparente à nossa percepção, uma vez que as principais funções desse instrumento são executadas pelo microprocessador (circuito integrado).

Observe o esquema de um transmissor pneumático:



Transmissor pneumático de pressão

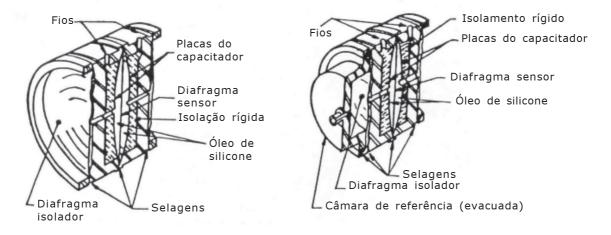
Fig. 15



Verifique o seu funcionamento:

- O sinal aplicado na célula de pressão transmite o movimento à barra de força, por meio do diafragma.
- Esta, por sua vez, encontra-se pivotada no ponto A e tenderá a aproximar mais o conjunto bico-palheta, de acordo com a intensidade do sinal aplicado (quanto maior for o sinal de entrada, maior será a proximidade do conjunto bico-palheta).
- A maior proximidade do conjunto bico-palheta resultará numa contrapressão maior.
- Esse aumento da contrapressão será amplificado no amplificador pneumático, que enviará um sinal diretamente proporcional ao aumento, ao mesmo tempo para a saída de sinal e para o fole de realimentação.
- A força produzida no fole de realimentação provocará um deslocamento da barra de realimentação e, conseqüentemente, do ponto A.
- O deslocamento do ponto A impedirá que a palheta feche totalmente o bico (realimentação negativa).

A maioria dos transmissores eletrônicos de pressão fabricados atualmente no Brasil tem como sensor a célula capacitiva. Assim sendo, apresentamos, a seguir, uma descrição desse tipo de sensor.



Célula capacitativa (diferencial e absoluta)

Fig. 16

A pressão do processo é transmitida para um diafragma sensor no centro da célula, por meio de um diafragma isolador cheio de óleo de silicone. O diafragma sensor funciona como uma mola que se move em resposta à pressão diferencial sobre ele. O deslocamento do diafragma sensor (um movimento máximo de 0,01mm) é proporcional ao diferencial de pressão. A posição



do diafragma sensor é detectada pelas placas do capacitor de ambos os lados dele. A capacitância diferencial entre o diafragma sensor e as placas do capacitor é eletricamente convertida em um sinal de 4 a 20mA ou 10 a 50mA.

A montagem da célula capacitiva (sensor) com a unidade eletrônica dá origem ao transmissor eletrônico de pressão.

Observação

A célula capacitiva também é utilizada no transmissor microprocessado de pressão.

O funcionamento do sensor capacitivo de pressão é baseado nos seguintes conceitos:

$$P = K \left(\frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \right)$$

P = pressão do processo

K = constante

C₁ = capacitância entre o lado de alta pressão e o elemento sensor

C₂ = capacitância entre o lado de baixa pressão e o elemento sensor

I DIF = F
$$\cdot$$
 V_{pp} (C₁ - C₂)

I DIF = é a diferença na corrente de C_1 - C_2

 V_{pp} = tensão de oscilação (pico a pico)

F = freqüência de oscilação

$$F.V_{pp} = \frac{IREF}{C_1 + C_2}$$

I REF = fonte de corrente constante

Assim:

$$I DIF = \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2}$$



O diagrama de blocos da Figura 17 ilustra a operação do sistema.

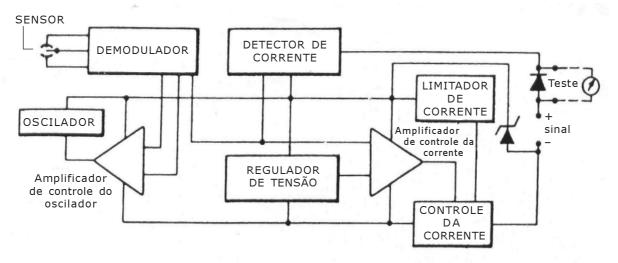


Fig. 17

O sensor é ativado por um oscilador de 32pHz - 30Vpp, no modelo de 4 a 20mA. O sinal do sensor passa, a seguir, por um demodulador, que consiste numa ponte de diodos, cujo sinal DC pulsante de saída é aplicado aos enrolamentos do transformador, servindo como referência para o amplificador que controla o oscilador.

A corrente Dc, através dos enrolamentos do transformador, é proporcional à pressão, de acordo com a equação 2.

A ponte de diodos e um termistor de compensação de temperatura estão localizados no interior do módulo sensor.

O ajuste de linearidade é um SHUNT de corrente ajustado por meio de um *trimpot* (saída de 4 a 20mA) ou de um capacitor variável *trimmer* (saída de 10 a 50mA). Permite uma correção programada que eleva a tensão pico a pico do oscilador, para compensar a não-lineariedade de 1ª ordem da capacitância, em função da pressão.

O oscilador tem a sua freqüência determinada pela capacitância do elemento sensor e pela indutância dos enrolamentos do transformador.

Por consequência, a frequência varia em torno de um valor nominal de 32pHz (50pHz para o modelo de 10 a 50mA).

O amplificador de controle do oscilador controla, mediante uma realimentação, a voltagem que alimenta o oscilador, de acordo com a equação 3.

Um regulador de tensão garante uma alimentação perfeitamente estabilizada para os amplificadores de controle do oscilador e de controle da corrente.

Os componentes de ajuste de zero (um potenciômetro e uma malha resistiva) desenvolvem uma corrente que é adicionada à corrente do sensor.



Por meio de uma chave, podemos selecionar resistores que acrescentam um valor fixo de corrente de zero, para permitir maiores valores de supressão ou elevação (chave disponível apenas na opção 4 a 20mA).

O ajuste do *span* é feito por intermédio de um potenciômetro que determina a quantidade de corrente realimentada para a entrada do amplificador de controle. Esse amplificador aciona os transistores de controle da corrente de saída.

O detector de corrente realimentada para a entrada de um sinal corresponde à soma da corrente de zero e da corrente variável do sensor.

Praticando

- 1. Com o surgimento dos transmissores, qual foi a grande contribuição dada para a área de controle de processos?
- 2. Cite uma vantagem do transmissor eletrônico em relação ao pneumático.
- 3. Descreva a diferença entre um transmissor microprocessado e o transmissor eletrônico.
- 4. Como é também conhecido o transmissor microprocessado?
- 5. Faça um resumo do transmissor eletrônico de pressão (tipo célula capacitiva), incluindo um diagrama de blocos do seu circuito.

Controle automático de processo

Nesta seção...

- Considerações iniciais sobre o controle automático
 - Processo <
 - Tipos de controle
 - Tipos de processo ◀
 - Principais problemas para o controle de processo
 - Elementos básicos de uma malha de controle
 - Modos de controle ◀
 - Sistemas de controle <
 - Tecnologias afins ao controle de processo ◀
 - Praticando <
 - Referências bibliográficas ◀



Considerações iniciais sobre o controle automático

Para bem compreender o funcionamento de um controle automático, basta observar como agiria uma pessoa se tivesse que controlar manualmente uma variável.

Temos um exemplo bastante familiar em nossa vida diária. Quando tomamos banho de chuveiro e temos a nossa disposição água quente e água fria, fazemos uma verdadeira regulagem. Operando com as duas torneiras, procuramos dar à água a temperatura que desejamos. O que acontece é que nosso corpo age com um medidor de temperatura. O nosso cérebro confronta a temperatura que desejamos com a medida e comanda, por intermédio de nossas mãos, a maior ou menor abertura das torneiras.

O controle automático tem representado um papel vital no avanço da engenharia e da ciência. Além de sua extrema importância em sistemas de veículos espaciais, mísseis guiados, pilotagem de aviões, robótica e outros mais, o controle automático tornou-se uma parte importante e integral dos modernos processos industriais e de fabricação.

Uma vê que os avanços na teoria e na prática de controle automático propiciam os meios para se atingir desempenho ótimo de sistemas dinâmicos, melhoria na produtividade, alívio no trabalho enfadonho de muitas operações manuais e repetitivas de rotina; é fundamental que técnicos, engenheiros e cientistas tenham um bom entendimento neste campo.

O primeiro trabalho significativo em controle automático foi o de James Watt, no século XVIII, que construiu um controlador centrífugo para controle de velocidade de uma máquina a vapor.

Atualmente, como os computadores têm-se tornado mais baratos e mais compactos, eles são usados como parte integrante destes sistemas de controle.

Antes de iniciar o estudo do conteúdo desta unidade, é importante conhecer abreviaturas que são comumente usadas na área de controle de processos, como vemos na tabela a seguir. Podem-se obter combinações possíveis, de acordo com o funcionamento dos dispositivos automáticos.

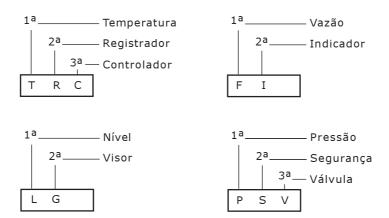


Tabela 1*

LETRA	1ª LETRA	2ª LETRA	3ª LETRA
	variável medida do processo	função do aparelho	função adicional do aparelho
A		Alarme	Alarme
С	Condutibilidade	Controlador	Controlador
D	Densidade		
Е		Elemento (Primário)	
F	Vazão (fow)		
G		Visor (glass)	
I		Indicador	
L	Nível (<i>level</i>)		
MP	Umidade (<i>moisture</i>)		
P	Pressão		
R		Registrador	
S	Velocidade (speed)	Segurança	Segurança
Т	Temperatura		
V	Viscosidade		Válvura
W	Peso (weight)	Bainha (<i>well</i>)	

^{*}Tabela tirada da ISA (Sociedade de Instrumentação da América).

Exemplos

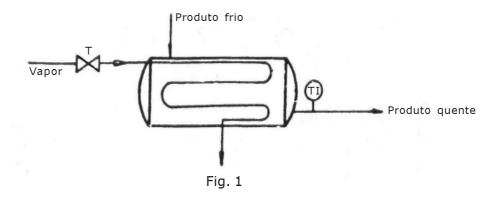




Processo

O Merrian Webster Dicionary define um processo como sendo uma operação ou desenvolvimento natural que evolui progressivamente, caracterizado por uma série de mudanças de modo relativamente fixo e conduzindo a um resultado ou finalidade particulares.

Podemos, também, definir processo de uma maneira bem simples, como sendo uma combinação de recursos humanos e/ou materiais utilizados para fabricar ou modificar um produto. Exemplo: processo de troca térmica (trocador de calor) (Figura 1).



Variáveis de um processo

Variáveis são grandes medidas, manuseadas e controladas, com o objetivo de manter o processo em perfeito funcionamento.

As variáveis clássicas envolvidas nos processos industriais são: pressão, temperatura, vazão e nível. Essas são as variáveis mais comuns que aparecem dentro do conceito da instrumentação, embora, por similar idade de tratamento, outras variáveis, tais como densidade, PH, viscosidade, umidade etc., também façam parte das variáveis medidas e controladas pela instrumentação.

Estas variáveis podem ser controladas ou manipuladas.

Variável controlada

É a variável que está submetida ao controle, ou seja, é aquela que se deseja controlar. É também chamada de variável do processo.

Variável manipulada

É a variável manuseada com o objetivo de se manter a variável controlada dentro de valores desejados.





Terminologia

Para facilitar o entendimento do conteúdo desta unidade, apresentamos alguns termos mais usados dentro da área de controle de processos.

• Faixa de medida (range)

É o conjunto de valores da variável medida/controlada, que está compreendido dentro dos limites superior e inferior de capacidade de medição, transmissão ou controle do instrumento.

• Alcance (span)

É a diferença algébrica entre os valores superior e inferior da faixa de medida (range) do instrumento.

• Precisão (accuracy)

É a tolerância de medição ou transmissão do instrumento.

• Histerese (hysteresis)

Diferença máxima que se observa nos valores indicados pelo instrumento, para um valor qualquer da faixa de medida, quando a variável percorre toda a escala, tanto no sentido crescente quanto no decrescente.

• Ganho

Representa o valor resultante do quociente entre a troca de mudança na saída e a taxa de mudança na entrada que causou.

Controlar um processo

É o ato de manter as variáveis do processo dentro de certas condições preestabelecidas.

Ponto de ajuste (set point) ou valor desejado

É o valor ajustado no controlador, no qual se deseja manter a variável controlada.

Desvio (erro)

É a diferença entre o valor do ponto de ajuste e o valor medido da variável controlada. De forma genérica, erro é a diferença entre o valor lido ou transmitido e o valor real da variável medida.

Distúrbios de processo

É qualquer alteração no processo que venha a modificar o valor da variável controlada. Estes distúrbios são também conhecidos como mudança de carga.



Tipos de controle

Na área de processos, temos dois tipos de controle: o manual e o automático.

Para que haja controle, as seguintes funções são obedecidas: medição, comparação e correção. Por isso, essas três funções são denominadas funções básicas do controle.

Controle manual

É o controle realizado por meio da intervenção humana.

Na Figura 2, temos um exemplo de controle manual, em que as funções básicas do controle são desenvolvidas.

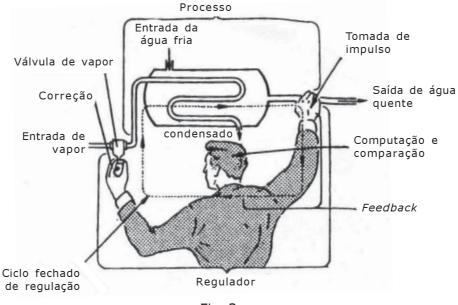


Fig. 2

Medição

O operador verifica a temperatura do produto quente.

Comparação

O operador compara o valor obtido na medição com o valor em que essa temperatura deve ser mantida.

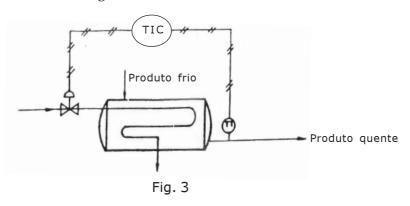


Correção

Se for detectado um desvio, o operador procede à correção necessária, abrindo ou fechando mais a válvula de vapor.

Controle automático

 $\acute{\rm E}$ o controle realizado mediante instrumentos. Nesse caso, o controle independe da intervenção humana. Observe as Figuras 3 e 4.



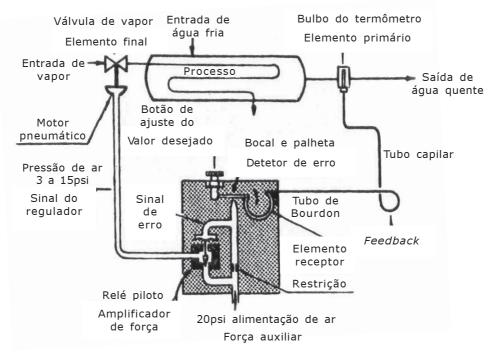


Fig. 4

Vejamos o desenvolvimento das funções básicas do controle automático.



Medição

O elemento primário mede a temperatura do produto quente e, por meio do transmissor, que transforma o valor medido em sinal padronizado, envia-o para o controlador.

Comparação

O controlador de temperatura, ao receber o sinal, realiza uma comparação desse sinal com o ponto de ajuste.

Correção

Caso exista desvio, o controlador emite um sinal de correção para a válvula.

Tipos de processo

Processo contínuo

Um processo é dito contínuo quando a matéria-prima percorre os equipamentos e, nesse percurso, é efetuado sobre ela o processo.

A Figura 3, mostrada anteriormente, é um exemplo de processo contínuo, visto que o produto frio entra no processo, troca calor com o vapor e sai como produto quente, de maneira contínua.

A Figura 5 mostra a produção de vapor de uma caldeira.

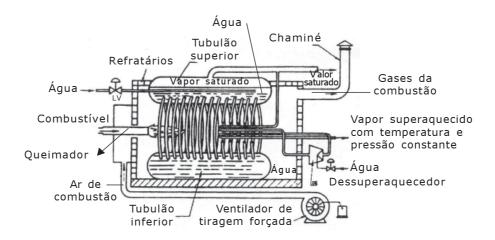


Fig. 5 – Esquema básico de uma caldeira aquatubular



Processo em batelada

Diferente do processo contínuo, em que sempre há um fluxo de massa, no processo em batelada uma porção discreta da matéria sofre todo o ciclo de processamento, desde o seu estado inicial até ser considerada produto acabado, quando, então, é substituída por outra, e todo o ciclo recomeça.

A Figura 6 representa a produção de massa de chocolate.

Etapas:

- introduzir o produto A, B e C;
- aquecer a mistura por duas horas, misturando continuamente; e
- escoar o produto final para dar início à nova batelada.

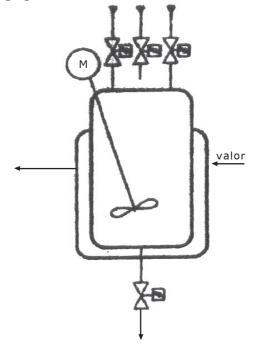


Fig. 6 – Tanque de mistura

Observação

O processo em batelada recebe também o nome de processo descontínuo.

Principais problemas para o controle de processos

Se tomarmos como exemplo um tanque que armazena um volume de líquido, quando submetido a uma variação brusca na vazão de entrada (normalmente chamada de variação em degrau), temos como resposta uma variação diferente de um degrau (exponencial), devido à resistência e à capacitância do sistema.



Veja a figura a seguir.

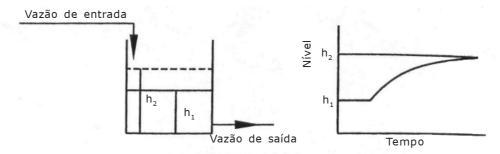


Fig. 7 – Resposta do nível de um tanque a uma variação de degrau na vazão de entrada

Os processos têm características que atrasam as mudanças nos valores das variáveis e, conseqüentemente, dificultam a ação de controle. Essas características estão sempre presentes, ou seja, são inerentes aos processos. São elas:

- · capacitância;
- resistência; e
- tempo morto.

Capacitância

São as partes do processo que têm a capacidade de armazenar energia ou material.

Em um trocador de calor, as paredes das serpentinas e o produto no tanque podem armazenar energia calorífica. Essa propriedade de armazenamento de energia dá a essas capacitâncias a habilidade de atrasar uma mudança. Por exemplo, se a temperatura de entrada do vapor aumentar, será preciso um certo tempo para que mais energia seja adicionada ao produto no tanque, a fim de elevá-lo a uma nova temperatura.

Resistência

São as partes do processo que resistem a uma transferência de energia ou material entre capacitância.

Usando novamente o exemplo do trocador de calor, as paredes da serpentina, que obstruem a vazão do vapor e o efeito isolante das películas de vapor e produto de cada lado dela, resistem



a uma transferência de energia calorífica entre o vapor na serpentina e o produto do lado externo desta.

O efeito combinado de alimentar uma capacitância por meio de uma resistência produz atrasos de tempo na transferência de energia entre capacitâncias. Tais atrasos de tempo provocados por resistência e capacitância (R-C) são freqüentemente chamados atrasos de capacitância ou atrasos de transferência.

A Figura 8 mostra a comparação das respostas de um termopar colocado diretamente na corrente de processo e com o mesmo termopar inserido em um poço termométrico de aço inox. Nota-se que o poço de proteção funciona como



Fig. 8 – Resposta de um termopar com e sem poço de proteção

uma resistência à transferência de calor, retardando a resposta do conjunto de detecção.

Tempo morto

Tempo morto, também chamado de tempo de transporte, é aquele verificado entre a ocorrência de uma alteração no processo e a sua percepção pelo elemento sensor.

São típicos nos sistemas de medição e controle de temperatura. A Figura 9 apresenta um sistema de controle que só começa a responder após decorrido um certo intervalo de tempo denominado "tempo morto".

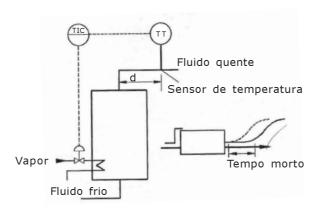


Fig. 9 – Sistema de controle de temperatura com tempo morto



Um resumo dos três tipos de atrasos (capacitância, resistência e tempo morto) aqui abordados pode ser ilustrado no sistema de controle da Figura 10.

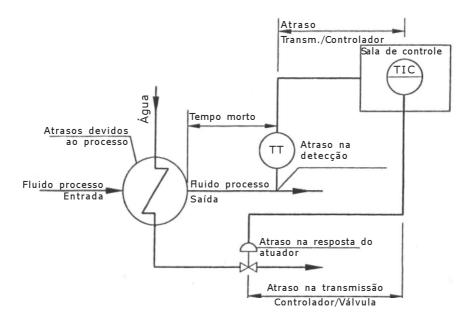


Fig. 10 - Trocador de calor - Atrasos na detecção, na transmissão e tempo morto

Os processos também podem ser classificados em:

- · monocapacitivo;
- bicapacitivo; e
- · multicacacitivo.

Os processos são geralmente analisados em função da sua curva de reação, ou seja, a reação da variáveis do processo provocadas por mudanças de cargas, em condição de não- controle. Na discussão que se segue, o processo representado na Figura 11 pode se encontrar em condição estável. É mostrado o efeito de mudanças bruscas em degrau na alimentação e o respectivo comportamento de saída.

Processo monocapacitivo

O trocador de calor da Figura 1, apresentada no início desta seção, pode ser considerado, aproximadamente, como um processo monocapacitivo, já que a capacitância calorífica da serpentina é quase insignificante, quando comparada com a capacitância do produto no tanque. Assim, nessa suposição, o processo se comporta como monocapacitivo.

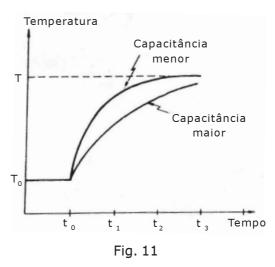


Curva de reação de processo monocapacitivo

A Figura 11 mostra as curvas de reação em condição de não-controle, que se seguem a uma mudança brusca na carga de alimentação causada pelo aumento de abertura da válvula de vapor no tempo zero.

Note que cada curva indica como a temperatura começa a aumentar exatamente ao mesmo tempo em que a carga é mudada; esse aumento da temperatura é cada vez mais lento, até chegar ao novo valor de estado estável.

A resposta completa da temperatura é mais atrasada no tempo quando a capacitância de armazenamento de cada processo é maior. Este exemplo mostra como a capacitância calorífica do produto no tanque e a resistência ao fluxo de calor atrasam o aumento da temperatura. Esse retardo é o atraso de capacitância.



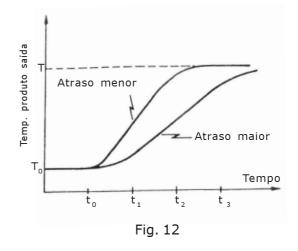
Processo bicapacitivo

Suponhamos, agora, que a parede da serpentina de aquecimento da Figura 1 é suficientemente grande para ter uma capacitância calorífica que é significativa quando comparada com a capacitância do produto no tanque. Nesse caso, o processo pode ser considerado de duas capacitâncias. Assim, a resistência entre elas é a resistência à transferência de calor oferecida pelas paredes da serpentina e pelas películas isolantes nas suas faces interna e externa.

Curva de reação de processo bicapacitivo

A Figura 12 mostra as curvas de reação em condições de não-controle que se seguem a uma mudança brusca de carga de alimentação, causada pelo aumento de abertura da válvula de vapor no tempo $t_{\rm o}$.

A comparação das Figuras 11 e 12 ilustra uma diferença significativa entre os processos de capacitância simples e de duas capacitâncias. Aqui, a temperatura, em vez de mudar imediatamente, começa a subir de forma vagarosa;





depois, mais rapidamente; a seguir, mais devagar; finalmente, reequilibra-se gradativamente em um novo valor de estado estável.

Essa curva de reação em forma de S é característica dos processos de duas capacitâncias. A resistência à transferência de energia entre a capacitância calorífica da serpentina e do produto causa esse retardo, ou seja, atraso de capacitância, na temperatura.

A Figura 12 mostra que a temperatura atingirá seu valor final num tempo tanto maior, quanto maior for o atraso de capacitância do processo.

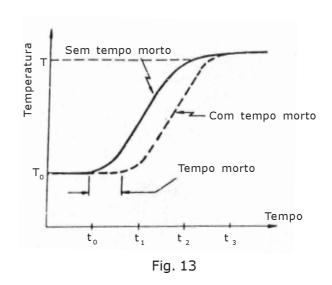
Processo multicapacitivo

Embora muitos processos tenham mais de duas capacitâncias, o comportamento deste processo é similar ao do bicapacitivo, mostrado na Figura 12. Assim sendo, essas curvas de reação podem ser consideradas típicas para todos os processos (que não tenham tempo morto) com duas ou mais capacitâncias.

Efeito do tempo morto nas curvas de reação do processo

O trocador de calor da Figura 1 terá um tempo morto considerável, se o elemento sensor de temperatura for deslocado para um ponto afastado do tanque, isto é, será necessário mais tempo para levar a mudança de temperatura até esse novo ponto.

A Figura 13 mostra o efeito do tempo morto em um processo bicapacitivo (ou multicapacitivo).



Observação

Note que a curva de reação é simplesmente deslocada no eixo dos tempos do valor do tempo morto. A adição do tempo morto não muda a forma ou o tamanho das curvas de reação.

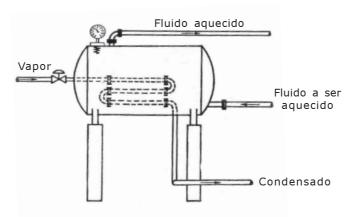


Elementos básicos de uma malha de controle

Entende-se como malha de controle um conjunto de instrumentos e equipamentos que, interligados, tem a finalidade de supervisionar e/ou controlar uma ou mais variáveis do processo.

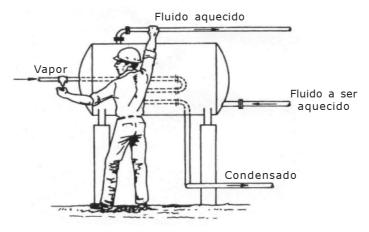
Se a informação sobre a variável controlada não é utilizada para ajustar quaisquer das variáveis de entrada, visando compensar as alterações que ocorrem nas variáveis do processo, estaremos diante de um sistema de malha aberta.

Nas Figuras 14 e 15 são apresentados dois sistemas: sistema de malha aberta e sistema de malha fechada.



Processo típico de troca de calor em malha aberta

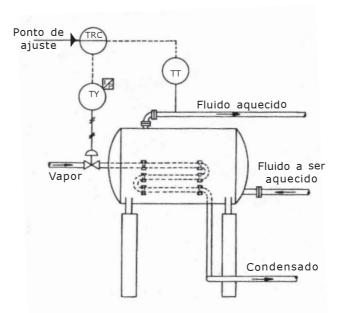
Fig. 14



Processo típico de troca de calor em malha fechada utilizando controle manual

Fig. 15





Processo típico de troca de calor utilizando controle automático Fig. 16

O diagrama em blocos, a seguir, mostra as passagens de sinais entre os principais elementos de uma malha de controle.

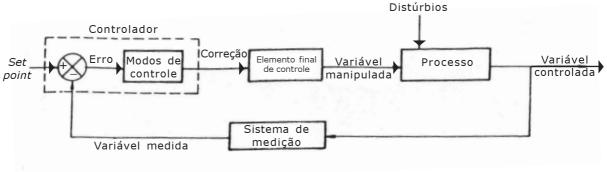


Fig. 17

Sistema de medição

O sistema de medição em uma malha de controle é constituído basicamente de: elemento primário, transdutor e sistema de transmissão.

Ele é de suma importância, pois da medida correta depende um controle satisfatório.



Controlador

É o instrumento destinado a manter a variável controlada dentro de valores predeterminados. Ele reage ao desvio entre a variável controlada (variável medida) e o ponto de ajuste (*set point*), produzindo uma saída (correção).

Na Figura 17, o bloco controlador tem um sinal positivo no lado do ponto de ajuste e um sinal negativo no lado da variável. Temos, entretanto, a possibilidade de fazer o controlador funcionar com o conjunto de sinais opostos, mediante um simples chaveamento. Esse chaveamento nos possibilita transformá-lo em controlador de ação direta ou controlador de ação reversa (inversa) para atender as necessidades do processo.

A Figura 18 apresenta um controlador na sua forma convencional.

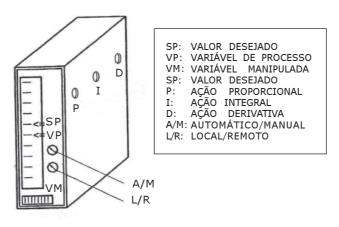


Fig. 18

Controlador de ação direta

Recebe este nome porque, supondo-se o ponto de ajuste constante, se a variável controlada tender a subir, o sinal de entrada do bloco "modo de controle" tenderá a subir, e a saída (correção) idem.

Portanto, diz-se que um controlador é de ação direta, quando um aumento de sinal da variável controlada provoca um aumento no seu sinal de saída. Observe a Figura 19.

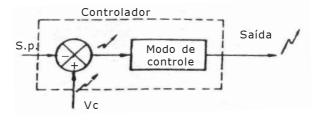


Fig. 19 - Controlador de ação direta



Controlador de ação reversa

Supondo-se o ponto de ajuste constante, se a variável controlada tende a subir, o sinal de entrada da caixa "modo de controle" tenderá a descer, e a saída idem.

Portanto, diz-se que um controlador é de ação reversa, quando um aumento no sinal da variável controlada provoca uma diminuição no seu sinal de saída, como mostra a Figura 20.

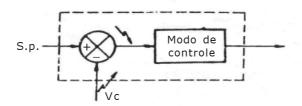


Fig. 20 - Controlador de ação reversa

Elemento final de controle

É um dispositivo acionado pela saída do controlador e que atua numa variável manipulada. Em geral, é uma válvula de controle; eventualmente, pode ser um motor, um contato elétrico, uma válvula solenóide, uma bomba etc.

Uma válvula de controle pode ser construída de modo que se abra quando há um aumento do sinal pneumático, sendo, então, chamada "válvula ar abre", ou de modo que se feche quando há um aumento do sinal pneumático, sendo chamada "ar fecha".

O sistema de controle de um reator, por meio de uma camisa pela qual circula água, permite atender este tipo de dispositivo. Veja a Figura 21.

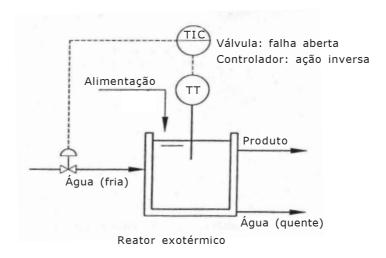


Fig. 21 - Controle de temperatura - Resfriamento de um reator químico



Conjunto controlador x válvula de controle

Apresentadas as ações do controlador e da válvula de controle, devemos pesquisar o conjunto de associação, para que consigamos alcançar o controle pretendido.

Deve ser considerada a situação de segurança para a qual o sistema tem de evoluir, no caso de falta de energia. Por exemplo, se a válvula é "ar abre", na ausência de ar comprimido ela se fechará; por isso, ela também é chamada "falha fecha". Sendo a válvula "ar fecha", na ausência de ar comprimido ela se abrirá; por isso, também é chamada "falha abre".

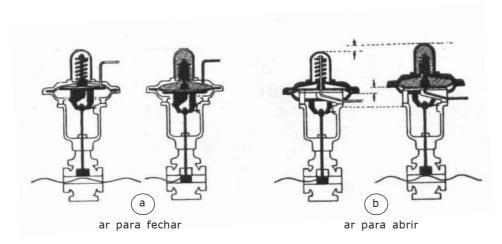


Fig. 22

Modos de controle

Modo de controle, também chamado "ação de controle", é a maneira pela qual um controlador responde a um desvio da variável controlada.

Os instrumentos de controle industrial são geralmente fabricados para produzir os seguintes modos de controle:

- duas posições;
- proporcional;
- proporcional + integral (PI);
- proporcional + derivativo (PD); e
- proporcional + integral + derivativo (PID).

Cada modo de controle tem suas vantagens e limitações características.





Independentemente do seu modo de controle, o controlador poderá ser de ação direta ou ação reversa.

Controle de duas posições

De todas as ações de controle, a ação em duas posições é a mais simples e também a de menor custo; por isso, é extremamente utilizada tanto em sistemas de controle industrial como doméstico.

Neste modo de controle, o elemento final de controle é movido a uma velocidade relativamente alta, entre duas posições prefixadas. Visto que essas duas posições do elemento final de controle são, em geral, "totalmente aberto" ou "totalmente fechado", este modo é chamado controle *ON-OFF* (liga-desliga).

A Figura 23 ilustra um processo cujo controle de temperatura é feito por controle ligadesliga.

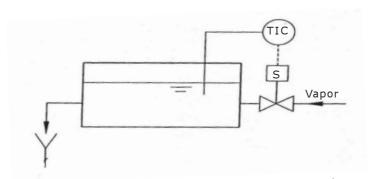
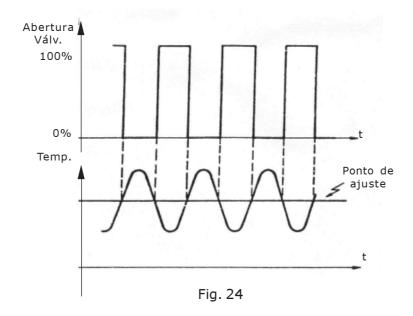


Fig. 23 – Controle de temperatura com vapor atuado por válvula solenóide

Quando a temperatura está no ponto de ajuste (*set point*) ou acima deste, o contato está fechado e a válvula também. Quando a temperatura está abaixo do ponto de ajuste, o contato está aberto e a válvula idem.

A Figura 24 mostra as correções de posição da válvula quando a temperatura varia acima e abaixo do ponto de ajuste.





Observação

Nota-se que esse controle de duas posições não pode promover uma correção exata. Sua correção é maior ou menor que a exata. Não existe, então, nenhuma condição de equilíbrio entre as energias de entrada e de saída; conseqüentemente, a variável controlada irá oscilar para cima e para baixo do ponto de ajuste.

Controle de duas posições com zona diferencial

É uma variante comum do controle de duas posições. Aqui, o elemento final de controle é movido rapidamente de sua primeira posição para a segunda, quando a variável controlada atinge um valor prefixado, e só poderá retornar à sua primeira posição depois que a variável

controlada tiver passado por meio de uma faixa de valores (zona diferencial) e atingido um segundo valor também prefixado.

Pode-se ajustar a zona diferencial de acordo com a necessidade do processo.

A Figura 25 mostra o exemplo típico de um controle de duas posições com zona diferencial.

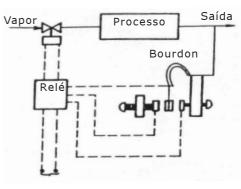
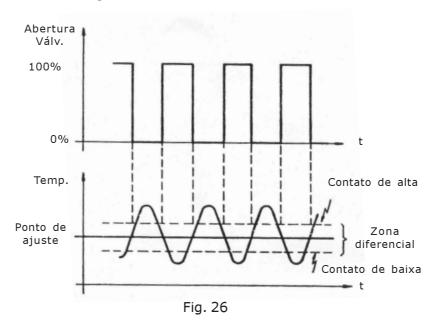


Fig. 25



A Figura 26 mostra as correções da posição da válvula quando a temperatura passa pela zona diferencial. Nota-se que nenhuma ação da válvula ocorre quando a variável está dentro da zona diferencial. Observe a Figura 26.



Observação

- 1. Como vemos, no controle de duas posições, a saída muda de uma condição fixa para outra, o que geralmente provoca correções maiores que o necessário, resultando numa oscilação contínua da variável controlada. Por isso, o seu uso fica restrito a processos que apresentam grande capacitância ou a processos em que a oscilação não seja prejudicial.
- 2. Em razão de suas características, o controle de duas posições é muito utilizado em sistemas de segurança.

Controle proporcional

Em processos que não permitam a aplicação do controle de duas posições, costuma-se recorrer ao controle proporcional, cuja amplitude de correção é proporcional à amplitude do desvio. Nesse caso, o elemento final de controle se move para uma determinada posição, para cada valor do desvio.



A equação que representa esta ação de controle pode ser descrita como:

$$m(t) = K_c \cdot e(t) + b$$

onde:

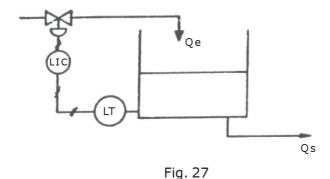
m (t) = sinal de saída do controlador;

 K_c = ganho proporcional;

e (t) = erro (SP - variável medida); e

b = constante (saída do controlador quando o erro é zero), ou saída em modo manual do controlador.

Para exemplo, suponhamos o controle de nível mostrado na Figura 27, a seguir.



Vamos estudar qualitativamente o desempenho do sistema de controle, ao utilizarmos o controlador proporcional no exemplo da Figura 27. As Figuras 28 e 29, mostradas a seguir, auxiliarão o nosso estudo.

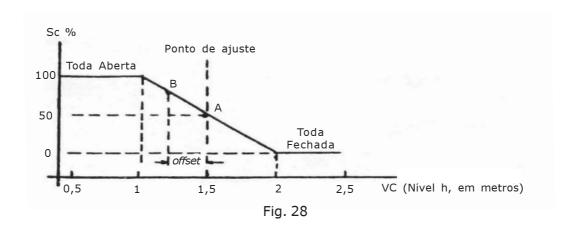
Inicialmente, vamos supor que o nível está estabilizado em 1,5 metro (ponto de ajuste) e a válvula está com 50% de abertura. O sistema está equilibrado, ou seja, a vazão de entrada (Qe) é igual à vazão de saída (Qs).

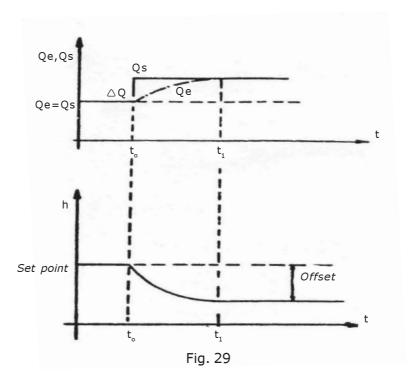
Suponhamos agora que, num tempo to, há um distúrbio tipo degrau na saída do sistema, ou seja, a vazão de saída Qs passou para Qs + \triangle Q.

O nível começa a descer, mas a informação chega ao controlador, que começa, então, a dar correção proporcional ao erro, abrindo a válvula. Observando a Figura 28, começamos a "andar" sobre a reta, de A para B.

No tempo t1, conseguimos "vencer" o efeito do acréscimo $\triangle Q$. Neste momento, temos o menor valor do nível e a correção máxima $\triangle Q$ (passamos para o ponto B da Figura 28), não necessariamente chegando à posição extrema "toda aberta". Portanto, temos o sistema estabilizado num novo valor de nível, e $Qe + \triangle Q = Qs + \triangle Q$.

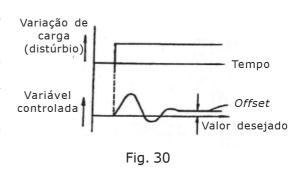






Erro de regime (offset)

Observando as Figuras 28 e 29, notamos que, após atingida a nova situação de equilíbrio, o nível se estabilizou num ponto fora do ponto de ajuste, ou seja, notamos a presença de um desvio. Esse desvio é chamado "erro de regime" (offset) e é uma característica inevitável do controlador proporcional. Veja a Figura 30.





Redução de erro de regime

Observando a Figura 28, podemos notar que, quanto maior a inclinação da reta, menor será o erro de regime. Veja a Figura 31.

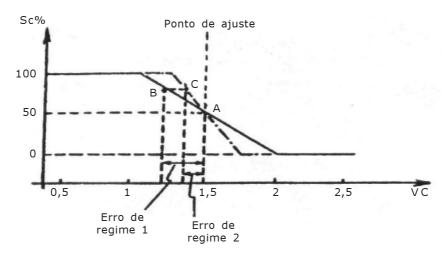


Fig. 31

Isso é possível, desde que se altere o ajuste do controlador proporcional (faixa proporcional ou ganho, que será visto adiante). Cabe ressaltar, entretanto, que vamos obter uma redução do erro de regime, e não a eliminação dele.

Eliminação do erro de regime

Como artifício da eliminação do erro de regime em controladores de modo apenas proporcional, lança-se mão do reajuste manual (*reset* manual).

O procedimento é "abrir" a malha de controle, ou seja, passar o controlador de automático para manual (o instrumento apresenta tal recurso) e, manualmente, alterar a saída do controlador. No caso em estudo, aumentar a saída do controlador; conseqüentemente, abrindo mais a válvula, até que o nível retorne ao ponto de ajuste, quando, então, ainda de forma manual, fazemos a válvula voltar à abertura que proporciona a vazão $Q_e + \Delta Q$, para, finalmente, passar o controlador à posição "automático".

Com esse procedimento, "trazemos" a variável controlada de volta ao ponto de ajuste, eliminando, assim, o erro de regime.

Uma outra maneira de se eliminar o erro de regime é mediante mudanças do *set point* (ponto de ajuste) ajustado no controlador, até que a variável controlada retorne ao valor desejado.

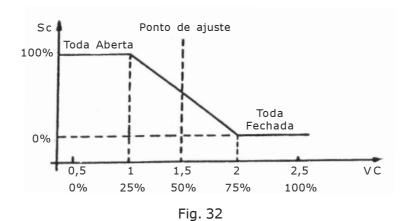


Faixa proporcional (banda proporcional)

Faixa proporcional pode ser definida como sendo a variação percentual da variável controlada, necessária para provocar o curso completo (desde totalmente aberta até totalmente fechada) do elemento final de controle.

A faixa proporcional é, normalmente, expressa em percentagem.

A Figura 32 mostra que, para causar o curso completo da válvula (desde totalmente aberta até totalmente fechada), é necessária uma mudança na variável controlada, no caso "nível", de 1 metro.



Portanto, a faixa proporcional será de 1 metro em 2 metros, ou seja, 50%, pois:

$$FP = \frac{2m - 1m}{2,5m - 0,5m} = \frac{1m}{2m} = 0,5 = 50\%$$

Pode-se obter, também, a faixa proporcional a partir da percentagem dos valores. No caso:

$$FP = 75\% - 25\% = 50\%$$

Para solidificarmos o conceito de faixa proporcional, veremos um outro exemplo.

Se a faixa completa de um instrumento é de 200°C e é preciso uma mudança de temperatura de 50°C para causar o curso completo da válvula, a faixa proporcional será de 50°C em 200°C, ou seja, 25%.

A faixa proporcional pode variar de um valor menor que 1% até um valor maior que 200%.

A Figura 33 mostra a relação entre a posição da válvula e a variável controlada, para vários valores de faixa proporcional.



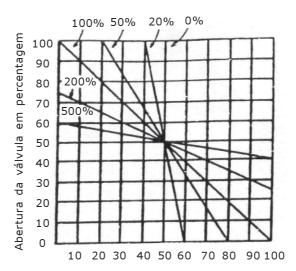


Fig. 33 - Variável controlada - Percentagem da escala

Observação

Note que, quando a faixa proporcional for superior a 100%, o curso completo da válvula não será promovido.

Ganho (sensibilidade)

Um outro conceito para expressar a proporcionalidade é o ganho, também conhecido como "sensibilidade".

Ganho ou sensibilidade do instrumento é a relação entre a variação de saída e a variação de entrada (variação da variável controlada), como mostra a expressão abaixo:

$$K = \frac{\triangle s}{\triangle e}$$
 onde:
$$K = ganho;$$

$$\triangle s = variação de saída; e$$

$$\triangle e = variação de entrada.$$

Quanto maior for o ganho, maior a variação de saída do instrumento para a mesma variação da variável. Em outras palavras, o instrumento reagirá tanto mais fortemente quanto maior for o seu ganho.

Matematicamente, o ganho é recíproco da faixa proporcional, ou seja:

$$K = \frac{100\%}{FP (\%)}$$

Os instrumentos de controle possuem o ajuste de proporcionalidade expresso em ganho ou expresso em faixa proporcional.

Note que, quanto menor for a faixa proporcional ajustada, maior será o ganho, e vice-versa.

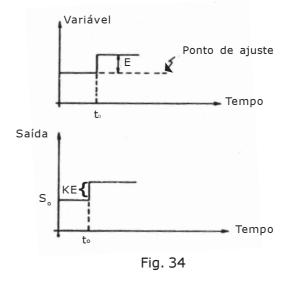


Análise gráfica da resposta de um controlador proporcional

A Figura 34 mostra a resposta gráfica de um controlador proporcional de ação direta a um desvio tipo degrau, em malha aberta.

Inicialmente, a variável está coincidente com o ponto de ajuste, e a saída do controlador é S_o

No instante t_a foi introduzido um desvio de amplitude "E". Note que o controlador sofre uma variação na saída igual a KE. A partir daí, a saída do controlador permanece constante, visto que o desvio se mantém fixo em E e o sistema está em malha aberta.



Observação

A atuação do modo de controle proporcional depende da amplitude do desvio, e não do tempo de duração dele. Portanto, a saída do controlador proporcional não varia enquanto o desvio permanece fixo; ela só variará quando o desvio variar.

Influência do ajuste da faixa proporcional (ou do ganho)

O ajuste indevido da faixa proporcional pode provocar oscilações violentas ou, então, respostas lentas demais.

A Figura 35 mostra a resposta gráfica da variável controlada em função do ajuste da faixa proporcional, após introduzido um erro no sistema, em malha fechada.

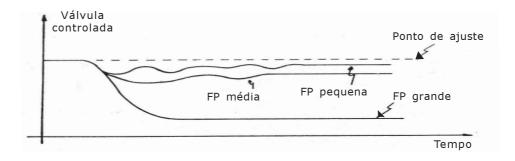


Fig. 35



Note que, quando diminui a faixa proporcional (aumento do ganho), o erro de regime também diminui, e o sistema responde mais rapidamente às variações. Podemos, então, concluir que a faixa proporcional deve ser ajustada no menor valor (ou ganho no maior valor) que o processo permitir.

Cabe ressaltar que, à medida que a faixa proporcional é diminuída, o erro de regime também diminui, mas as oscilações e o tempo para estabilização aumentam. Caso se utilize uma faixa proporcional excessivamente pequena, o processo poderá tornar-se instável.

Observação

- 1. O modo proporcional é um meio poderoso de estabilização, capaz de uma larga faixa de aplicação, mas que tem a característica indesejável do erro de regime.
- 2. De uma maneira geral, o controlador proporcional pode ser empregado em quase todo tipo de processo, bastando que esse processo seja tolerante ao erro de regime.
- 3. Não deverá ser usado quando a faixa proporcional tiver que ser grande (caso do controle de vazão), ou quando houver distúrbios freqüentes.

Controle proporcional + integral (PI)

Enquanto a saída do modo proporcional é proporcional ao desvio, a saída do modo integral é função da integral do desvio, ou seja, a velocidade de correção é proporcional ao desvio.

Temos aí o melhor dos dois modos de controle: o modo proporcional, que corrige os erros instantaneamente, e o integral, que se encarrega de eliminar, ao longo do tempo, o erro de regime característico do modo proporcional.

Neste controlador, o modo integral executa automaticamente o reajuste manual que o operador faria para eliminar o erro de regime. Por isso, ele é também chamado "controlador proporcional com reset automático".

No controle proporcional + integral, o movimento da válvula é função da amplitude e da duração do desvio da variável, enquanto no proporcional é função apenas da amplitude desse desvio. Em conseqüência, em vez de termos uma posição específica da válvula para cada valor do desvio, o proporcional + integral pode determinar a estabilização da válvula em qualquer



posição, desde totalmente aberta até totalmente fechada, para um determinado valor da medição. A válvula é continuamente posicionada, conforme seja necessário, para manter a variável no ponto de ajuste.

Apresentamos a seguir o esquema básico de um controlador P + I.

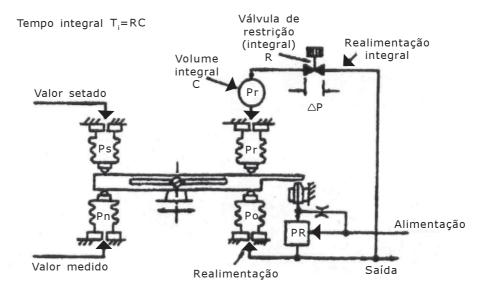


Fig. 36 - Exemplo típico de um controlador com ações P e I pneumático

O modo integral é normalmente utilizado em conjunto com o modo proporcional (controlador PI), pois a velocidade de resposta do modo integral sozinho é muito lenta, e seu tempo de estabilização é muito longo.

Análise gráfica da resposta de um controlador proporcional + integral

A Figura 37 mostra a resposta gráfica de um controlador PI, de ação direta, a um desvio tipo degrau, em malha aberta.

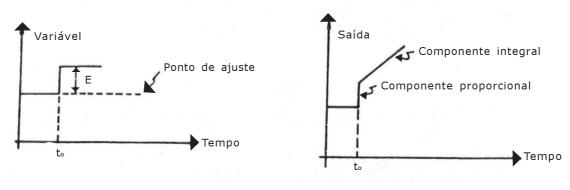


Fig. 37



No instante t_o foi introduzido um desvio de amplitude E. O modo proporcional varia a saída de KE no momento em que surge o desvio, ficando constante a partir daí, uma vez que o desvio se mantém fixo.

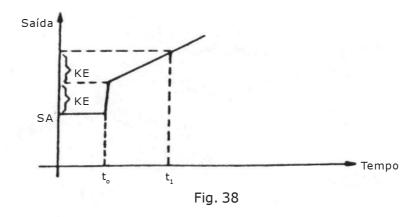
A saída do modo integral não varia instantaneamente com o surgimento do desvio, mas o fato de o desvio ser diferente de zero faz com que a saída do modo integral varie à medida que o tempo vai passando, e essa variação só irá cessar quando o desvio voltar a zero. Como o desvio é constante, a saída da componente integral será uma rampa.

Vê-se, então, que o modo proporcional será mais efetivo do que o integral na resposta a rápidas variações do processo.

Tempo integral

Enquanto o modo proporcional é descrito pelo ganho K, o modo integral é descrito pelo tempo integral (*reset time*) Tt₁, e que pode ser ajustado por meio do botão existente no controlador.

Conforme mostrado na Figura 37, simulando-se, num instante t_o , um desvio tipo degrau de amplitude E, em malha aberta, a saída do controlador PI terá o aspecto da Figura 38.



No instante t_o , a saída sofre instantaneamente uma variação igual a KE, devida somente ao modo proporcional. A partir desse instante, a saída passa a aumentar, graças ao modo integral. Repare que, no instante t_1 , o modo integral terá variado a sua saída no mesmo valor da variação do modo proporcional.

Pode-se definir, portanto, tempo integral como sendo o tempo necessário para que o modo integral produza uma variação na saída igual àquela produzida pelo modo proporcional.

O tempo integral (T_i) é usualmente expresso em minutos ou minutos por repetição (MPR). O tempo integral também é chamado "tempo de reajuste", ou, ainda, "tempo por repetição".





Quanto menor for o valor do tempo integral, mais rápida será a correção devida ao modo integral.

Taxa de reajuste

Em alguns controladores, o ajuste do modo integral é expresso em repetições por minuto (RPM). Esse termo, chamado taxa de reajuste, representa o número de vezes que o modo integral produz uma variação na saída igual àquela produzida pelo modo proporcional, no tempo de 1 minuto.

A taxa de reajuste também é chamada de "taxa de reset" ou, ainda, "velocidade de reajuste". Matematicamente é definida como o inverso de T_i, ou seja, <u>1</u>.

Assim, na Figura 38, apresentada anteriormente, se T, for, por exemplo, de 30 segundos, ou seja, 1/2 minuto, teremos a taxa de reajuste de 2 repetições/minuto.

Cabe ressaltar que, quanto maior for o valor da taxa de reajuste, mais rápida será a correção devida ao modo integral.

Equação característica do controlador proporcional + integral

$$S = S_o + K \left[E + \frac{1}{T_i} \int_{-T_i}^{t} E dt\right]$$

S = sinal de saída do controlador

 $S_0 = sinal de saída para desvio nulo$

K = ganho

E = desvio ou erro

 T_i = tempo integral

Note que, além da correção devida ao modo proporcional, temos agora uma correção adicional, que faz aumentar ou diminuir o sinal de saída, durante todo o tempo em que existir algum erro.

A existência da ação integral não garante que o processo se encontre estável mas, sim, que não haverá erro de regime quando o processo atingir um estado estável.



Observação

- 1. O controlador PI tem dois parâmetros de ajuste: ganho (ou faixa proporcional) e taxa de reajuste (ou tempo integral), ambos ajustáveis por botões existentes no instrumento.
- 2. Da mesma maneira que no caso do modo proporcional, existe o perigo de oscilações quando o modo integral é exagerado. Isso significa que, com a taxa de reajuste muito alta, a válvula se movimentará mais rapidamente que a medição e o processo oscilará, aumentando o tempo de estabilização. Por outro lado, com uma taxa de reajuste muito baixa, a variável não retornará ao ponto de ajuste com rapidez suficiente, ou seja, a variável fica muito tempo fora do ponto de ajuste.
- 3. O modo integral aumenta a tendência a oscilar do sistema de controle. Por isso, ele deve ser corretamente ajustado, para que se possa obter um controle preciso com o menor tempo de estabilização.
- 4. O efeito desestabilizador do modo integral é normalmente neutralizado, usando-se um ganho levemente menor do que o que seria possível utilizar com um controlador puramente proporcional. Dessa forma, o PI assegura a estabilidade da malha de controle sem erro de regime.
- 5. Geralmente o controlador PI pode ser utilizado para controlar a maioria das variáveis normalmente encontradas em processos industriais. Seu uso é vantajoso, quando o processo apresenta pequenas capacitâncias e os distúrbios são freqüentes e grandes.

Entretanto, não é recomendado para processos que apresentam grandes atrasos; nesse caso, lança-se mão de modo derivativo. Em particular, o controle de vazão exige uma faixa proporcional grande (em geral mais de 100%), tornando praticamente obrigatório o uso do reajuste automático com várias RPMs.

Controle proporcional + derivativo (PD)

O terceiro modo de controle utilizado em controladores industriais é o modo derivativo, também chamado *rate* ou pré-*act*.

O modo derivativo reage em função da velocidade do desvio, ou seja, não importa o tamanho do desvio mas, sim, a velocidade com que ele surge.

Portanto, a amplitude de correção é proporcional à velocidade do desvio. Em outras palavras, a amplitude de correção é proporcional à derivada do desvio, ou seja, a saída do modo derivativo é proporcional à inclinação da curva da variável controlada.

O modo derivativo só exerce qualquer ação quando a variável está oscilando, ou seja, aproximando-se ou afastando-se do ponto de ajuste. Pelo fato de o desvio permanente não



acarretar qualquer correção, o modo derivativo nunca é utilizado isoladamente, mas, sim, em combinação com outros modos de controle.

O controle proporcional + derivativo (PD) resulta da associação dos dois modos de controle.

Quando, por qualquer razão, a variável se afasta do ponto de ajuste, o modo derivativo faz com que a saída varie mais do que variaria somente com o modo proporcional. Em consequência, a variável tende a se aproximar mais rapidamente do ponto de ajuste.

Por outro lado, quando a variável já está retornando ao ponto de ajuste, o modo derivativo exerce uma ação contrária, reduzindo as eventuais oscilações. Em conseqüência, o tempo de estabilização se torna mais curto do que se houvesse somente o modo proporcional.

O efeito estabilizante do modo derivativo permite que se utilize uma faixa proporcional mais estreita.

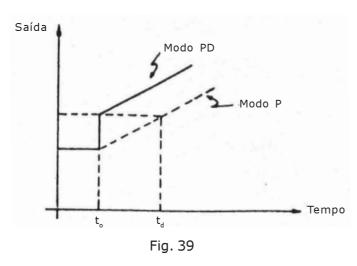


O modo derivativo, entretanto, não é capaz de eliminar o erro de regime, visto que não exerce qualquer ação quando se tem um desvio permanente.

Tempo derivativo

O ajuste do modo derivativo, chamado "tempo derivativo", é o tempo em minutos pelo qual o modo derivativo adianta o efeito do modo proporcional.

Conforme foi mostrado na Figura 38, simulando-se, num instante t_o, um desvio tipo rampa, em malha aberta, a saída do controlador PD terá o aspecto da Figura 39.



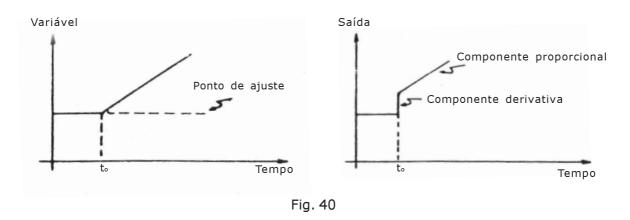
A saída no instante t_o já assume um valor igual ao valor que seria obtido, caso se tivesse somente o modo proporcional, após o tempo t_d, ou seja, a saída do modo derivativo adianta a saída do modo proporcional de um tempo t. Esse tempo é, portanto, chamado "tempo derivativo" ou rate time.

O modo derivativo atua como se já soubesse, de antemão, a correção necessária, introduzindo-a antecipadamente.



Análise gráfica da resposta de um controlador proporcional + derivativo

A simulação de um desvio tipo degrau não é adequada para se estudar o modo derivativo, pois a derivada seria infinita no instante da aplicação do degrau. Por isso, a Figura 40 mostra a resposta gráfica de um controlador PD, de ação direta, a um desvio tipo rampa, em malha aberta.



No instante t_o , foi introduzido um desvio tipo rampa. A saída do modo proporcional será uma rampa. O modo derivativo varia a saída no momento em que a variável começou a variar, ou seja, no instante t_o , ficando constante a partir daí, uma vez que a variação do desvio tem inclinação constante.

Considerando-se um sistema de controle em malha fechada, pode-se constatar, pela Figura 41, que a aplicação da ação derivativa não elimina o erro, ou seja, tal como ação proporcional de modo isolado, ainda persiste um dado *offset*, ou afastamento da variável do processo em relação ao valor desejado.

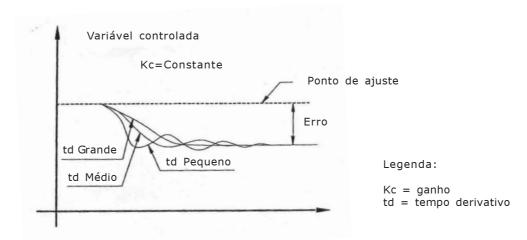


Fig. 41 – Resposta de um controlador PD para diferentes valores de td



Equação característica do controlador proporcional + derivativo

O controlador PD tem uma ação combinada pela relação:

$$S = S_o + K \begin{bmatrix} E + t_d & \underline{dE} \\ dt \end{bmatrix}$$

Onde:

S = sinal de saída do controlador

S_o = sinal de saída para desvio nulo

K = ganho

E = desvio

t_d = tempo derivativo

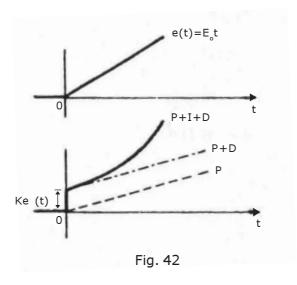
Observação

- 1. Os ajustes são os mesmos do controlador proporcional, mais o ajuste de tempo derivativo.
- 2. Quanto maior for o valor do tempo derivativo, mais forte é a ação derivativa. Entretanto, se esta for exagerada, existirá também a possibilidade de oscilações. Por outro lado, uma ação derivativa muito pequena não tem efeito significativo. Existe, portanto, um valor ideal que depende das características de cada processo.
- 3. O efeito estabilizante do modo derivativo permite que se utilize um ganho maior do que o que seria possível utilizar com um controlador puramente proporcional.
- 4. O controlador PD tem uso limitado na prática industrial, visto que, embora o modo derivativo tenha efeito estabilizante, o erro de regime não é eliminado.
- 5. O modo derivativo é mais indicado para processos lentos, porque sua aplicação resulta em respostas mais rápidas. Para processos que apresentam oscilações rápidas, não é indicado, uma vez que produzirá correções máximas ou mínimas do controlador, o que provocaria instabilidade ou um controle totalmente insatisfatório.



Controle proporcional + integral + derivativo (PID)

O controlador proporcional + integral + derivativo (PID) resulta da associação dos três modos de controle.



Combinam-se, dessa maneira, as vantagens de cada um dos modos:

- o modo proporcional, que causa uma correção proporcional ao desvio, com um tempo de estabilização curto;
- o modo integral, que elimina o erro de regime; e
- o modo derivativo, que reduz o tempo de estabilização e, simultaneamente, o desvio máximo.

Equação característica do controlador proporcional + integral + derivativo

A saída de um controlador PID é representada por:

$$S = S_o \pm K \left[E + \frac{1}{T_i} \right] \left[Edt + Td \frac{dE}{dT} \right]$$



A Figura 43 mostra a resposta gráfica da variável controlada, típica dos controladores P, PI e PID, em malha fechada.

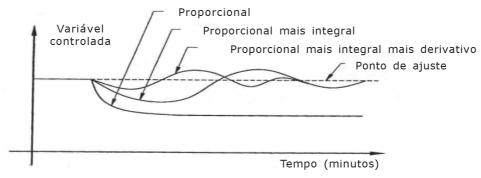


Fig. 43 – Resposta de um controlador PID

Note que, com a adição do modo integral, o erro de regime foi eliminado; com a adição do modo derivativo, a estabilidade do processo melhorou sensivelmente.

Observação

- 1. O controlador PID tem três parâmetros de ajuste: ganho (ou faixa proporcional), taxa de reajuste (ou tempo integral) e tempo derivativo.
- 2. O controlador PID é utilizado quando se deseja uma grande rapidez de correção e ausência de erro de regime, aliadas a um desvio máximo reduzido.
- 3. É utilizado em controle de temperatura, análise química, pH etc. Em geral, não há necessidade do modo derivativo em controle de nível e pressão. No caso de controle de vazão, a adição do modo derivativo pode até ser contraproducente, visto que o sinal de vazão geralmente contém ruídos (variações rápidas de sinal) que ocasionariam flutuações freqüentes e rápidas no sinal de saída.

A Tabela 2 estabelece algumas sugestões de cunho prático, para determinar a ação de controle normalmente utilizada nas situações mais comuns.

Tabela 2

Ação de controle	Vazão de pressão de líquido	Pressão de gás	Nível de líquido	Temperatura e pressão de vapor
Proporcional	Essencial	Essencial	Essencial	Essencial
Integral	Essencial	Não necessária	Utilização rara	Importante
Derivativa	Não	Não necessária	Não necessário	Essencial

Verifique algumas informações e recomendações úteis sobre cada ação de controle, considerando as características de cada uma delas.

Controle de duas posições ou liga-desliga

É a técnica de controle que apresenta o menor custo e a maior simplicidade. Mas seu uso é limitado a processos que respondem de forma lenta aos distúrbios e, em geral, não são aplicados em sistemas de ordem superior que não possuem constante de tempo ou sistemas com médio ou grande tempo morto. Portanto, a área de utilização do controle liga-desliga nas indústrias de processo é restrita.

Controle proporcional

O controle proporcional puro é aplicado em muitos processos com constante de tempo simples e sua resposta é rápida, tanto aos distúrbios como às alterações do ponto de ajuste. Possui, no entanto, a característica normalmente indesejável de apresentar um erro residual no estado estacionário (*offset*). A sintonia é relativamente fácil de ser obtida, pelo ajuste de um único parâmetro (Kc).

Controle proporcional + integral

É a ação de controle mais aplicada em controle de processos. Ele não apresenta o *offset* relacionado ao controle proporcional puro, com a vantagem de aumentar a velocidade de resposta em relação à ação integral isolada. Com a presença da ação integral, a estabilidade da malha de controle diminui. Como já vimos antes, há o risco da saturação pelo modo integral e, neste caso, o controlador continua integrando o erro, mesmo sem haver correção efetiva, o que prejudica o controle do processo. O controle P + I é muito usado no controle das variáveis nível, vazão, pressão e outras que não apresentam atrasos muito grandes.

Controle proporcional + derivativo

É um controle efetivo quando se têm sistemas com algumas constantes de tempo. Apresenta uma resposta mais rápida com menor *offset* do que o controle proporcional puro, mas, ainda assim, este desvio persiste. Normalmente, a ação derivativa aumenta a estabilidade da malha de controle. Em processos rápidos, como o controle de vazão, não é indicado o uso da ação derivativa, a não ser acompanhada da proporcional e da integral, o que resulta no controle PID.

Controle proporcional + integral + derivativo

Como já foi visto, esta é a ação de controle mais completa entre as técnicas de controle convencional. Em termos teóricos, o controle PID tem como resultado um melhor controle do que as ações PI ou PD. No entanto, na prática, há dificuldade de ajuste dos parâmetros de sintonia. O PID é uma ação usada na indústria em controle de pH, temperatura e outras variáveis analíticas.



Sistemas de controle

Os sistemas de controle ou estratégias de controle constituem a filosofia empregada para se controlar uma variável em função de uma ou outras variáveis.

Veremos, a seguir, os principais sistemas de controle.

Controle feed forward (controle antecipativo)

Nas malhas de controle até agora vistas, estivemos lidando com o controle feedback, que vem a ser realimentação negativa, ou seja, a saída do sistema envia um sinal que é usado para a correção dele; depois que o erro aparece é que se toma uma providência.

No entanto, se conhecermos o efeito de uma determinada perturbação no processo, poderemos criar um sistema de controle que se antecipe a este efeito com uma correção adequada, ou seja, o sistema é levado a reconhecer novas condições mesmo antes que elas comecem a afetar o processo. A isso chamamos de controle feed forward, e, pelo motivo exposto, ele é também chamado "controle antecipativo".

O diagrama de blocos a seguir ilustra o conceito deste tipo de controle.

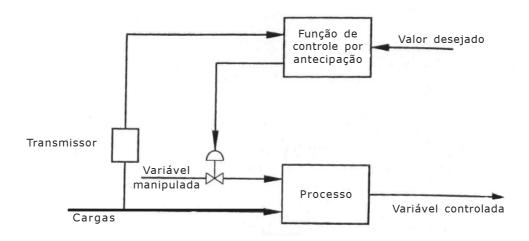
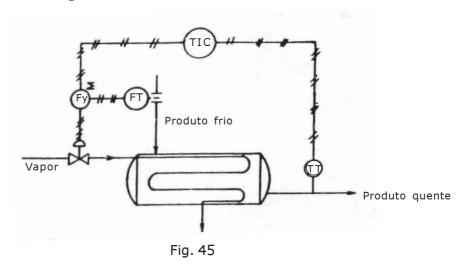


Fig. 44 - Sistema de controle por antecipação - Diagrama de blocos



O controle *feedback* mede o erro na saída do processo e retroalimenta o sistema, até conseguir o equilíbrio da variável; porém o erro ocorre sem que o sistema possa evitá-lo, corrigindo-o, apenas.

Quanto ao controle *feed forward*, observamos que ele regula a variável, evitando o distúrbio na entrada do processo; porém, se ocorrer um erro na saída, esse sistema não agirá. Por esse motivo, na prática, o sistema *feed forward* é raramente utilizado sozinho, sendo associado a um *feedback*, como mostra a Figura 45.



Pela figura anterior, podemos observar que o relé somador "Fy" recebe os sinais do FT (malha *feed forward*) e do TIC (malha *feedback*), e envia a resultante para a válvula de controle de vapor.

Nas condições de equilíbrio, a saída do relé somador será igual ao sinal recebido do FT, uma vez que a temperatura está no ponto de ajuste. Caso a temperatura saia deste ponto, a saída do

relé somador será diferente da do FT. Isso irá ocorrer até o sistema voltar às condições de equilíbrio, ou seja, até que a temperatura retorne ao ponto de ajuste. A utilização dessa malha permite que a temperatura na saída do trocador seja mantida de forma estável, mesmo quando ocorram variações na vazão do fluido por aquecer.

Na prática, o controlador por antecipação raramente é utilizado sozinho, e, sim, em conjunto com o controle por alimentação. Veja a Figura 46.

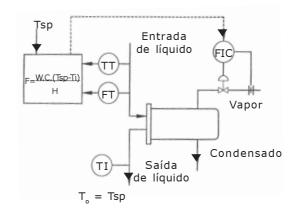


Fig. 46 – Controle por antecipação: trocador de calor



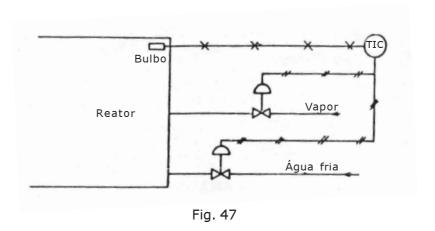
Controle split range (faixa dividida)

O sistema de controle em *split range* é utilizado quando se deseja que um determinado evento seja realizado numa ordem tal, que uma certa variável manipulada tenha preferência sobre outra, como meio de controlar o processo.

Este tipo de controle também é usado em aplicações em que se impõem limites de segurança.

Vejamos o seguinte exemplo.

Consideramos um processo de reação química em que determinados produtos são colocados em um reator, que deve ser aquecido para que se chegue à temperatura correta de reação. Ao se iniciar a reação, entretanto, há desprendimento de calor (a reação é exotérmica), e torna-se necessário resfriar o reator, para que a temperatura se mantenha no valor desejado. Nesse caso, convém, eventualmente, usar o arranjo da Figura 47.



Os atuadores das válvulas serão de range dividido. A válvula de água fria estará aberta com 3psi (0,2 bar) no atuador, e fechada com 9psi (0,6 bar) ou mais. A válvula de vapor estará fechada com 9psi (0,6 bar) ou menos, e aberta com 15psi (1 bar). O controlador deverá ser de ação inversa, ou seja, a sua saída deve diminuir com o aumento da temperatura.

Um outro exemplo típico de aplicação desta técnica de controle em faixa dividida é no controle de pressão de um tanque através da injeção de nitrogênio (N₂), como ilustra a Figura 48.



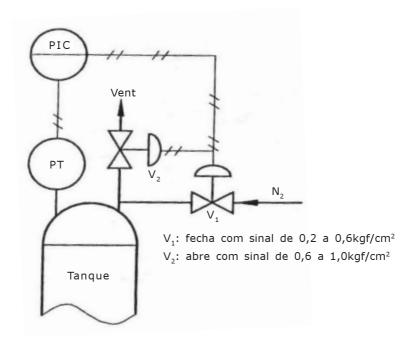


Fig. 48 - Controle de pressão em faixa dividida

Controle em cascata

É utilizado quando uma variável se torna mais difícil de ser controlada, em virtude de perturbações causadas por variações de uma outra variável. Em outras palavras, é aplicado quando se deseja minimizar a interferência de outra variável na variável principal.

O controle em cascata é uma das técnicas usadas para aumentar a estabilidade de um processo.

Vejamos o seguinte exemplo.

Suponhamos um controle em *feedback*, em que um controlador de temperatura esteja sendo usado para atuar uma válvula na linha de combustível utilizada em um processo.

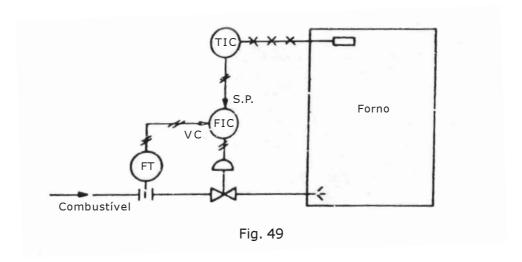
Variações na temperatura farão com que varie a saída do controlador, abrindo-se ou fechando-se a válvula, conforme as necessidades do processo.

Vamos supor, agora, que a pressão do combustível a montante da válvula esteja sujeita a variações. Essas variações, por sua vez, causarão variações na vazão do combustível. Entretanto, a correção só será efetuada quando o controlador de temperatura apresentar um desvio. Se o processo tiver um tempo morto ou um atraso de resposta considerável, pode ocorrer um desvio grande de temperatura em relação ao ponto de ajuste.



Um controlador de vazão, instalado na linha de combustível e operando o atuador da válvula, iria corrigir as variações de vazão do combustível causadas por variações de pressão.

Vamos imaginar, agora, que o ponto de ajuste do controlador de vazão seja alterado, automaticamente, pelo sinal do controlador de temperatura. Verifique a Figura 49.



Supondo-se que o sistema, num determinado instante, esteja sendo controlado corretamente, se houver uma variação na pressão do combustível, haverá uma variação na vazão dele.

Essa variação será sentida pelo controlador de vazão, o qual, imediatamente, abrirá ou fechará a válvula, de maneira que se obtenha a vazão correta. Por outro lado, se as condições do processo causarem uma variação de temperatura, o controlador respectivo terá sua saída alterada. Essa alteração modificará o ponto de ajuste do controlador de vazão que, imediatamente, agirá sobre a válvula.

Observação

O controlador de temperatura é chamado "primário" (master ou mestre), enquanto o controlador de vazão é chamado "secundário" (slave ou escravo).

Controle de razão (ratio control)

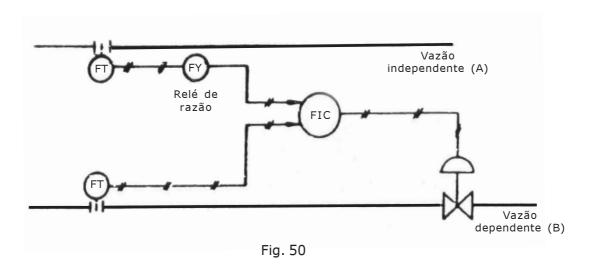
Em muitos processos há necessidade de se manter a vazão de um produto em proporção exata em relação à vazão de outro produto. Um sistema de controle de razão permite obter esse resultado. Sistemas de controle são empregados primariamente em mistura de ingredientes de um produto, ou como controle de alimentação de um reator químico.



Uma das vazões pode ser considerada independente, enquanto a outra será dependente.

Vejamos o exemplo a seguir.

Combinar a vazão de A com a vazão de B numa determinada razão.



O esquema mostrado é o método mais comum, em que o sinal do transmissor da vazão independente é levado a um relé de razão, ou relé de relação, no qual é multiplicado por um fator (ajustado manualmente). O sinal de saída constitui o ponto de ajuste do controlador de vazão da variável dependente.

Um bom exemplo de um processo típico para a utilização de um controle de vazão é a adição de chumbo tetraetila à gasolina, para a manutenção da octanagem da mesma, uma vez que o índice de octanas é função da razão mantida entre as quantidades de chumbo tetractila e de gasolina.

Um outro exemplo de controle de vazão é a mistura de dois fluidos, frio e quente, para obterse, na saída, uma determinada temperatura da mistura. Neste caso, há que se ter uma razão bem determinada entre as razões dos dois fluidos (Q_f e Q_q), para que se garanta a temperatura desejada da mistura. O esquema de controle, neste caso, é mostrado na Figura 51.

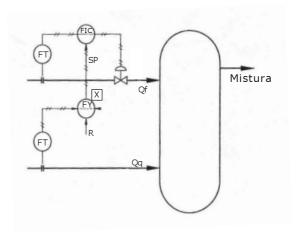


Fig. 51 – Controle de razão Q₁/Q_q num processo de mistura

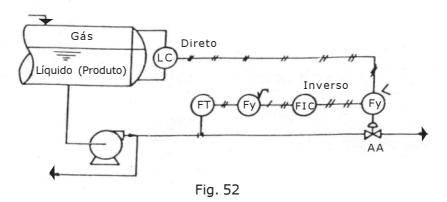


Controle override (controle seletivo)

Em sistemas de controle de processo, muitas vezes se torna desejável limitar uma variável de processo em um valor (alto ou baixo), para se evitarem danos ao processo ou a equipamentos. Isso se obtém com o auxílio de relés seletores de sinal (alto ou baixo).

Enquanto a variável está dentro dos limites preestabelecidos, o funcionamento do sistema é normal. Quando o valor da variável ultrapassa um desses limites, o sistema realiza ações determinadas.

Vejamos a Figura 52, a seguir.



No esquema apresentado, o seletor de sinal baixo (relé "passa baixo") recebe sinal do FIC e do LC, seleciona o menor dos dois sinais e o envia para a válvula de controle.

Em condições normais, a vazão é controlada pelo FIC. No caso, porém, da queda do nível no vaso, o comando da válvula passa para o LC, através do relé seletor de sinal baixo, restringindo a vazão até que o nível se recupere.

Um exemplo de controle seletivo pode ser visto na Figura 53, na qual o sistema de controle protege um reator contra sobrepressão, reduzindo-se a entrada de calor no sistema.

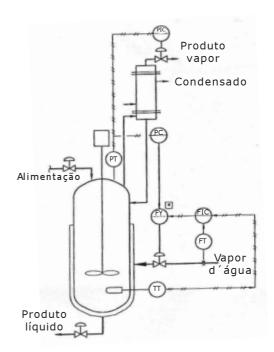


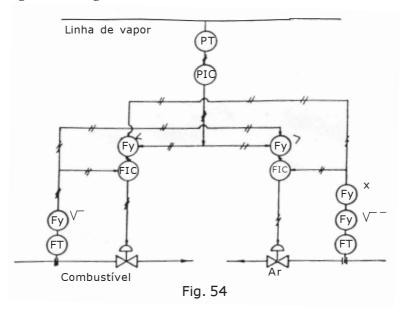
Fig. 53 - Controle seletivo: pressão alta comanda o desvio do controle do vapor



Controle de limites cruzados

O controle de limites cruzados é usado, por exemplo, no controle de combustão em caldeiras. Nesse sistema de controle são utilizados dois relés seletores, sendo um seletor de sinal baixo e outro de sinal alto.

Observe a Figura 54, a seguir.



Na Figura 54, a variável principal é a pressão de vapor que deve ser mantida constante. O sinal de saída do controlador de pressão é levado a um relé seletor de sinal alto e a um relé seletor de sinal baixo. Esses seletores recebem também, respectivamente, sinais de vazão de óleo combustível e ar. Note que o sinal de vazão de ar é multiplicado por uma constante mediante um relé de razão, para manter a relação ar x combustível.

Os sinais recebidos pelos relés seletores serão iguais, quando o sistema estiver estabilizado e operando nas condições especificadas.

Caso ocorra um aumento de consumo de vapor, a pressão diminuirá, fazendo com que o sinal de saída do PIC aumente; esse aumento não será sentido pelo controlador de fluxo de combustível, pois a saída do seletor de sinal baixo continuará a mesma. O controlador de fluxo de ar sentirá imediatamente esse aumento, pois a saída do seletor de alta passará a ser o sinal do PIC. Com isso, haverá um aumento imediato do fluxo de ar. À medida que a vazão de ar for aumentando, a saída do seletor de baixa aumentará igualmente, com um conseqüente aumento da vazão de combustível. Isso acontecerá até que o sistema se equilibre na nova situação de consumo. Vê-se então que, no caso de um aumento do consumo de vapor, haverá, inicialmente, um aumento da vazão de ar e, a seguir, de combustível. A vazão de combustível só será aumentada após o aumento da vazão de ar. Durante a transição, o ponto de ajuste da vazão de combustível será dado pelo transmissor de fluxo de ar.



Se ocorrer uma diminuição do consumo de vapor, a pressão aumentará, fazendo com que a saída do PIC diminua. Essa diminuição não será sentida pelo controlador de fluxo de ar, pois a saída do seletor de sinal alto continuará a mesma. O controlador de fluxo de combustível sentirá imediatamente essa diminuição, pois a saída do seletor de baixa passará a ser o sinal do PIC. Com isso, haverá uma diminuição imediata da vazão de combustível. À medida que a vazão de combustível for diminuindo, a saída do seletor de alta diminuirá igualmente, com uma conseqüente diminuição da vazão de ar, e isso acontecerá até que o sistema se equilibre na nova situação de consumo. Vê-se então que, no caso de uma diminuição do consumo do vapor, haverá, inicialmente, uma diminuição da vazão de combustível e, a seguir, a de ar. A vazão de ar só será diminuída após a diminuição da vazão de combustível. Durante a transição, o ponto de ajuste da vazão de ar será dado pelo transmissor de fluxo de combustível.

Observação

Nesse sistema de controle, o controlador de pressão comanda a malha enquanto se está em regime; durante as transições, uma das malhas de fluxo comanda a outra.

Resposta gráfica de um sistema de controle

A maioria dos processos industriais opera de tal modo que, quando ocorre um distúrbio, eles voltam ao novo estado de equilíbrio.

No entanto, quando ligamos instrumentos e o processo, dentro de um sistema de controle, com o objetivo de manter uma variável do processo num nível desejado, existe sempre a possibilidade de que a ação do controle aplicada não faça retornar a variável controlada ao valor desejado.

Ação de controle em excesso provoca "oscilação" na variável controlada e, possivelmente, ocasionaria uma saída do processo fora dos limites de operação segura. Em contrapartida, pouca ação de controle tende a provocar uma resposta muito lenta na variável controlada.

A quantidade correta da ação de controle é aquela que induz a variável controlada a se aproximar gradativamente do *set point* num intervalo de tempo razoável.

Assim, o objetivo essencial de um sistema de controle é que ele seja "estável", isto é, ele deve retornar a um estado de repouso após um distúrbio que tenha recebido.

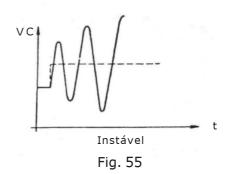
O comportamento de variável controlada, em resposta a um distúrbio no sistema de controle, demonstra a estabilidade do controle.

Dependendo da quantidade de ação de controle aplicada, cinco tipos diferentes de resposta da variável controlada podem ser produzidos.



Instável

A Figura 55 mostra que há um aumento gradual no desvio da variável controlada. Portanto, o ajuste que provoca essa resposta deve ser evitado, pois leva o sistema a uma instabilidade.



Oscilação contínua

O sistema está "criticamente estável". Tem eficiência limitada como um *on off*. Pode ser tolerado em alguns processos.



Fig. 56

Estável e subamortecida

O sistema estabiliza num tempo menor que a superamortecida, mas ultrapassa algumas vezes o *set point*, com oscilações decrescentes, até parar.

Cabe ressaltar que, para minimizar a quantidade de produto fora de especificação, deve-se adotar um critério de "melhor resposta", escolhendo entre o tempo que leva para alcançar o novo valor estacionário e o pico máximo permissível.

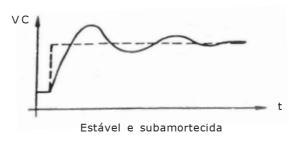
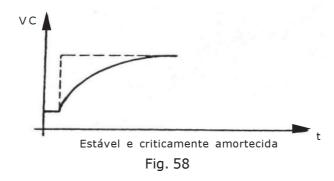


Fig. 57



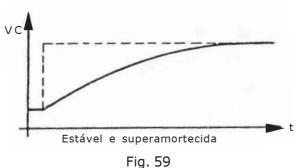
Estável e criticamente amortecida

Os sistemas se estabilizam num tempo mínimo e sem oscilações. Esta é a situação ideal, porém difícil de ser conseguida na prática.

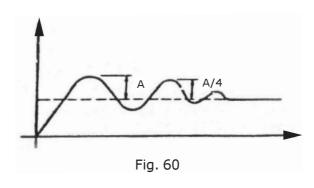


Estável e superamortecida

O sistema não oscila, mas pode requerer um tempo muito longo para que seja alcançado o novo estado de equilíbrio. A curva demonstra que há uma correção muito fraca por parte do controlador. Se o produto final não fugir das especificações com esses valores baixos, o sistema será aceitável.



Na prática, devido às incertezas da operação do processo e à tendência a se garantir contra uma instabilidade, a maioria dos processos é operada com algum pico inicial e uma pequena oscilação com atenuação rápida. Este fato dá origem ao nome de resposta denominada "decaimento de 1/4". Isto é, cada amplitude de pico é 1/4 da amplitude anterior.





Observação

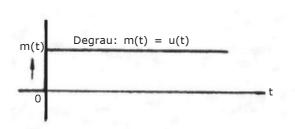
Em geral, podem-se ajustar as "ações de controle" para obter a estabilidade de controle desejada. Muitas oscilações indicam "correção excessiva" (FP muito pequena, taxa de reset, reset rate, muito alta, ou às vezes tempo derivativo, rate time, alto). Uma resposta bem lenta, sem oscilações, indica "correção fraca" (FP alta, taxa de reset lenta, ou tempo derivativo insuficiente). O procedimento utilizado para determinação de ajuste individual das ações de controle será visto a seguir.

Ajustes dos controladores automáticos (otimização ou sintonia)

A qualidade do controle obtido por um sistema de controle automático depende muito do ajuste de suas ações.

Para obter o melhor controle, deve-se usar um método sistemático de ajuste, já que os ajustes por tentativas ao acaso levariam muito tempo, devido ao grande número de combinações possíveis, e raramente dariam bom resultado.

A avaliação de *performance* de uma regulagem é feita considerando-se os fatores ilustrados na curva de resposta. Veja a Figura 61.



Onde:

 $C_{p} = \textit{overshoot}$ máximo em % do valor final $t_{p} = tempo$ correspondente ao overshoot máximo

to = tempo em que a variável controlada corta o eixo correspondente ao valor final pela primeira vez

t₈ = tempo de estabilização (tempo necessário para que a variável controlada fique dentro da tolerância)

 $E_0 = offset$ (se existir)

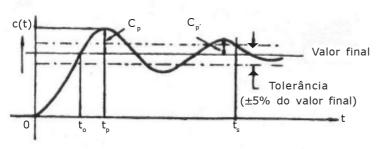


Fig. 61



Cabe ressaltar que pessoas com muita prática não seguiriam um método sistemático; elas saberiam interpretar as respostas para chegar ao melhor ajuste em pouco tempo.

Os métodos descritos a seguir são os mais utilizados e permitem obter ajustes adequados para a maior parte das aplicações.

Métodos Sensibilidade limite

Curva de reação

Tentativa sistemática

Método sensibilidade limite (método de Ziegler e Nichols)

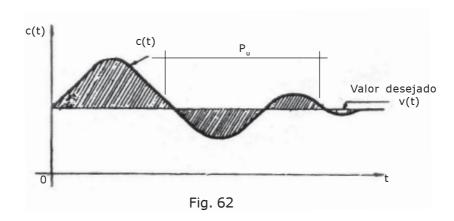
Este método possibilita o ajuste do controlador através de dados obtidos por um teste em malha fechada.

Consiste em fazer a malha fechada oscilar continuamente com amplitudes constantes e daí obter dois parâmetros: ganho limite e período limite, que serão utilizados no ajuste.

Já verificamos que um ganho muito pequeno resultará numa resposta de controle muito lenta, e um ganho muito alto produzirá oscilações que podem aumentar em amplitude e exceder limites de operação segura. Entre esses dois extremos temos um ganho que produzirá oscilações com amplitudes constantes. Este ganho é o "ganho limite" ou "sensibilidade de limite" ou, ainda, "ganho último".

O período do Ciclo (P,) é tirado do registro da variável controlada.

Para se obterem esses parâmetros, procede-se da seguinte maneira:



1. Com o controlador em automático, retire toda a ação integral (taxa = 0 ou T, = co) e toda ação derivativa ($T_d = 0$), caso haja qualquer dessas ações.



- 2. Ajustar o valor do ganho para um valor baixo (ou faixa proporcional para um valor alto).
- 3. Introduzir uma pequena variação no *set point* e observar o comportamento da variável controlada.
- 4. Em seguida, vai-se aumentando o ganho, observando sempre o comportamento da variável controlada após cada alteração no *set point*.
- 5. Quando o processo entrar em oscilação contínua, como mostra a Figura 62, anotar o valor desse ganho "último" (ou FP "último") e, caso haja ação integral e/ou derivativa, também o período P_u dessas oscilações.

Os ajustes do controlador que irão produzir uma taxa de amortecimento de 1/4 são calculados como se segue.

1. Controlador proporcional

$$FP (\%) = 2 FP_{ij} (ou K = 0.5 K_{ij})$$

2. Controlador proporcional + integral

$$FP (\%) = 2.2 FP_{u} (ou K = 0.45 K_{u})$$

$$\frac{1}{T_i} = \frac{1.2}{P_u}$$
 (rep/min) ou $T_i = \frac{P_u}{1.2}$ (min.)

3. Controlador proporcional + integral + derivativo

$$FP (\%) = 1.6 FP_u (ou K = 0.6 K_u)$$

$$\frac{1}{T_i} = \frac{2}{P_u}$$
 (rep/min) ou $T_i = \frac{P_u}{2}$

$$T_d = \underline{P_u} (min)$$

Observação

As fórmulas dadas são baseadas na experiência obtida do estudo de uma grande variedade de processos. Poderão produzir um ajuste "ótimo", mas podem ser usadas como uma primeira estimativa. Um refinamento maior do ajuste é feito na base da tentativa ou pela habilidade de saber interpretar a resposta gráfica.



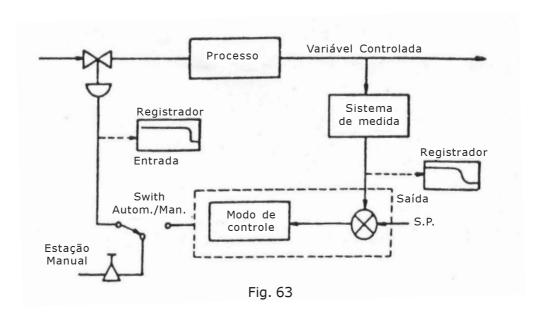
Método da curva de reação

Este método de ajuste envolve a determinação experimental da resposta do sistema em malha aberta.

O procedimento é abrir a malha de controle e criar uma mudança pequena e repentina, isto é, em degrau, na entrada do processo (através do elemento final do controle).

A partir da forma da curva de reação, são obtidas duas características deste processo, das quais poderão ser deduzidos os ajustes.

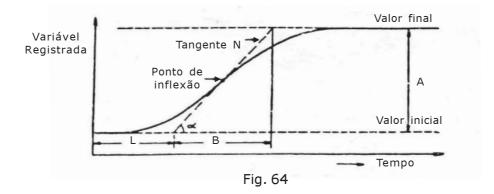
O esquema geral é visto na Figura 63.



Procedimento

- 1. Com o sistema em estado de regime, abre-se a malha antes do elemento final de controle. Em outras palavras, passa-se o controlador para operação manual.
- 2. Provoca-se uma pequena perturbação, em degrau, na entrada do processo, ou seja, aumenta-se bruscamente o sinal para a válvula. A amplitude da perturbação ($\triangle p$) deve ser registrada, para cálculo posterior do ajuste.
- 3. Registra-se a resposta da variável controlada, isto é, a resposta gráfica do processo. É bom que se tenha um registrador com velocidade de carta variável, colocando a velocidade mais rápida para melhor precisão.
- 4. Uma vez obtida a resposta gráfica, pode-se fechar novamente a malha, retornando a saída do controlador ao seu valor anterior ao distúrbio e colocando-o novamente em automático. A resposta do processo terá, geralmente, uma forma de "S", mostrada a seguir:





Esta curva é denominada de "curva de reação do processo". Ela representa a resposta característica da combinação de todos os componentes do sistema, exceto o controlador. O procedimento para "encaixar" o controlador ao processo é baseado em fórmulas empíricas, obtidas do estudo de ajuste de controladores para uma variedade de processos reais (Ziegler e Nichols).

Primeiramente, a curva é aproximada por dois parâmetros característicos obtidos do gráfico:

- 1. Taxa de reação N (velocidade de reação).
- 2. Atraso de tempo L.

Estes valores são usados, em seguida, nas fórmulas, para obter o ajuste do controlador, necessário para produzir resposta de amplitude 1/4.

A taxa de reação N é calculada pela reação:

$$N = tg \alpha = \frac{dist. A}{dist. B} = \frac{\% da variação da variável}{intervalo de tempo da tg}$$

O tempo L em minutos é o tempo entre a introdução da variação tipo degrau e o ponto em que a tangente cruza o valor inicial da variável controlada.

A magnitude da perturbação \triangle p é expressa em % da variação do sinal que vai para a válvula. Com esses dados, temos as fórmulas de ajuste:

1. controlador proporcional:

$$FP (\%) = \frac{100NL}{\triangle p}$$



2. controlador proporcional + integral

$$FP (\%) = \frac{110NL}{\triangle p}$$

$$\frac{1}{T_i} = \frac{0.3}{L} \text{ (rep/min) ou } T_i = 3.3L \text{ (min)}$$

3. controlador proporcional + integral + derivativo

FP (%) =
$$\frac{83\text{NL}}{\triangle p}$$

 $\frac{1}{\text{T}_i} = \frac{0.5}{\text{L}}$ (rep/min) ou $\text{T}_i = 2\text{L}$ (min)
 $\text{T}_d = 0.5\text{L}$ (min)

Tecnologias afins ao controle de processo

Embora toda tecnologia vista nesta unidade tenha ainda uma vida longa, por ser a base de todo o processo produtivo, existem, atualmente, tecnologias mais evoluídas que complementam o que foi visto.

O aprofundamento de cada item que será agora apresentado deve ser objeto de um outro curso.

Nesta unidade, a inclusão de tais conteúdos tem a finalidade de mostrar o que existe de novidade em relação à transmissão e no tratamento dos dados.



CLP

Ainda no início da década de 1960, o *hardware* do controle seqüencial era dominado principalmente pelos relés, e a utilização desta técnica apresentava, entre outras, as seguintes desvantagens:

- necessidade de instalação de inúmeros relés, execução de fiação entre os inúmeros terminais de contatos e de bobinas; e
- complexidade na introdução de alteração na seqüência.

No final da década de 1960, iniciou-se o desenvolvimento de microcomputadores, utilizando-se o circuito integrado (CI), e isso gerou uma enorme expectativa quanto ao surgimento de um *hardware* para controle, dotado de grande versatilidade de processamento. A partir de 1969, foi lançado, por meio de diversas empresas americanas, uma série de produtos denominados *PLC* (*Programmable Logic Controller*) ou *CLP* (*Controlador Lógico Programável*), mudando significativamente o conceito de projeto de equipamentos na área de automação e trazendo uma grande melhoria para a área de instrumentação.

O Controlador Lógico Programável é um equipamento de controle industrial microprocessado, criado inicialmente para efetuar o controle lógico de variáveis discretas e atualmente usado para quase todos os tipos de controle.

Finalidade

O CLP foi projetado para substituir a lógica de relés de um circuito lógico seqüencial ou combinacional para controle industrial. Ele funciona seqüencialmente; recebe os sinais em suas entradas, operando a lógica de seu programa, e gera os sinais em suas saídas. O usuário carrega o programa, geralmente via *software*, que produz os resultados desejados.

Aplicações atuais

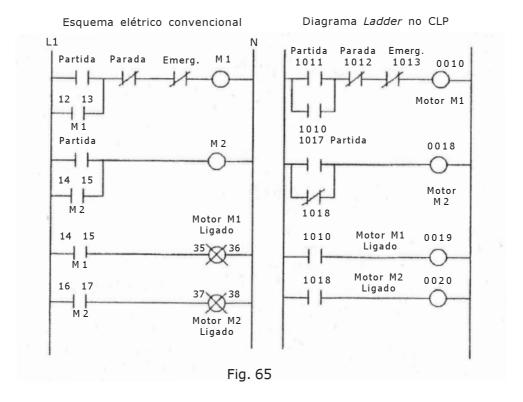
A evolução tecnológica acelerada, neste segmento, permitiu que o CLP assumisse outras funções que anteriormente não lhe eram destinadas, como o controle de variáveis analógicas, tráfego de informações do chão de fábrica, geração de relatórios, preparação de dados para interface homem-máquina. Embora tenha sua grande aplicação em processos industriais contínuos, seu uso é igualmente importante nos processos em bateladas e onde as variações da produção precisam ser modificadas freqüentemente. A gama de aplicações do CLP tem aumentado, e ele foi introduzido em vários segmentos, nos quais se necessita do controle de variáveis discretas, tais



como em projetos de máquinas a CNC (Comando Numérico Computadorizado), usado nas indústrias de manufatura. Outra aplicação recente e já em grande fase de expansão é o controle dos chamados "Prédios Inteligentes" (Automação Predial e Residencial), nos quais os custos reduzidos, aliados à elevada confiabilidade, têm sido bastante atrativos para as empresas deste ramo. Atualmente em qualquer aplicação na qual se requer algum tipo de controle elétrico, possivelmente o uso do CLP estará sempre presente.

A origem da linguagem de histograma de contatos

Os primeiros CLPs tinham como principal função substituir os grandes armários de lógica a relés. Esta técnica foi largamente empregada e serviu como fonte inspiradora para o surgimento da primeira linguagem de programação desenvolvida, chamada de Histograma de Contatos ou Diagrama de Escada (*Ladder Diagram*), semelhante aos esquemas elétricos projetados pelos eletricistas que montavam e reparavam os gabinetes de lógica a relés.



Analisando o diagrama, observamos que os condutores M1 e M2 têm seus bornes numerados (12, 13, 14, 15, 16 e 17); já os correspondentes pontos de entrada no CLP se referem às saídas 0010 e 0018. O mesmo endereço, como no exemplo mostrado, pode ser usado tanto para a retenção do relé quanto para acionar a luz-piloto nas linhas mais abaixo, e para outras funções necessárias. Visto que não se trata de uma entrada física, mas de um *bit* lógico, podemos usá-lo várias vezes dentro do mesmo programa, sempre que quisermos saber o estado de M1 e M2.



Sistema supervisório, utilizando CLP

O sistema supervisório instalado no microcomputador faz aquisição de dados no controlador programável, transferindo para a tela do monitor os dados do processo. Através do teclado do microcomputador pode-se acessar o controlador, para alterar parâmetros de controle ou simplesmente buscar novas informações. Ele permite uma total integração com o chão de fábrica, graças à popularização das redes industriais.

Todo sistema supervisório deve permitir a configuração de telas que facilitam a operação. Algumas dessas telas têm suas funções descritas a seguir.

• Tela de vista geral

Apresenta os set points e os desvios, podendo ser constituída de várias páginas.

• Tela de grupo

Apresenta informações sobre pontos em grupos de funções, com os mesmos detalhes dos visores de instrumentos analógicos.

• Tela de vista geral

Visualização de um grupo em particular, selecionado.

• Telas de malhas

Apresentam uma representação gráfica da malha em detalhe. Nelas pode-se visualizar e/ou alterar as principais variáveis da malha.

• Telas de alarme

Mostram ao operador as principais anomalias do processo e/ou do sistema.

• Telas de tendências

Tempo real: registra a mudança dos valores das variáveis, num intervalo de tempo reduzido. Histórica: registra a mudança dos valores das variáveis, num intervalo de tempo grande (dias, semanas etc).

A seguir, apresentamos o diagrama de blocos de um PLC.



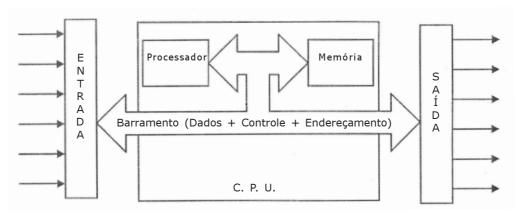


Fig. 66

Algumas limitações de aplicações para CLPs

Algumas aplicações específicas levam o CLP a um regime de trabalho bastante pesado e, às vezes, impossível de suportar.

- Uma das limitações de um CLP é a velocidade da CPU, que, embora seja atualmente bastante elevada, não permite uma resposta suficientemente rápida; por exemplo, no controle de compressores.
- Às vezes, em algum ciclo de trabalho é necessário que empreguemos alguns artifícios de programação nem sempre disponíveis no CLP, reduzindo, assim, sua disponibilidade em certas aplicações. Neste tipo de aplicação, ainda é comum se recorrerem a controladores digitais dedicados para as variáveis analógicas.
- Nos casos em que a própria lógica demanda uma resposta muito rápida, pode-se optar pela lógica fixa, que, por não respeitar um ciclo de varredura, como o CLP, pode agir tão rapidamente quanto o tempo de resposta que seus circuitos permitam.
- Alguns usuários se esquecem de que os CLPs não são computadores de uso geral e, portanto, sua capacidade de computação é bem mais limitada. Isto acontece quando tentamos fazê-los executar algoritmos matemáticos pesados, como, por exemplo, a otimização do controle de processo, o que pode sobrecarregá-los, podendo tornar o controle inviável ou antieconômico. É melhor usar um micro para os cálculos e conectá-lo ao CLP que, então, executa realmente o controle.
- Quando uma aplicação exigir uma aquisição de dados elevada, é melhor passar os dados do CLP para o micro, no qual pode residir até uma planilha eletrônica completa, capaz de "dirigir" a massa de dados e calcular os valores de que o usuário precisa, já formatados adequadamente para sua aquisição.



Tendências atuais

De uma maneira geral, após a compra do CLP o usuário recebe do fabricante algum treinamento em programação e a partir daí deve fazer seu programa, desenvolver ou comprar uma interface homem-máquina, ou terceirizar este tipo de serviço por empresas especializadas. Atualmente, a maioria das empresas procura fabricantes que se responsabilizem por todo o funcionamento do sistema: especificar e fornecer o CLP, o(s) micro(s), o(s) programa(s), participação dos testes de aceitação do equipamento, do sistema configurado, dar suporte de treinamento e operação. Resumindo, procura-se alguém que integre todo o sistema.

SDCD e redes de comunicação

O Sistema Digital de Controle Distribuído (SDCD) é um sistema de controle industrial microprocessado, criado com a finalidade de efetuar o controle das variáveis analógicas. Com o tempo ele foi expandindo suas aplicações até absorver praticamente todas as aplicações de controle usuais, incluindo-se aí as variáveis discretas, o controle de bateladas, controle estatístico de processo, geração de relatórios etc.

Finalidade

O SDCD foi desenvolvido para substituir os controladores analógicos usados no controle de processos industriais e também permitir aos operadores uma melhor visualização da operação na unidade, podendo controlá-la melhor. Na composição de um SDCD podemos distinguir três elementos básicos: a interface com o processo (integrando os controladores e unidades de aquisição de dados), a Interface-Homem-Máquina (I-H-M) e a via de dados (*data highway*) que interliga as primeiras.

Algumas das definições mais usuais de SDCD consideram o fato de que uma máquina (dispositivo microprocessado) é responsável pela ação de controle, enquanto outra é responsável pela interface como o operador humano. Na visão funcional, considera-se que em um SDCD um processador se conecta com o processo industrial, enquanto outro processador se conecta com o operador. Por esta definição, basta que os dois processadores sejam distintos para se ter um SDCD.



A interface com o processo

Em relação ao controle, SDCD tem como tarefa fazer tudo que os controladores eletrônicos tradicionais faziam. Por sua natureza digital, permitiu uma interface com computadores, o que amplia sua capacidade para um controle avançado, otimização, aquisição de dados, controle estatístico de processo etc.

Em várias instalações, alguns projetistas optam por colocar os controladores próximos à Estação de Operação, apenas por disponibilidade de espaço. Em outras, a localização dos controladores e outras interfaces com o processo pode ficar bem mais próxima do campo, enquanto a localização das Estações de Operação pode ser feita de forma bem mais racional, desprezando-se o critério tradicional de economizar no custo da fiação.

Podemos citar, como marco histórico, que o primeiro SDCD do mercado foi concebido, projetado, montado, configurado e distribuído pela Honeywell e chamava-se TDC-2000 (de Total Distributed Control).

Este equipamento tinha um controlador que era capaz de controlar 8 malhas, com 4 a 20 mA na entrada. Neste controlador, havia uma quantidade de cartões para termopares e outros sensores e transmissores industriais.

O registro da variável era feito através da entrada do sinal em uma PIU (Process Interface Unit). A variável controlada e registrada deveria ser ligada fisicamente à entrada de dois módulos eletrônicos distintos, sendo um controlador e o outro para aquisição de dados.

Configurando um SDCD

Quando adquirimos um SDCD, este já é fornecido com uma série de instruções préprogramadas, com as principais funções de que um usuário pode precisar em uma aplicação específica. Estas instruções são compostas de vários algoritmos usados em controle de aquisição de dados, de montagem das telas de visão geral, tela de grupos de malhas e telas de malhas individuais, de alarme, de registro etc.

No momento em que o usuário introduz no SDCD as instruções ligadas à sua aplicação específica, como, por exemplo, endereços de entradas e saídas, fatores relativos ao ganho proporcional, integral e derivativo etc., tais informações são armazenadas na estação de controle, em sua base de dados. A inexistência de ligação feita entre os dois dispositivos de controle PID torna-se uma grande vantagem do sistema, já que estes são interligados por software, através da configuração.

Na etapa da configuração do sistema, o usuário deve definir dentre as muitas opções existentes (alarmes, registros, controle, telas gráficas etc.) qual delas serão usadas para cada malha. No controlador da malha, encontra-se a parte da configuração referente ao tratamento da informação para fins de controle; na estação de operação, temos a parte referente à interface com o operador.



Para entrarmos com os dados da configuração no SDCD, utilizamos formulários, preenchendo os espaços em branco com os parâmetros de configuração (parâmetros de controle, o *tag* parâmetros do instrumento, endereços de entradas e saídas etc.) de cada malha, nas telas de configuração do sistema.

Temos observado, com a evolução dos SDCDs, uma grande melhoria na forma de configuração gráfica, em que os blocos de funções são trazidos para uma tela e interligados de forma análoga a um fluxograma de engenharia. Neste tipo de programa de configuração, grande parte do volume de trabalho é semelhante à tarefa de um desenhista de CAD (Projeto Assistido por Computador), usando os blocos predefinidos e memorizados em uma biblioteca. Existem várias ferramentas que auxiliam o usuário durante a configuração, que vai desde telas de *help* até a verificação dos comandos introduzidos. Caso estes sejam inadequados, além de rejeitados, recebe-se uma mensagem de erro do processador para orientar o programador.

Redes industriais de comunicação e de controle

Em uma planta de processo moderna, temos muitos dispositivos e equipamentos (controladores lógicos programáveis, sistemas digitais de controle distribuído, computadores de gerência, de projeto, sensores e transmissores, atuadores etc.) que podem estar colocados dentro do mesmo ambiente e conectados entre si.

O desenvolvimento das redes industriais tem o objetivo de unir todos estes dispositivos, objetivando, assim, uma interação funcional que vise ao melhor rendimento e possibilite a implementação de novas oportunidades.

Dentre suas maiores vantagens, podemos citar:

- 1. gestão do processo de produção;
- 2. rapidez e eficiência na aquisição de dados do processo;
- 3. melhoria do rendimento do processo;
- 4. maior troca de dados vindos do processo entre setores e departamentos distintos, com maior velocidade: e
- programação a longa distância, eliminando o tempo gasto em deslocamento até o chão de fábrica.

Fieldbus (Fieldbus Foundation - ISA SP-50)

O *Fieldbus* é um sistema de comunicação bidirecional, totalmente digital, serial, que interliga equipamentos de medição e controle, tais como sensores, atuadores e controladores. Em um nível básico pode ser utilizado como rede local tipo LAN (Local Área Network), para instrumentos usados em aplicações de controle de processos, e automação da manufatura.



Tem como função distribuir a aplicação de controle ao longo da rede. Seus blocos funcionais, juntamente com a descrição funcional, fazem com que estes desempenhem a função de controlador.

O *Fieldbus* baseia-se, no nível físico, no padrão *Profibus*-PA (rede concebida para automação de processos que permite que sensores, atuadores e controladores sejam conectados a um barramento comum). Ele incorpora, na camada do usuário, os chamados Blocos de Descrições de Dispositivos (*Device Description Blocks*) que permitem aos instrumentos de diferentes fabricantes serem conectados de maneira simples, harmônica e padronizada, gerando, assim, malhas abertas para a aquisição de dados, ou fechadas, para controle, que funcionam de maneira autônoma, independente da sala de controle. Ao conectar um novo dispositivo a uma rede *Fieldbus*, de maneira semelhante ao sistema operacional *windows-plug and play*, este, automaticamente, disponibiliza na rede muitas informações referentes às suas características intrínsecas e facilita ao operador sua configuração *on-line*, mesmo com o processo em operação.

A tecnologia *Fieldbus* permite a armazenagem no dispositivo de campo de informações que ajudam a identificá-lo, e algumas informações/variáveis (caracterização de vazão ou curva de compensação de temperatura etc.) podem ser configuradas remotamente.

Através de diagnósticos avançados o usuário pode detectar condições anormais de funcionamento e diagnosticar algumas falhas em seu início, antes de se tornarem catastróficas.

As limitações existentes nas arquiteturas de controle centralizado na sala de controle contribuem para gerar uma demanda dos usuários finais da manufatura, pela tecnologia *Fieldbus*, pois estes ansiavam por controle realmente distribuído no campo. A grande variedade de equipamentos e fornecedores de controle e instrumentação gera nos usuários finais o interesse por uma padronização de funcionamento e, ultimamente, observa-se uma grande preocupação na busca de um único padrão internacional de barramento de campo.

Além de uma redução de 40% a 60% nos custos de instalação, quando comparados a um SDCD convencional gerados pela diminuição na fiação, caixas de passagem etc., podemos citar algumas outras vantagens econômicas:

- economia na engenharia dos desenhos de diagramas de malhas, funcionais, listas de cabos e de terminais;
- redução da mão-de-obra da instalação;
- redução nos testes funcionais da instalação;
- redução no tempo necessário à calibração e partida;
- possibilidade de se fazer parte da configuração em modo *off-line* (isto acontece antes da instalação física dos instrumentos no campo). Esta facilidade reduz o tempo gasto entre a instalação e a partida da unidade; e
- possibilidade de um único transmissor enviar outras variáveis.



A maior contribuição gerada pelo padrão *Fieldbus* deve-se ao fato de que um instrumento, cuja finalidade inicial era transmitir o valor medido de uma variável de processo como uso dos microprocessadores, permitiu-se processar o algoritmo de controle, o que possibilita transmitir diretamente para a válvula de controle o sinal de saída do controlador.

Com o uso desta tecnologia, a sala de controle passa a trabalhar apenas nas funções de interface homem-máquina, pois o transmissor transforma-se em um transmissor controlador, eliminando a necessidade de se adquirir e instalar um controlador na sala de controle, e torna a malha de controle fechada no campo.

Antes uma malha de controle tinha um transmissor, um controlador e uma válvula. Hoje, com dispositivo *Fieldbus*, pode ser feita apenas com o transmissor e a válvula. A função de controle está inclusa no microprocessador existente no próprio transmissor, na válvula ou em qualquer outro dispositivo ligado à rede.

Por tudo que foi exposto, observamos que estamos diante de um sistema de controle bem distribuído e bastante versátil e que tem se tornado uma das tendências mais modernas na área de instrumentação.

O uso de fibra ótica em redes industriais

No ambiente industrial temos a geração de elevados ruídos elétricos e eletromagnéticos que causam interferências indesejáveis e prejudicam a instrumentação de controle de processo. O meio mais comum para diminuir a interferência é o uso de cabos blindados; porém, em alguns casos em que esta estratégia não é suficiente, podemos empregar as fibras óticas.

Os sistemas de comunicação com fibra ótica usam impulsos luminosos, em vez de sinais elétricos, para transmitir os sinais.

As fibras se excitam com diodos fotoemissores, ou *laser*, no espectro infravermelho, produzindo um feixe de luz que transporta a informação até a outra extremidade da fibra, e a recuperação do sinal elétrico se dá através de um fotodiodo ou fototransistor.

O uso de fibra ótica como meio para a propagação do sinal traz alguns benefícios, tais como:

- não é afetado pelo ruído magnético, elétrico e eletromagnético;
- é imune a transitórios de tensão elétrica;
- não é afetado por diferenças de potencial no aterramento em diferentes pontos da planta;
- tem maior velocidade de transmissão em relação aos cabos blindados ou coaxiais; e
- tem largura de banda muito grande.



Quando se usa fibra ótica, os problemas mais comuns são:

- as distâncias a serem consideradas no projeto dependem do material empregado em sua fabricação, bem como da qualidade e quantidade dos conectores em cada ramo;
- ela pode ser considerada, ainda, como uma tecnologia cara;
- são necessárias mão-de-obra e ferramentas especializadas para instalação e manutenção.

Os cabos de fibra ótica geralmente são constituídos por vários condutores óticos. Cada condutor tem uma seção muito pequena (alguns mícrons) e é formado por:

- um núcleo de quartzo ou material plástico sintético; e
- um revestimento composto de quartzo ou plástico, de índice de refração mais baixo do que o núcleo.

Profibus

Profibus é um protocolo de sistema aberto com a padronização inserida em um conceito bastante abrangente e por isso empregada em uma larga escala de aplicações dentro da área de manufatura ou de processos.

Esta família foi desenvolvida em 1994, para permitir a comunicação entre os sistemas de controle (controladores) e os elementos de campo através da configuração mestre x escravo. O sistema pode ser configurado como monomaster (apenas um mestre) ou multimaster (com vários mestres). Neste último, as entradas podem ser lidas por todos os mestres, e cada um aciona apenas suas respectivas saídas. A topologia utilizada é em linha, empregando o par trançado ou fibra óptica como meio físico. A transmissão dos dados é feita através de RS-485 e a taxa de transmissão está relacionada com a distância do cabo [9,6 kbit/s(r) 1.200m, 500 kbit/s(r) 400m, 12.000kbit/s(r) 100m, por exemplo]. O sistema comporta 32 estações sem o uso de repetidores e até 127 estações com a utilização de repetidores. Quando do término do meio físico da rede, a mesma necessita da colocação de um terminador de rede (resistor de terminação), responsável por garantir a imunidade a ruídos e determinar o final da rede.

O padrão *Profibus* subdivide-se em três famílias:

- Profibus-DP (Decentralized Periphery) periféricos descentralizados;
- Profibus-FMS (Fildbus Message Specification) especificação de mensagens em barramentos de campo; e
- Profibus PA (Process Automation) processos de automação.



Profibus-DP

Sua aplicação está voltada quase que exclusivamente para a área de fabricação. Tem como principal característica a possibilidade de poder operar em altas velocidades na transferência de dados. Apresenta grande aplicação ao chão de fabricação, visto que promove a conexão com dispositivos de campo (periféricos) de forma distribuída.

Permite interface de conexão RS485 e fibra ótica. Seu barramento é projetado de tal forma a poder suportar até 32 estações sem uso de repetidores de linha.

Profibus-FMS

Suas características são semelhantes à família DP e é destinado à automação em dispositivos gerais. Possui grande flexibilidade, sendo utilizado em tarefas de comunicação complexas e extensas.

Profibus-PA

Nesta família é permitido que sensores e atuadores sejam conectados em um par de fios comuns, mantendo a segurança intrínseca dos elementos requerida pelo processo. Foi desenvolvida de acordo com a norma IEC 1158-2 e é utilizada na automação e no controle de processos contínuos, principalmente no setor químico e petroquímico. A transmissão é baseada nos seguintes princípios:

- cada segmento possui apenas uma fonte de alimentação;
- quando a estação está mandando dados, não existe energia no barramento;
- todo equipamento possui um consumo constante de corrente;
- são permitidas as topologias em linha, estrela ou árvore;
- para aumentar a confiabilidade, segmentos de rede redundantes podem ser disponibilizados.



Praticando

- 1. Qual é a diferença entre variável do processo (VP) e variável manipulada (MV)?
- 2. Como pode ser classificado um controle em relação à sua ação?
- 3. Conceitue:
- a) Controle manual
- b) Controle automático
- 4. Quais as características, inerentes a cada processo, que determinam atrasos na transferência de energia e, consequentemente, dificultam a ação de controle? Defina-as.
- 5. Como podemos caracterizar um processo como instável ou estável?
- 6. Quais são os modos de acionamento existentes?
- 7. Quais são as características básicas de um controle *on-off*?
- 8. O que é faixa proporcional?
- 9. Quais são as características básicas de um controle proporcional?
- 10. Quais são as características básicas de um controle integral?
- 11. Quais são as características básicas de um controle derivativo?
- 12. Um controlador integral é usado para controle de nível, estando o valor desejado ajustado para 12 metros e sendo a faixa de medição de 10 a 15 metros. A saída do controlador é inicialmente 22%, sua ação é direta e está ajustada com Ki = 0,15rpm. Qual é a saída do controlador após 2 segundos, se o nível sofre um desvio em degrau e passa para 13,5 metros?



- 13. Numa bancada de teste (malha aberta), um controlador PI, ação direta, se encontra com VP = SV e saída estável em 8,00mA. A sua faixa proporcional está ajustada em 100% e o ganho integral em 3rpm. Em um instante foi introduzido um desvio em degrau de 10%, fazendo-se VP menor do que SV. Ao final de 15 segundos, o desvio foi anulado, voltandose a ter VP=SP. Qual seria a saída do controlador 3 minutos após ter sido introduzido o erro?
- 14. Um transmissor envia um sinal de 11,20mA para um controlador proporcional, cujo valor setado está ajustado para 12,00mA. O controlador envia, então, um sinal de 6,80mA para o posicionador. Nestas condições e supondo que inicialmente $S_o = 12$ mA, em qual faixa proporcional o controlador está ajustado?
- 15. Num controlador proporcional, estando a variável do processo igual ao valor desejado, o que acontece com a saída, se alterarmos o ganho de 1 para 2?
- 16. Qual é a saída do controlador PI, quando VP=SV?
- 17. Um controlador PI de ação direta estava em condições abaixo, quando foi introduzido um desvio e VP passou a ser 40%. Qual será a nova saída 10 segundos após ter sido introduzido o desvio?

Condições iniciais:

$$VP = 30\%$$
; $SP = SV = 30\%$; $FP = 50\%$; $K_i = 3$ rpm e $S_o = 0.4$ kgf/cm²

- 18. A saída de um controlador PI está equilibrada e estável numa bancada de teste. Introduzindo-se um desvio de 10%, 15 segundos após, a saída atinge 17,6 mA. Introduzindo-se o mesmo desvio em sentido contrário, a saída atinge 6,4 mA no final do mesmo tempo. Considerando-se que a faixa proporcional ajustada é igual a 50%, qual é o ganho integral utilizado no teste?
- 19. O que é um controle tipo feedback?
- 20. Quais são os critérios de *performance* e comportamento das ações PID em malha fechada? Defina-os.



Referências bibliográficas

BEGA, Egito Alberto (org.) et al. Instrumentação Industrial. Rio de Janeiro: Interciência Ltda.: IBP, 2003.

CONSIDINE, Douglas M. Process instruments and controls handbook. Mcgraw-Hill, 3ª edição. [19—].

CREUS, Antonio. Instrumentación industrial. 2ª edição (s. 1): Marcombo, [19—].

DOEBELIN, Ernest O. Measurement systems (application and design). 3ª edição [s. 1.]: McGraw-Hill, [19—].

Manual do transmissor eletrônico rosmount (modelo 1151). [s.1.: s.n.], [19—].

SIGHIERI, Luciano; NISHINARI, Akiyoshi. Controle Automático de Processos Industriais, - Instrumentação. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1998.

TRANSPETRO-COOPETRÓLEO. Apostila Curso de Automação - Controle Automático de Processos, s/d.

FIRJAN
CIRJ
SESI
SENAI
IEL

FIRJAN Federação das Indústrias do Estado do Rio de Janeiro SENAI Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial do Rio de Janeiro Av. Graça Aranha, 1 – Centro CEP: 20030-002 – Rio de Janeiro – RJ Tel.: (21) 2563-4526 Central de Atendimento: 0800-231231