



Guia de Estudos Sistema de Controle

Escola Técnica
Sandra Silva

Guia de Estudos

Eixo Tecnológico de Controle e
Processos Industriais

Curso Técnico

SISTEMA DE CONTROLE I e II

SISTEMA DE CONTROLE

OBS: “O conteúdo deste guia de estudos foi obtido das bibliografias em anexo e figuras da internet, apresentando partes de fragmentos das obras sem nenhum fim lucrativo”

ÍNDICE

CAPÍTULO 1

1 - EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO CONTROLE AUTOMÁTICO

1.1- Automação de Processos

1.2 - Controle de processos

1.3- Simbologia em instrumentação industrial

CAPÍTULO 2

2- Conceitos básicos de controle automático

2.1- Controle manual e controle automático

2.2- Controle em malha aberta e malha fechada

2.3 - Realimentação

2.4 - Diagrama de blocos

2.5 – Atrasos no processo

2.5.1 - Tempo morto

2.5.2 - Capacitância

2.5.3 – Resistência

(pico da resposta ou overshoot., tempo de estabilização ou acomodação e tempo de subida)

CAPÍTULO 3

3 - Tipos de ações de controle: ação direta e ação indireta

3.1- Ação ON-OFF: características básicas do controle ON-OFF

3.2-Ação proporcional: faixa proporcional, erro de Off-Set e características básicas do controle proporcional;

3.3- Ação integral: características básicas do controle Integral e circuito básico de um controle integral

3.4- Ação derivativa: características básicas do controle derivativo e circuito básico de um controle derivativo

3.5- Ação proporcional + integral + derivativo (PID).

Sistemas de Controle I

1 - EVOLUÇÃO HISTÓRICA DO CONTROLE AUTOMÁTICO

No início, a humanidade não conhecia os meios para se obter a energia a partir da matéria. Desse modo, a energia era fornecida pelo próprio trabalho humano ou pelos trabalhos de animais domésticos. Somente no século XVIII, com o advento das máquinas a vapor, conseguiu-se transformar a energia da matéria em trabalho. Porém, o homem apenas teve a sua condição de trabalho mudada, passando do trabalho puramente braçal ao trabalho mental. Nesse momento, cabia ao homem o esforço de tentar "controlar" esta nova fonte de energia, exigindo dele então muita intuição e experiência, além de expô-lo constantemente ao perigo devido a falta de segurança. No princípio, isso foi possível devido à baixa demanda. Entretanto, com o aumento acentuado da demanda, o homem viu-se obrigado a desenvolver técnicas e equipamentos capazes de substituí-lo nesta nova tarefa, libertando-o de grande parte deste esforço braçal e mental.

Estes equipamentos podem ser combinados de modo a constituírem cadeias de controle simples ou múltiplas, adaptadas aos inúmeros problemas de controle e a um grande número de tipos de processos.

O primeiro controlador automático industrial de que há notícia é o regulador centrífugo inventado em 1775, por James Watts, para o controle de velocidade das máquinas a vapor.

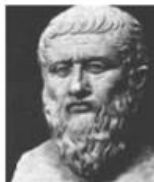
Esta invenção foi puramente empírica. Nada mais aconteceu no campo de controle até 1868, quando Clerk Maxwell, utilizando o cálculo diferencial, estabeleceu a primeira análise matemática do comportamento de um sistema máquina-regulador.

Por volta de 1900 aparecem outros reguladores e servomecanismos aplicados à máquina a vapor, a turbinas e a alguns processos. Durante a primeira guerra mundial, N. Minorsky cria o servocontrole, também baseado na realimentação, para a manutenção automática da rota dos navios e escreve um artigo intitulado "Directional Stability of Automatically Steered Bodies".] Em 1932, H. Nyquist, da Bell Telephone, cria a primeira teoria geral de controle automático com sua "Regeneration Theory", na qual se estabelece um critério para o estudo da estabilidade.

O trabalho pioneiro de Norbert Wiener (1948) sobre fenômenos neurológicos e os sistemas de controle no corpo humano abreviou o caminho para o desenvolvimento de sistemas complexos de automação.

1) Controle Nível-Líquido

- Sistemas com retroação por volta de 300 a.C.
- Relógio de água inventado por Ktesibios
- Gotejamento em taxa constante em reservatório.
- Nível da água indicava o tempo de corrido.
- Gotejamento constante → reservatório de alimentação em nível constante.
- Controle de válvula de alimentação através de uma bóia.



2) Controles de Pressão de Vapor e Temperatura

- Regulação de pressão de vapor começou por volta de 1681.
 - Válvula de segurança de Denis Papin.
 - Peso acima de uma válvula de controle de pressão.
 - Pressão alta → válvula subia e deixava o vapor escapar
 - Pressão baixa → válvula descia e fechava a saída de vapor.
- "Painel de pressão"



2) Controles de Pressão de Vapor e Temperatura

- Cornelis Drebbel no século XVII, na Holanda, inventou um Sistema de controle de temperatura mecânico para chocar ovos.
- Frasco com álcool e mercúrio como sensor.
- Abafador ligado a um flutuado como atuador controlava uma chama.



3) Controle de Velocidade

- Moinho de vento de Edmund Lee (1745).
- Aumento da velocidade do vento reposicionava as pás de modo a reduzir a área exposta ao vento.
- James Watt inventou regular de velocidade de esferas para controlar a velocidade de máquinas de vapor (séc. XVIII).



4) Estabilidade, Estabilização e Condução

- Teoria dos sistemas de controle de hoje começou a se cristalizar na segunda metade do século XIX.
- James Clerk Maxwell (1868) → Critério de estabilidade de terceira ordem.
- Edward John Routh (1874) → Critério de estabilidade de quinta ordem.
- Alexander Michailovich Lyapunov (1892) → Estendeu o trabalho de Routh em sua tese de doutorado "O Problema Geral da Estabilidade do Movimento."



5) Desenvolvimentos do Século XX

- Sperry Gyroscope Company (1922) → Pilotagem automática de navios.
- H.W.Bode e H.Nyquist (1930) → Análise de amplificadores com retroação nos laboratórios da Bell Telephone.



6) Aplicações Contemporâneas



A **instrumentação industrial** é a ciência que estuda, desenvolve e aplica instrumentos de medição e controle de processos na indústria.

A eficiência dos processos que envolvem a indústria que você atua dependem da qualidade da instrumentação, da confiabilidade dos equipamentos e do suporte dos melhores fornecedores. A Instrumentação Industrial, quando utilizada de maneira criteriosa e planejada, reduz custos, aumenta a produtividade e contribui com a qualidade e a segurança da produção em que você trabalha.

No dia a dia, principalmente da **Indústria de Transformação**, o trabalho de um instrumentista é fundamental na Pirâmide de Automação Industrial.

Cada um dos instrumentos usados no processo industrial é importante. Seja na medição de nível, vazão, temperatura, pressão ou qualquer outra grandeza.

Por que a Instrumentação Industrial é tão importante?

A indústria vem aumentando a demanda de controle de processos a cada dia.

Manter um controle adequado dos processos tem se tornado cada vez mais importante não apenas para operadores de campo, mas também para a empresa como um todo, incluindo executivos e gerentes dos mais diversos setores.

Isso é resultado de dois fatores: redução dos **custos de produção** e aumento do foco em **segurança do trabalho**.

Eficiência e Redução de custos na Instrumentação Industrial

Um dos principais objetivos da Instrumentação Industrial é manter o controle do processo produtivo seja em volume, peso, densidade, vazão etc. Se a sua medição é eficiente, você terá como resultado um maior rendimento da produção, pois os processos serão feitos sem interrupções.

A medição adequada de uma grandeza é um elemento fundamental dentro de um sistema de calibração de tanques, por exemplo. Uma instrumentação precisa aumentar significativamente a eficiência da planta.

Por exemplo, levando em consideração a medição de nível, se um silo de grãos precisa estocar uma certa quantidade de material o tempo inteiro, mas não é preenchido em sua capacidade máxima por falhas na medição, a unidade de produção poderá precisar de silos adicionais, acarretando despesa de compra e manutenção desnecessárias.

Muitos processos necessitam de um fluxo contínuo, entrada e saída de materiais. É inviável obter um fornecimento consistente com taxas variáveis ou se houver incidentes na linha de abastecimento.

Segurança do trabalho na Instrumentação Industrial

A Instrumentação Industrial também é feita por razão de segurança. Imagine o transbordamento accidental de um tanque de ácido causado por uma medição imprecisa de um instrumento. *Pode gerar um resultado catastrófico!*

Assim como falamos de um incidente envolvendo ácido, também poderíamos extrapolar para diversos outros tipos de materiais comuns na indústria, como inflamáveis, reagentes, dentre outros.

Prevenir transbordamentos, detectar vazamentos, evitar incêndios, dentre outras ocorrências também é importante para a indústria e seus processos de adequarem diante de todas as **regulações ambientais**.

Qual é a diferença entre Automação e Instrumentação Industrial?

A *Automação Industrial* estuda técnicas e medidas para diminuir a utilização de mão de obra humana em um processo, ou seja, trata-se de uma forma eficaz de substituir o trabalho manual pela máquina ou robótica.

A *Instrumentação Industrial* está preocupada com o aperfeiçoamento do controle e/ou desempenho dos processos industriais, como o aumento de segurança de máquinas e pessoas.

Automação, Instrumentação e Controle de Processo

A automação de um modo geral vem trazendo ao longo do tempo uma série de benefícios nos mais diversos setores da indústria e da própria sociedade. **É sinônimo de conforto e facilidade.**

Nas indústrias, a urgência no aumento da produção a fim de responder à crescente demanda com custos cada vez mais baixos e à fabricação constante de novos produtos, acarretou o crescimento do número de processos completamente automatizados.

A Automação Industrial, mais precisamente a **instrumentação industrial**, quando utilizada com critério e de forma planejada, **reduz custos, aumenta a produtividade** e contribui com **qualidade, controle e segurança na produção**.

A principal melhoria alcançada pela automação envolve a mão de obra. Toda instrumentação faz com que os trabalhadores se livrem de atividades monótonas, repetitivas e, principalmente, perigosas. É uma melhoria tanto para o financeiro quanto para a segurança do trabalho no setor industrial.

Embora a tecnologia que implementa processos ou sistemas automatizados modernos exija diferentes graus de investimento, os resultados são definitivamente garantidos e extremamente recompensadores. Por essa razão é que as indústrias que ainda resistem a essa realidade estão condenadas ao total fracasso.

A automação é classificada de acordo com suas diversas áreas. Além da automação industrial, temos a automação bancária, comercial, agrícola, predial, de comunicações e de transportes.

Focaremos na Automação Industrial, principalmente no que diz respeito à Instrumentação Industrial. Mas para chegarmos lá é preciso entender os segmentos que a Automação Industrial percorre até chegarmos propriamente na Instrumentação Industrial e nas especificidade da medição de nível, pressão, vazão e temperatura.

A Automação de Processos Contínuos e de processos de manufatura são as duas vertentes da Automação Industrial.

1.1- Automação de Processos

Nos tópicos anteriores falamos bastante a respeito de processo, mas não definimos o conceito para o âmbito da automação industrial.

Processo - é uma operação ou uma série de operações realizadas por um determinado conjunto de equipamentos, onde varia, pelo menos, uma característica física ou química de um material para obtenção de um produto final.

Ou seja, uma operação unitária, como são os casos da destilação, filtração ou aquecimento, é considerada um processo. Quando se trata de controle, uma tubulação por onde escoar um fluido, um reservatório que contém água, um aquecedor ou um equipamento qualquer é o que entendemos como processo.

Automação de processos contínuos

O **processo contínuo** é aquele que opera ininterruptamente grande quantidade de produtos e materiais nas mais diversas formas sem manipulação direta. São processos caracterizados por tubulações, tanques, trocadores de calor, misturadores, reatores, entre outros.

As indústrias química, petroquímica, alimentícia e de papel e celulose, são algumas áreas que os processos contínuos atuam.

Um processo pode ser controlado por meio da medição de variáveis que representam o estado desejado e pelo ajuste automático de outras variáveis, de maneira a se conseguir o valor que se deseja para a variável controlada. As condições ambientais devem sempre ser incluídas na relação de variáveis de processo.

As **variáveis de processo** são as grandezas físicas que afetam o desempenho de um processo e podem mudar de valor espontaneamente em virtude de condições internas ou externas. Por essa razão, essas variáveis típicas de processos contínuos necessitam de controle.

As principais variáveis medidas e controladas nos processos contínuos são: pressão, vazão, temperatura, nível, pH, condutividade, velocidade e umidade.

Automação de processos de manufatura

A automação de processos de manufatura são aquelas em que o produto é manipulado direta ou indiretamente, ao contrário do que ocorre nos processos contínuos.

Nos processos de manufatura identificamos máquinas e sistemas sequenciais característicos da indústria automobilística, eletroeletrônica, alimentícia, farmacêutica etc.

O funcionamento básico de um processo de manufatura requer os seguintes componentes:

- **Sensores:** responsáveis pela medição de desempenho do sistema de automação ou uma propriedade particular de algum de seus elementos. Exemplos: sensores de posição e óticos;

- **Controle:** a informação dos sensores é usada para controlar o sequenciamento de uma determinada operação. Os robôs são bons exemplos, pois o controle de suas posições é determinado por informações de sensores e por uma rotina de sequenciamento, acionando-se um conjunto de motores. Softwares de controle são conjuntos de instruções organizados de forma sequencial na execução de tarefas programadas;
- **Acionamento:** provê o sistema de energia para atingir determinado objetivo. É o caso dos motores elétricos, servo válvulas, pistões hidráulicos etc.

Não confunda automação com mecanização

A **mecanização** é um processo que consiste no uso de máquinas para realizar um trabalho repetitivo, substituindo, assim, o desgaste laboral do homem.

Já na **automação** o esforço é transferido ao trabalho realizado por meio de máquinas controladas automaticamente, capazes de se regularem sozinhas, como robôs, máquinas de Comando Numérico Computadorizado (CNC) e sistemas integrados de desenho e manufatura auxiliados por computador(CAD/CAM).

O que é Instrumentação Industrial?

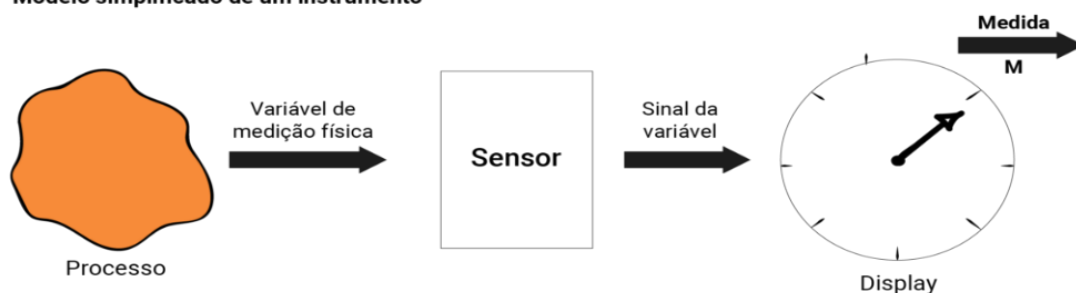
A **instrumentação industrial** é a ciência que estuda, desenvolve e aplica instrumentos de medição e controle de processos na indústria. É empregada tanto em processos usuais como a medição de nível em indústrias sucroalcooleiras quanto em processos críticos como reatores nucleares.

A obtenção de medidas precisas e com o menor custo possível depende do instrumento empregado, da qualificação do usuário e do tratamento matemático que as medições sofrem. Dessa forma, para o emprego de instrumentos e a interpretação correta dos seus resultados é fundamental que a pessoa encarregada dessa tarefa entenda os princípios de medição dos instrumentos para que possam ser feitas medições confiáveis dentro das faixas possíveis e características do instrumento.

Como funciona um instrumento?

Instrumento é um dispositivo que transforma uma variável física de interesse em um formato passível de medição pela instrumentação industrial.

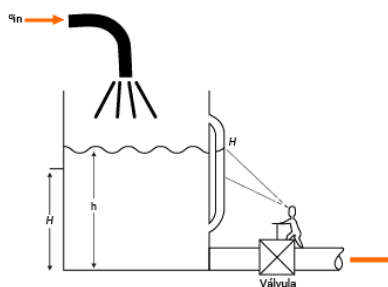
Modelo simplificado de um instrumento



O **sensor** é o elemento de destaque para o processo de medição. A função do sensor é converter o sinal da variável física em um sinal da variável de saída apropriado.

Os **sinais das variáveis** devem ser escolhidos de modo que possam ser manipulados e transmitidos em circuitos elétricos, preferencialmente, para uma leitura direta ou para serem armazenados em computadores de uma forma histórica

Conceitos básicos de controle de processo, em que a medição das variáveis de processo é fundamental.



1.2 - Controle de processos

A função fundamental do controle de processos é manter uma determinada variável em um valor desejado mesmo quando ela for submetida a perturbações externas.

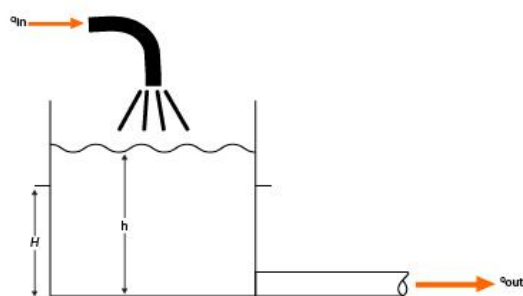
O líquido adentra ao tanque com uma vazão, in ; e sai com uma vazão out . O líquido no tanque apresenta um nível h . A vazão da saída varia de acordo com o nível do tanque de forma quadrática.

Assim, quanto maior for o nível do tanque maior será a vazão de saída do tanque. Dessa forma, se $out > in$ o tanque irá esvaziar, e se $out < in$ o tanque irá transbordar. Imagine que se deseja manter o nível em um valor desejado H independente da vazão de entrada in . Para atingir esse objetivo é necessária a utilização de alguma forma de controle nesse processo.

Os controles de processo levam em consideração duas formas de funcionamento, uma mais inteligente, com controle automático; e outra mais tradicional, com controle manual do processo.

Os principais dispositivos do controle automático são os sensores, os atuadores e o controlador. Os sensores servem para medir o valor do nível e convertê-lo em sinal proporcional (S). Esse sinal é enviado a um controlador que faz leitura da informação e fornece um sinal para o atuador alterar a abertura da válvula.

Controle de nível em líquidos

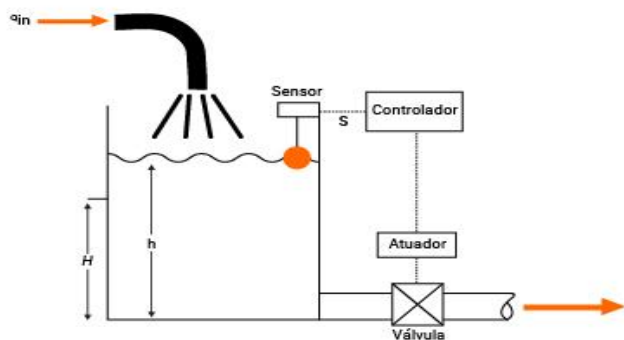


Ainda temos o controle de processo manual. É um sistema mais rudimentar, lento e trabalhoso. Basicamente consiste em uma pessoa observando o valor atual do nível e fazendo a comparação com o valor desejado.

Se o valor medido é maior, abre-se a válvula, aumentando a vazão de saída. Se o nível estiver menor que o valor desejado, fecha-se a válvula, reduzindo a vazão de saída, fazendo com que o nível atual observado seja elevado. Essas operações são feitas repetidamente pelo responsável técnico para que o nível fique o mais próximo possível do valor desejado.

Para controlar o nível e mantê-lo em um valor igual a H é necessário que o responsável técnico tenha um instrumento que meça o nível (variável do processo) atual do reservatório, no caso é empregado um visor de nível. Também deve ser utilizada uma válvula para controlar o nível através da alteração de vazão de saída (variável manipulada).

Controle automático



Tipos de controle

Exemplos de Sistemas de Controles diversos:



Quando se fala em controle, deve-se, necessariamente, subentender a medição de uma variável qualquer do processo e a sua atuação no sentido de mantê-la constante; isto é, a informação recebida pelo controlador é comparada com um valor preestabelecido (set point). Verifica-se a diferença entre ambos e age-se para diminuir ao máximo essa diferença.

Essa sequência de operações caracterizam a chamada malha de controle, dividida em controles de malha aberta e malha fechada.

Malha aberta

O controle com malha aberta tem a ação de controle independente da saída. Ou seja, a saída não tem efeito na ação de controle.

Configuração de controle em malha aberta



Nessa espécie de controle não existe elemento de realimentação, a saída nem ao menos é medida ou comparada com uma entrada para efetuar a ação de controle.

É o contrário do controle em malha fechada.

Malha fechada

Feedback ou controle em malha fechada é o controle no qual o processo pode ser realizado e compensado antes ou depois de afetar a variável controlada.

Trata-se da forma de controle usualmente mais empregada. Consiste na medição da variável de processo, passando pela aferição do set point (valor desejado) e ao fim alcançando um erro. O sinal de erro é transmitido a um controlador que faz a correção.

Etapas e conceitos fundamentais no controle de processos

Grande parte dos sistemas de controle realiza as seguintes etapas:

1. **Medição de um estado ou condição de um processo;**
2. **Um controlador calcula uma ação com base em um valor medido de acordo com um valor desejado;**
3. **Um sinal de saída resultante dos cálculos do controlador é utilizado para manipular uma ação do processo na forma de um atuador;**
4. **O processo reage ao sinal aplicado, mudando o seu estado ou condição.**

Termos específicos mais usados em controle de processo

Faixa de medida (range) é conjunto de valores da variável de medida compreendido dentro do limite superior e inferior ou de transmissão do instrumento.

Alcance (span) é diferença algébrica entre o valor superior e inferior da faixa de medida do instrumento.

Variável de processo (PV) é a variável a ser controlada em um processo. Trata-se de uma condição do processo que pode alterar a produção de alguma maneira. Exemplos para variáveis de processo: pressão, vazão, nível, temperatura, densidade etc.

Variável manipulada (MV) é a grandeza modificada com o intuito de manter a variável de processo desejado (set point).

Set point (SP) é o valor a ser mantido para a variável de processo.

Carga é uma espécie de perturbação que acontece em decorrência da variação em variável secundária que altera a variável do processo.

Perturbações são alterações inerentes a qualquer processo. Existem dois tipos de perturbações: carga e set point.

Erro (offset) é a diferença existente entre a variável de processo e o set point, podendo ser positiva ou negativa. Vale ressaltar que a redução ou a extinção do erro é o propósito fundamental de um sistema de controle.

Exatidão é o maior valor de erro estático que um instrumento pode alcançar no período de sua faixa de trabalho. Consiste no grau de concordância entre o resultado de uma medição e o valor verdadeiro do mensurando.

Zona morta é a variação máxima que a variável pode ter sem provocar alterações na indicação ou no sinal de saída de um instrumento ou em valores absolutos do seu range.

Histerese é a diferença máxima apresentada por um instrumento para um mesmo valor, em qualquer ponto da faixa de trabalho, quando a variável percorre toda a escala no sentido ascendente e descendente. É expressa em porcentagem do span.

Repetibilidade é a máxima diferença entre diversas medidas de um mesmo valor variável, adotando sempre o mesmo sentido de variação. Expressa-se em porcentagem do span.

Linearidade é a característica desejada na variável tanto em relação à entrada quando à saída de determinado instrumento.

Sensibilidade (ganho) é a medida da resposta do instrumento, expressa como variação na saída sobre variação na entrada. É o valor resultante do span de saída dividido pelo span de entrada.

Resolução é a menor diferença substancialmente percebida entre indicações de um dispositivo mostrador.

Ajuste é uma operação destinada a fazer com que um instrumento de medição tenha desempenho compatível com a sua utilização.

Calibração é um conjunto de operações que estabelece, sob condições específicas, a relação entre os valores indicados por um instrumento, ou sistema de medição, ou valores representados por uma medida materializada, ou material de referência com os valores correspondentes às grandezas estabelecidas por padrões.

Incerteza de medição é um parâmetro que expressa o intervalo no qual estão os valores que poderão ser razoavelmente atribuídos ao mensurando dentro de uma probabilidade específica. A incerteza de medição também é caracterizada pela indicação quantitativa da qualidade dos resultados da medição, sem a qual estes não poderiam ser comparados com os valores de referência especificados ou com um padrão. Deve-se levar em consideração que o resultado de uma medição é somente uma estimativa do valor do mensurando. Dessa forma, a expressão que representará o valor de tal mensurando deverá incluir a incerteza de medição.

Padrão-é a medida materializada, instrumento de medição, material de referência ou sistema de medição destinados a definir, realizar, conservar ou reproduzir uma unidade ou um ou mais valores de uma grandeza para servir como referência.

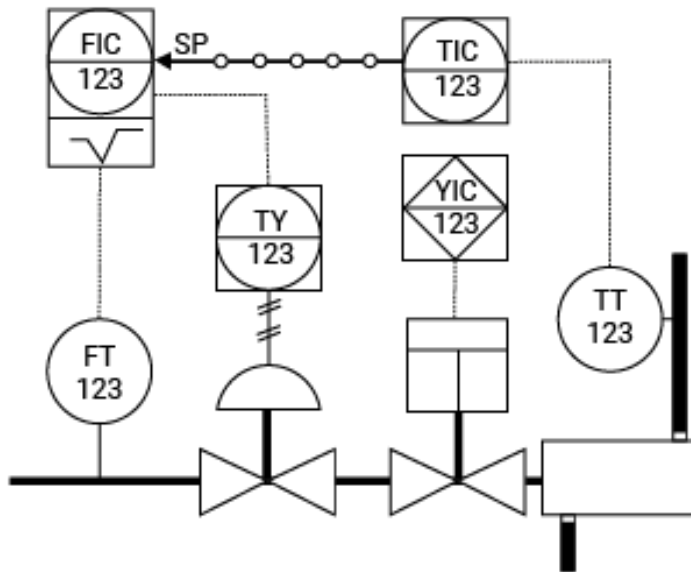
Erro combinado-é o desvio máximo entre a reta de referência e a curva de medição, incluindo os efeitos de não linearidade, histerese e repetibilidade. É expresso em porcentagem do sinal de saída nominal.

Além de conhecer os conceitos básico da Instrumentação Industrial, o instrumentista precisa entender como funciona toda a simbologia aplicada aos equipamentos e processos.

1.3- Simbologia em instrumentação industrial

No Brasil a ABNT através da sua norma NBR8190 apresenta e sugere o uso de símbolos gráficos para representação de diversos instrumentos e suas funções ocupadas nas malhas de instrumentação.

Diagrama P&I



As etapas de um processo químico de transformação devem ser controladas para se obter o produto final desejado. Cada uma das etapas do processo é monitorada por instrumentos.

Diagramas de instrumentação podem ser utilizados em uma grande variedade de processos, desde petroquímicos, gás, alimentos, etc...

Os **diagramas P&I (Piping and Instrumentation)** são fundamentais em automação de processos, pois sua formulação é uma das etapas mais importantes no projeto de processos industriais. Esses diagramas são largamente utilizados para a descrição detalhada de projetos de malhas de controle. Eles descrevem os elementos de medida utilizados, tipos de controle, esquemas de controle e, principalmente, a sua interconexão com o processo propriamente dito.

Símbolos são utilizados no P&I para representar elementos individuais, como sensores e válvulas, ou a combinação de elementos, como malhas de controle.

Existem diversos padrões para a simbologia P&I, além disso também é possível que algumas companhias utilizem uma convenção própria para a descrição de seus processos. Para este estudo é utilizada a **Norma ISA-S5.1**, a mais aceita internacionalmente e frequentemente utilizada no dia a dia das indústrias.

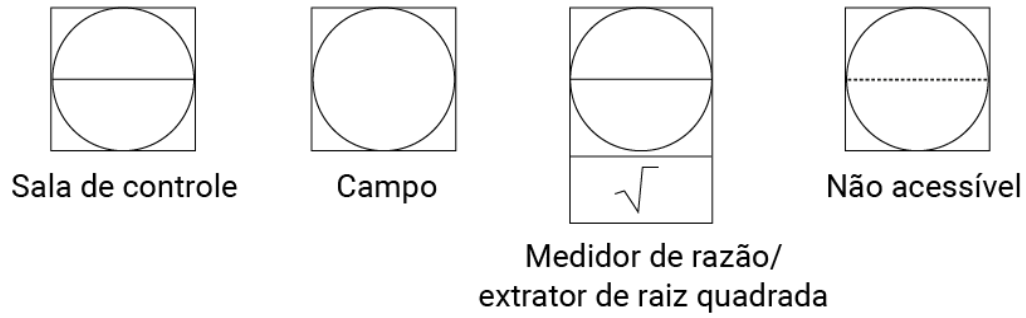
Nos diagramas P&I, um círculo representa instrumentos de medida individuais, como transmissores e sensores.

Simbologia da localização de dispositivos

Localização			
Sala de controle	Campo	Auxiliar	Não acessível

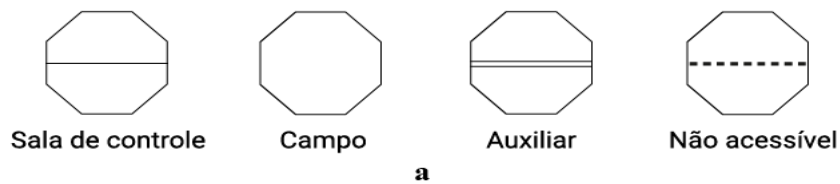
Para indicar os mostradores e tipos de controladores é utilizado um quadrado com um **círculo** interno. Essa simbologia serve para representar instrumentos que, além de efetuarem medições, executam alguma tarefa de controle.

Simbologia para mostradores e tipos de controladores

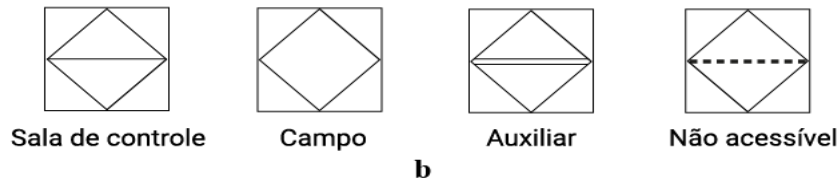


Quando o símbolo é um **hexágono**, a representação diz respeito às funções de controladores e tipos de CLPs.

Tipos de controladores



Tipos de CPLs



a = tipos
b = localização

Também temos os sinais empregados na simbologia P&I.

Sinais empregados na simbologia P&I

	Suprimento ou impulso		Sinal não definido
	Sinal pneumático		Sinal elétrico
	Sinal hidráulico		Tubo capilar
	Sinal eletromagnético ou sônico guiado		Sinal eletromagnético ou sônico não guiado
	Ligação por software		Ligação mecânica
	Sinal binário pneumático		Sinal binário elétrico

Identificação de instrumentação

As normas de instrumentação **ISA S-5.1, 5.2, 5.3, 5.4**, de 1992, estabelecem símbolos, gráficos e condições para a identificação alfanumérica de instrumentos ou funções programadas que deverão ser utilizados nos diagramas e malhas de controle de projetos de instrumentação.

As letras de identificação na **simbologia ISA** determinam:

- A variável a ser medida
- A função do dispositivo
- Modificadores

Todo instrumento ou função programada deve ser identificado por um conjunto de letras (identificação funcional) e um conjunto de algarismos (malha ou função programada).

Às vezes é necessário completar a identificação do instrumento com um sufixo.

Identificação de instrumento: LETRA NÚMERO				
Letra correspondente	Letra correspondente	000	000	A
Variável	Variável	Área da atividade	nº sequencial	S U F I X O
Identificação funcional		Identificação de malha de controle		

A identificação funcional é formada por um conjunto de letras, sendo elas responsáveis por identificar qual é o tipo de medição ou indicação que se está realizando. A primeira letra identifica a variável medida. Assim, um controle de temperatura se inicia com a letra T, o mesmo para pressão P.

Mas fique alerta:

a letra usada para o controle de nível é L, pois a classificação é a partir da língua inglesa na qual Nível é Level.

Dessa maneira, a **primeira letra da identificação funcional** é selecionada de acordo com a variável medida e não com a variável manipulada. A variável manipulada é a variável controlada pela variável medida; logo, uma válvula de controle comandada por um controlador de nível, que altera a vazão para controlar o nível, é identificada com LV, e não como FV.

As letras subsequentes às das variáveis identificam as funções dos instrumentos, sendo classificadas como:

- Funções passivas: elemento primário, orifício de restrição, poço
- Funções de informação: indicador, registrador, visor
- Funções ativas ou de saída: controlador, transmissor, chave e outros
- Funções modificadoras: alarmes ou indicação de instrumento multifunção

As letras subsequentes de funções modificadoras podem atuar ou complementar o significado da letra precedente. A letra modificadora altera a primeira ou uma das subsequentes. No caso de LILL, deve-se explicar que o instrumento em questão está indicando um nível muito baixo(LL).

Por isso é usada uma quarta letra, um L de Low (“baixo” em inglês). Se o instrumento indicasse um alarme de nível alto ou extremamente alto as letras subsequentes seriam, respectivamente, H e HH, High.

Assim, temos que as letras subsequentes caracterizam as funções dos instrumentos na seguinte ordem:

- Letras que indicam funções passivas ou de informação
- Letras que indicam funções ativas ou saídas
- Letras que modificam a função do instrumento ou que funcionam como complemento de explicação de função

A identificação funcional deve ser composta por no máximo 3 letras. A quarta letra só será admitida em caso de extrema necessidade, como são os seguintes casos:

- Instrumentos mais complexos, permitindo ainda as letras serem divididas em subgrupos
- No caso de um instrumento com indicação e registro da mesma variável, a letra I pode ser omitida

Letras de identificação (ISA)

Primeira letra			Letras sucessivas		
	Variável medida	Letra de modificação	Função de leitura passiva	Função de saída	Letra de modificação
A	Analizador	Alarme	Alarme		
B	Queimador (chama)	Balão de pressão			
C	Condutibilidade			Controlador	
D	Densidade ou peso específico	Diferencial			
E	Tensão (fem)		Elemento primário		

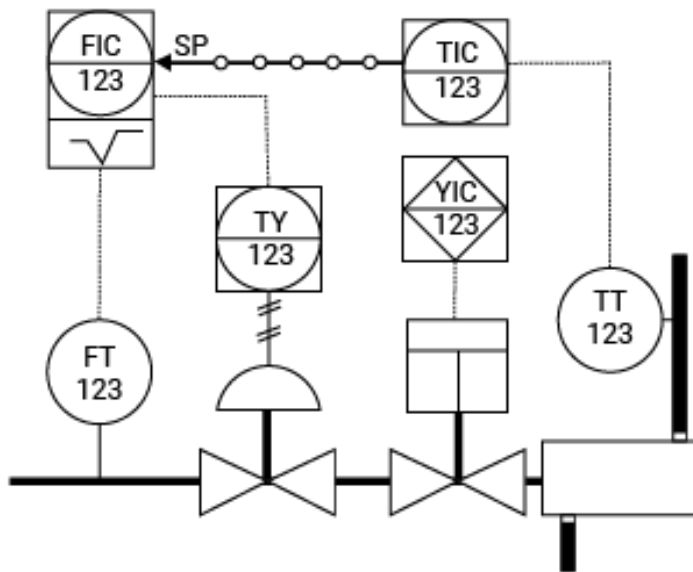
Primeira letra			Letras sucessivas		
	Variável medida	Letra de modificação	Função de leitura passiva	Função de saída	Letra de modificação
F	Vazão	Relação			
G	Medida dimensional		Visor		
H	Comando manual	Entrada manual			Alto
I	Corrente elétrica		Indicador		
J	Potência	Varredura			
K	Tempo ou programa		Cálculos em sistema digital		
L	Nível		Lâmpada piloto		
M	Umidade		Média		Médio ou intermediário
N	Vazão molar				
O	Orifício ou restrição				
P	Pressão	Percentual	Tomada de impulso		
Q	Quantidade	Integração			
R	Remoto		Registrador		
S	Velocidade ou frequência	Velocidade/ chave de segurança		Interruptor ou chave	
T	Temperatura			Transmissor	
U	Multivariável		Cálculo por computador	Multifunção	
V	Vibração			Válvula	
W	Peso ou força				
X/Y	Escolha do usuário			Relé ou computador	
Z	Posição/ deslocamento			Elemento final de controle	

Agora vamos tratar de algo essencial para a Instrumentação Industrial, o controle das variáveis do processo.

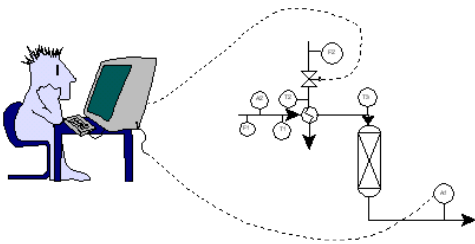
Exercício:

1) Agora identifique os símbolos, letras e números utilizados no diagrama abaixo.

Diagrama P&I

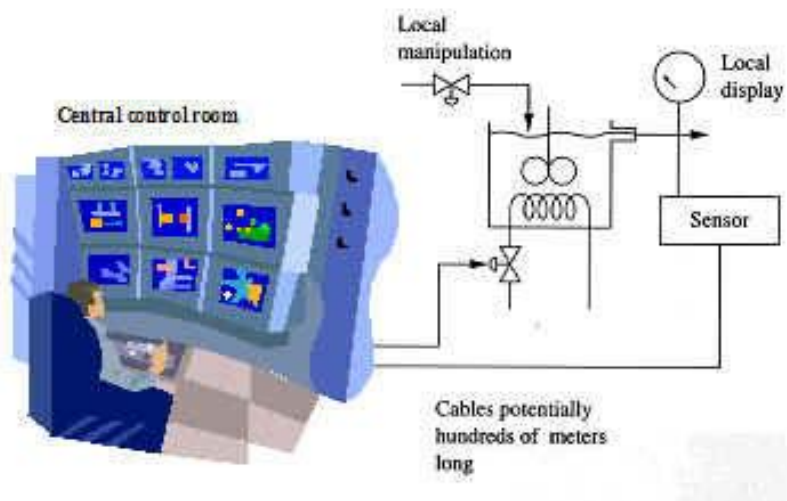


2) Qual é o propósito fundamental de um sistema de controle?



3) Uma planta industrial, por exemplo: química, pode ser muito grande e ter centenas ou milhares de sensores e de válvulas. Como o pessoal da planta monitora o processo e ajusta as aberturas das válvulas?

- a-() Sempre andando pela planta para vistoriar todos os equipamentos.
- b-() Por rádios transmissores.
- c-() Em um sistema central com indicação das medidas dos sensores e dos estados das válvulas da planta.
- d-() Através da experiência dos seniores.



CAPÍTULO 2

CONCEITOS E CONSIDERAÇÕES BÁSICAS DE CONTROLE AUTOMÁTICO

2.1) CONCEITOS

O controle Automático tem como finalidade a manutenção de uma certa variável ou condição num certo valor (fixo ou variante). Este valor que pretendemos é o valor desejado.

Para atingir esta finalidade o sistema de controle automático opera do seguinte modo:

- A- Medida do valor atual da variável que se quer regular.
- B- Comparação do valor atual com o valor desejado (sendo este o último indicado ao sistema de controle pelo operador humano ou por um computador). Determinação do desvio.
- C- Utilização do desvio (ou erro) para gerar um sinal de correção.
- D- Aplicação do sinal de correção ao sistema a controlar de modo a ser eliminado o desvio, isto é , de maneira a reconduzir-se a variável ao valor desejado. O sinal de correção introduz pois variações de sentido contrário ao erro.

Resumidamente podemos definir Controle Automático como a manutenção do valor de uma certa condição através da sua média, da determinação do desvio em relação ao valor desejado, e da utilização do desvio para se gerar e aplicar um ação de controle capaz de reduzir ou anular o desvio.

Para concretizar vamos considerar o controle de temperatura da água contida num depósito, de uma maneira simplificada

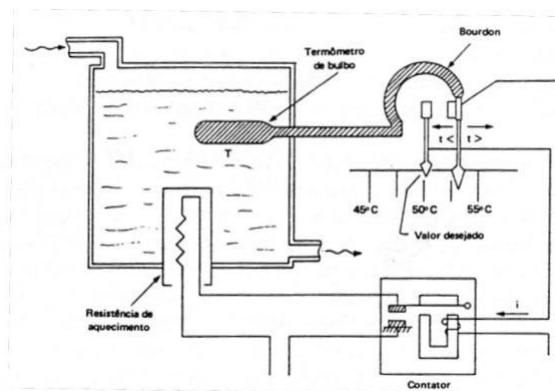


Fig. 2.1 - Controle de Temperatura.

De todas as grandezas relativas ao sistema (Nível, pressão, vazão, densidade, pH, energia fornecida, salinidade etc.) a grandeza que nos interessa, neste caso, regular é a temperatura da água. A temperatura é então a variável controlada.

Um termômetro de bulbo permite medir o valor atual da variável controlada. As dilatações e contrações do fluido contido dentro do bulbo vão obrigar o "Bourdon"(Tubo curvo de seção elipsoidal) a enrolar ou desenrolar. Os movimentos do extremo do bourdon traduzem a temperatura da água, a qual pode ser lida numa escala.

No diagrama representa-se um contato elétrico no extremo do bourdon e outro contato de posição ajustável à nossa vontade. Este conjunto constitui um "Termostato". Admitamos que se quer manter a temperatura da água nas proximidades de 50° C. Este valor da temperatura da água é o valor desejado.

Se a temperatura, por qualquer motivo, ultrapassar o valor desejado, o contato do termostato está aberto. A bobina do contator não está excitada e o contator mantém interrompida a alimentação da resistência de aquecimento. Não havendo fornecimento de calor , a temperatura da água vai descer devido às perdas. A temperatura aproxima-se do valor desejado. Quando, pelo contrário, a temperatura é inferior ao valor desejado o bourdon enrola e fecha o contato do

termostato. O contator fecha e vai alimentar a resistência de aquecimento. Em consequência, a temperatura da água no depósito vai subir de modo a aproximar-se de novo do valor desejado.

Normalmente as cadeias de controle são muito mais elaboradas. Neste exemplo simples encontramos contudo as funções essenciais de uma malha de controle.

- Medida -** A cargo do sistema termométrico.
Comparação Efetuada pelo sistema de Contatos (Posição Relativa)
Computação Geração do sinal de correção (efetuada também pelo sistema de contatos e pelo resto do circuito elétrico do termostato).
Correção - Desempenhada pelo órgão de Controle - Contator

Observa-se que , para a correção da variável controlada (temperatura) deve-se atuar sobre outra variável (quantidade de calor fornecida ao depósito). A ação de controle é aplicada, normalmente, a outra variável da qual depende a variável controlada e que se designa com o nome de variável manipulada. No nosso exemplo, o "Sinal de Controle " pode ser a corrente elétrica i.

Como veremos mais tarde, estamos diante de uma malha de controle do tipo ON-OFF. O sinal de controle apenas pode assumir dois valores. Na maior parte dos casos , como se verá, a função que relaciona o sinal de controle com o desvio é muito mais elaborada. Podemos agora representar um diagrama simbólico das várias funções e variáveis encontradas (fig.2.2). Alguns dos elementos de medida e os elementos de comparação e de computação fazem normalmente parte do instrumento chamado de "CONTROLADOR".

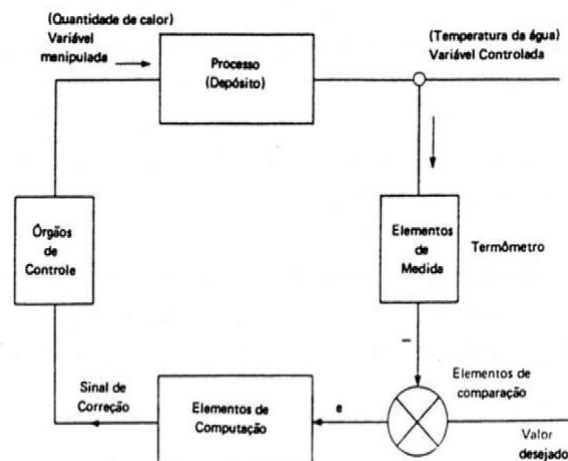


Fig.2.2 - Diagrama das funções e variáveis envolvidas no controle de temperatura.

Para facilitar o entendimento de alguns termos que aqui serão utilizados, a seguir, serão dadas de forma sucinta suas definições:

- Planta** Uma planta é uma parte de um equipamento, eventualmente um conjunto de itens de uma máquina, que funciona conjuntamente, cuja finalidade é desenvolver uma dada operação.
- Processo** Qualquer operação ou sequência de operações, envolvendo uma mudança de estado, de composição, de dimensão ou outras propriedades que possam ser definidas relativamente a um padrão. Pode ser contínuo ou em batelada.
- Sistemas** É uma combinação de componentes que atuam conjuntamente e realizam um certo objetivo.
- Variável do Processo (PV)** Qualquer quantidade, propriedade ou condição física a fim de que se possa efetuar a indicação e/ou controle do

processo (neste caso, também chamada de variável controlada).

Variável Manipulada (MV) É a grandeza que é operada com a finalidade de manter a variável controlada no valor desejado.

Set Point (SP) ou Set Valor (SV) É um valor desejado estabelecido previamente como referência do ponto de controle no qual o valor controlado deve permanecer.

Distúrbio (Ruído) É um sinal que tende a afetar adversamente o valor da variável controlada.

Desvio Representa o valor resultante da diferença entre o valor desejado e o valor da variável controlada.

Ganho Representa o valor resultante do quociente entre a taxa de mudança na saída e a taxa de mudança na entrada que a causou. Ambas, a entrada e a saída devem ser expressas na mesma unidade.

As quatro principais variáveis do processo industrial são, nível, pressão, vazão e temperatura.

Medição de Nível

Nível é a medida em altura do conteúdo líquido ou sólido de um reservatório.

A medição de nível permite:

- A avaliação do estoque de tanques de armazenamento;
- O controle dos processos contínuos em que existam volumes líquidos ou sólidos, de acumulação temporária, amortecimento, mistura, resistência etc.

A medição de nível faz parte dos processos de automação e sua decorrente instrumentação industrial. Para entender melhor tudo que envolve a medição de nível é importante entender que ela está inserida no contexto da automação industrial e serve para o controle de processos.

Métodos de medição de nível de líquido e de sólidos

Basicamente, a medição de nível se divide em:

- Medição de Nível Direta
- Medição de Nível Descontínua
- Medição de Nível Indireta

Medição de Nível Direta

A Medição de Nível Direta é um tipo de medição de nível que adota como pontos de referência a posição superior da substância medida.

Principais formas de medição direta

- Observação visual direta por meio de uma escala graduada
- Posição do detector sobre a superfície do produto a ser medido (Ex: Boia)
- Eletrodo com a superfície livre do nível a ser medido
- Feixe de luz enviado para célula fotoelétrica, pela interposição entre o emissor e a célula do produto mensurado
- Reflexão de ondas de rádio ou sônicas na superfície livre do produto

Medição de Nível Descontínua

Os medidores de nível que utilizam o método de medição descontínua de nível são compostos por duas partes principais: um detector de nível e um circuito de saída, que pode estar energizado ou desenergizado.

O detector deste instrumento informa ao circuito de saída a presença ou ausência do produto em determinada posição; cabe ao circuito estabilizar o sinal de saída em função dessa informação.

Os medidores são empregados para fornecer indicação apenas quando o nível atinge os pontos fixos desejados. Assim sendo, esses medidores podem ligar uma bomba, acionar um alarme ou desencadear uma sequência de operações automáticas quando o nível atinge um ponto fixo cujo valor pode ser previamente ajustado.

Medição de Nível Indireta

A Medição de Nível Indireta é um tipo de medição que utiliza propriedades físicas ao nível para fazer suas mensurações.

Levando em consideração as propriedades físicas e os instrumentos utilizados no processo, a medição de nível indireta ocorre por:

- Medição de Nível por Pressão
- Medição de Nível com Borbulhador
- Medição de Nível por Empuxo
- Medição de Nível com Interface
- Medição de Nível por Capacitância
- Medição de Nível por Ultrassom
- Medição de Nível com Raios Gama

Métodos de medição de nível de sólidos

Medir o nível dos sólidos também é possível. Geralmente os sólidos medidos se apresentam na forma de pó ou grãos.

É possível medir o nível de sólidos por:

- Medição Eletromecânica
- Medição por pás rotativas ou lâminas vibratórias

Medição de Pressão

A Medição de Pressão é uma das variáveis de medida mais importantes da Instrumentação Industrial porque atua no Controle de Processos e o seu princípio fundamental pode ser utilizado em outros tipos de medida além da pressão. Medidas de nível, vazão e densidade podem ser realizadas com o mesmo princípio da Medição de Pressão.

A pressão pode ocorrer pela expansão de gases e vapores ou pela elevação de colunas líquidas. Dessa forma, temos que:

A Pressão é o resultado de uma força (F) sobre uma superfície (A).

Levando em consideração que P é pressão; F é força; e A corresponde a área; o cálculo da pressão se dá pela seguinte expressão:

Unidades de Pressão

Já descobrimos como encontrar o valor da pressão através de uma fórmula simples. Agora o desafio é entender como o resultado dessa expressão é apresentado.

De acordo com o Sistema Internacional, a unidade de medida que representa a força é o Newton (N); a unidade de área é o m^2 ; e, finalmente, a pressão é medida pela unidade Pascal (Pa). Portanto, $1Pa$ equivale à força de $1N$ aplicada sobre uma superfície com área $1 m^2$.

A pressão também pode ser medida por bar, que equivale à força aplicada de 10^6 dinas sobre um superfície de $1 cm^2$:

Para ficar mais claro, a relação das unidades bar e Pa é a seguinte:

Medição por coluna de líquido

Outra forma de medir a pressão é pela altura de uma coluna de líquido necessária para equilibrar a pressão aplicada. Assim, a medição de pressão utiliza as seguintes unidades:

- mmHg (milímetros de mercúrio);
- cmHg (centímetros de mercúrio);
- inHg (polegadas de mercúrio);
- péHg (pés de mercúrio);
- mmca (milímetros de coluna de água);
- mca (metros de coluna de água);
- inca (polegadas de coluna de água);

Escalas de Pressão

A variável física pressão pode apresentar escalas caracterizadas como atmosférica, relativa e absoluta.

Pressão Atmosférica

Pressão atmosférica é a pressão exercida pela atmosfera terrestre em decorrência do peso da camada de gases que envolvem o planeta levando em consideração uma altitude de até 50 km.

Pressão Relativa

Pressão relativa é a pressão que tem como unidade de referência de sua medição a pressão atmosférica. A pressão relativa pode ser positiva (pressão efetiva) ou negativa (vácuo).

Pressão Absoluta

Pressão absoluta é a pressão medida a partir do vácuo absoluto. É uma soma da pressão relativa mais a pressão atmosférica.

Tipos de Pressão

Pressão Estática

Pressão estática é a pressão exercida por um fluido em repouso ou em movimento, desde que a tomada de pressão seja perpendicular ao escoamento.

Pressão Cinética

Pressão cinética é a pressão exercida por um fluido em movimento. Esse tipo de pressão é medido pela tomada de impulso de forma que receba o impacto do fluxo.

Pressão Diferencial

Pressão diferencial é a diferença entre duas pressões, sendo representada pelo símbolo ΔP (delta P). Esse tipo de pressão é utilizado principalmente para a medição de vazão, nível, densidade e também pressão.

Medição de Vazão

Determinar o controle e o balanço de materiais é importantíssimo para diversas operações na indústria. Por isso que a Medição de Vazão é valorizada pela Instrumentação Industrial. As principais variáveis encontradas em processos contínuos são medidas a partir de sua vazão. A medição da vazão inclui no seu sentido mais amplo a determinação da quantidade de líquidos, gases e sólidos que passa por um determinado local na unidade de tempo. Podem também ser incluídos os instrumentos que indicam a quantidade total movimentada em um intervalo de tempo.

A quantidade total movimentada pode ser medida em unidades de volume (litros, mm³, cm³, m³, galões, pés cúbicos), ou em unidades de massa (g, Kg, toneladas, libras), e a vazão instantânea, por uma das unidades anteriormente citadas dividida por unidade de tempo (litros/min, m³/hora, galões/min).

Comparativo de Unidades de Vazão

1m³ = 1.000 litros

1 libra = 0,4536 kg

1 pé cúbico = 0,0283168 m³

1 galão (americano) = 3,785 litros

Quando se mede a vazão em unidades de volume, devem ser especificadas as condições base consideradas. Assim, no caso de líquidos, é importante indicar que a vazão se considera nas condições de operação, ou a 0 °C, 20 °C, ou a outra temperatura qualquer.

Na medição de gases é comum indicar a vazão em kg/h (Quilogramas por hora), Nm³/h (metros cúbicos normais por hora) ou SCFM (pés cúbicos standard por minuto).

Tipos de Vazão

Vazão volumétrica (Q) é o volume de líquido que passa em um determinado ponto em uma determinada quantidade de tempo.

Vazão mássica (Q_m) é a quantidade de massa de um fluido que atravessa a seção transversal de uma tubulação por unidade de tempo.

Métodos de Medição de Vazão

A Instrumentação Industrial possibilita uma enorme variedade de medidores de vazão. A especificação e a seleção correta do medidor de vazão não é uma tarefa muito simples, pois exigem conhecimentos e informações precisas sobre o fluido, características de operação e instalação.

A enorme oferta de medidores e técnicas de medição é outro fator decisivo nesse processo de escolha, pois devem ser considerados, além de critérios econômicos, inúmeros critérios técnicos, como:

- Vazão operacional
- Diâmetro da tubulação
- Precisão
- Rangeabilidade
- Características do fluido
- Características de operação
- Tipo de instalação
- Perda de carga

Os 8 Principais Métodos de Medição de Vazão

1. Medição por Pressão Diferencial (elementos deprimogênios)

- Placa de orifício
- Tubo Venturi
- Bocal de vazão
- Tubo Pilot
- Tubo Annubar

2. Medição por Área Variável (rotômetro)

3. Medição por Frequência (pulsos)

- Vortex
- Turbina

4. Medição por Tensão Induzida (medidor magnético)

5. Medição Mássica

- Efeito Coriolis
- Térmicos

6. Medição por Ultrassom

- Efeito Doppler
- Por tempo de trânsito

7. Medição por Deslocamento Positivo

- Disco nutante
- Pistão oscilante
- Medidor rotativo oval

8. Medição em Canais Abertos

- Calha Parshall
- Vertedores

Medição de Temperatura

Temperatura é a propriedade da matéria que reflete a média da energia cinética dos átomos. O conceito de temperatura está relacionado ao movimento de vibração e/ou deslocamento dos átomos de um corpo. Todas as substâncias são constituídas de átomos que, por sua vez, se compõem de um núcleo e um elétron. Usualmente, estes átomos possuem certa energia cinética que se traduz na forma de vibração ou no mesmo deslocamento, como no caso de líquidos e gases.

A energia cinética de cada átomo em um corpo não é igual nem constante, pois continuamente altera seu valor durante um processo de intercâmbio de energia interna própria.

Na prática, a temperatura é representada em uma escala numérica, onde, quanto maior o seu valor, maior é a energia cinética média dos átomos do corpo em questão.

Não confunda Energia Térmica com Calor!

Energia Térmica é a somatória das energias cinéticas dos seus átomos; além de depender da temperatura, depende também da massa e do tipo de substância.

Calor é a energia que se transfere de um corpo para o outro por diferença de temperatura.

A temperatura é uma das variáveis mais importantes na indústria de processamento.

Praticamente todas as características físico-químicas de qualquer substância alteram-se de forma bem-definida com a temperatura. Isso acontece nos seguintes casos:

- Dimensões (comprimento, volume)
- Estado físico (sólido, líquido, gás)
- Densidade
- Viscosidade
- Radiação térmica
- Reatividade química
- Condutividade
- pH
- Resistência mecânica
- Maleabilidade, ductibilidade

A Medição de Temperatura ou Termometria vai da criometria a pirometria.

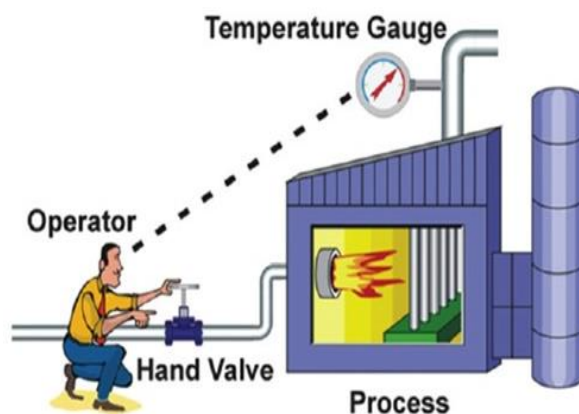
Criometria é a medição de baixas temperaturas, ou seja, aquelas próximas ao zero absoluto de temperatura.

Pirometria é a medição de altas temperaturas, na faixa onde os efeitos de radiação térmica passam a se manifestar

2.2 - Tipos de controle:

2.1- Controle Manual e Controle Automático

Controle Manual de um Sistema Térmico



Para ilustrar o conceito de controle manual e automático vamos utilizar como processo típico o sistema térmico das figuras 2.3 e 2.4 . Inicialmente considere o caso em que um operador detém a função de manter a temperatura da água quente em um dado valor. Neste caso, um termômetro está instalado na saída do sistema , medindo a temperatura da água quente. O operador observa a indicação do termômetro e baseado nela, efetua o fechamento ou abertura da válvula de controle de vapor para que a temperatura desejada seja mantida.

Deste modo, o operador é que está efetuando o controle através de sua observação e de sua ação manual, sendo portanto, um caso de "Controle Manual".

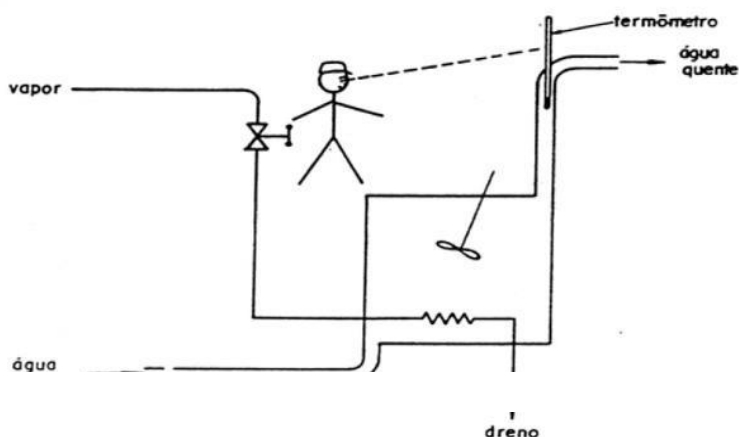


Fig. 2.3 - Controle Manual de um Sistema Térmico

Considere agora o caso da figura 2.4, onde no lugar do operador foi instalado um instrumento capaz de substituí-lo no trabalho de manter a temperatura da água quente em um valor desejado. Neste caso, este sistema atua de modo similar ao operador, tendo então um detector de erro, uma unidade de controle e um atuador junto à válvula, que substituem respectivamente os olhos do operador, seu cérebro e seus músculos. Desse modo, o controle da temperatura da água quente é feito sem a interferência direta do homem, atuando então de maneira automática, sendo portanto, um caso de "Controle Automático"

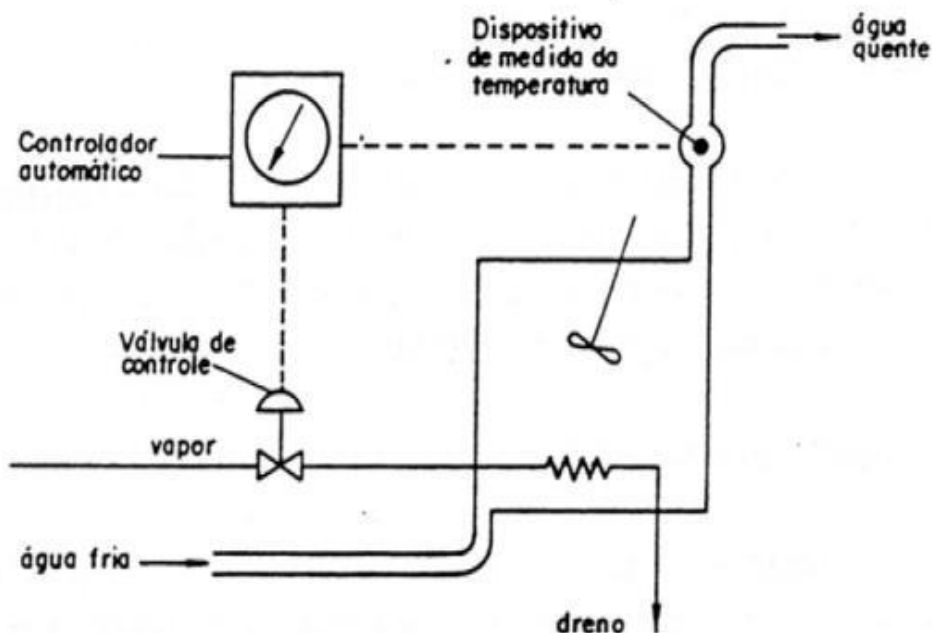
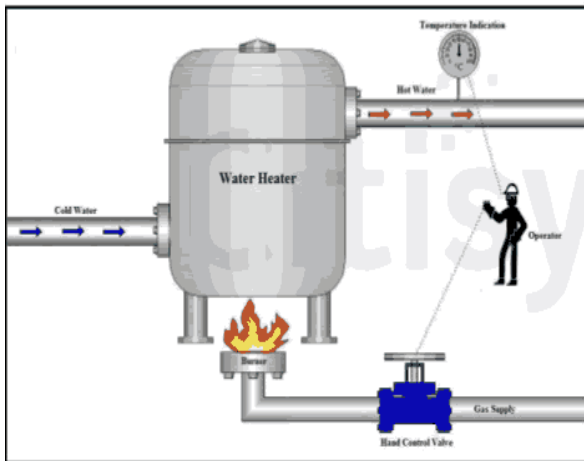
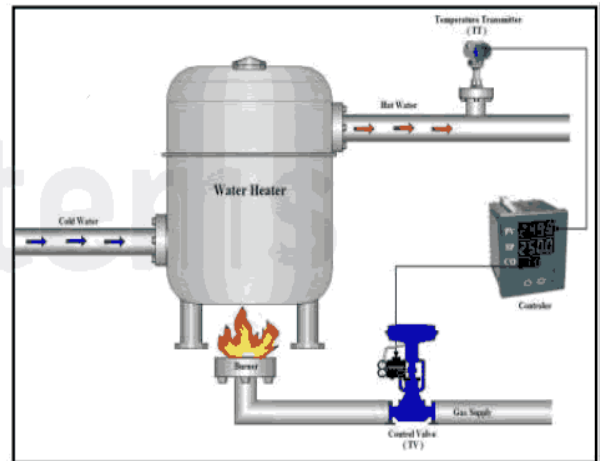


Fig. 2.4 - Controle Automático de um Sistema Térmico

Controle em Malha Aberta



Controle em Malha Fechada



2.2) Controle Auto-operado

Controle em que a energia necessária para movimentar a parte operacional pode ser obtida diretamente, através da região de detecção, do sistema controlado. Deste modo, este controle obtém toda a energia necessária ao seu funcionamento do próprio meio controlado. Este controle é largamente utilizado em aplicações de controle de pressão e menos comumente no controle de temperatura, nível, etc. A figura 2.5 mostra um exemplo típico de sistema de controle de pressão, utilizando uma válvula auto-operada.

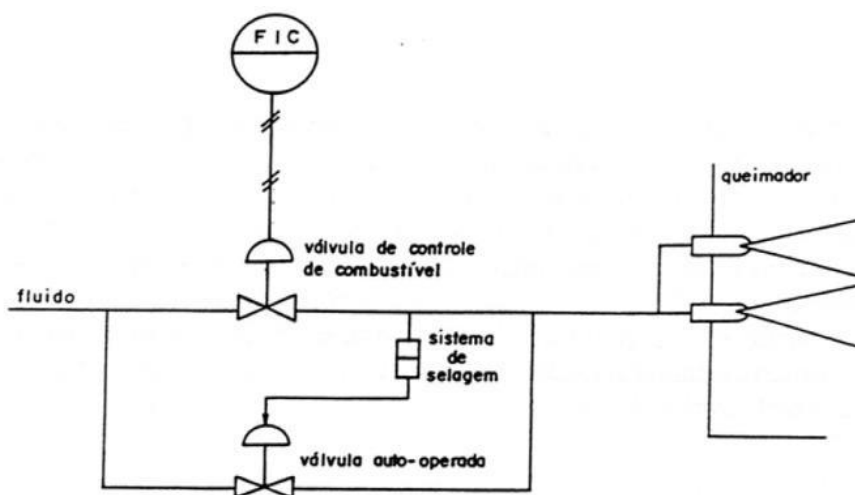


Fig. 2.5 - Sistema de Controle de Pressão Mínima de Combustível auto-operado

Controle em Malha Aberta e Malha Fechada

Os sistemas de controle são classificados em dois tipos: sistemas de controle em malha aberta e sistemas de controle em malha fechada. A distinção entre eles é determinada pela ação de controle, que é componente responsável pela ativação do sistema para produzir a saída.

a) Sistema de Controle em Malha Aberta

É aquele sistema no qual a ação de controle é independente da saída, portanto a saída não tem efeito na ação de controle. Neste caso, conforme mostrado na fig. 2.6, a saída não é medida e

nem comparada com a entrada. Um exemplo prático deste tipo de sistema , é a máquina de lavar roupa. Após ter sido programada, as operações de molhar, lavar e enxaguar são feitas baseadas nos tempos pré-determinados. Assim, após concluir cada etapa ela não verifica se esta foi efetuada de forma correta (por exemplo, após ela enxaguar, ela não verifica se a roupa está totalmente limpa).

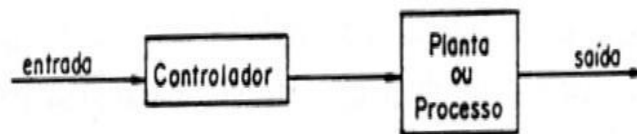


Fig. 2.6 - Sistema de Controle em Malha Aberta

b) Sistema de Controle em Malha Fechada

É aquele no qual a ação de controle depende, de algum modo, da saída. Portanto, a saída possui um efeito direto na ação de controle. Neste caso, conforme pode ser visto através da figura 2.7, a saída é sempre medida e comparada com a entrada a fim de reduzir o erro e manter a saída do sistema em um valor desejado. Um exemplo prático deste tipo de controle, é o controle de temperatura da água de um chuveiro. Neste caso, o homem é o elemento responsável pela medição da temperatura e baseado nesta informação, determinar uma relação entre a água fria e a água quente com o objetivo de manter a temperatura da água no valor por ele tido como desejado para o banho.

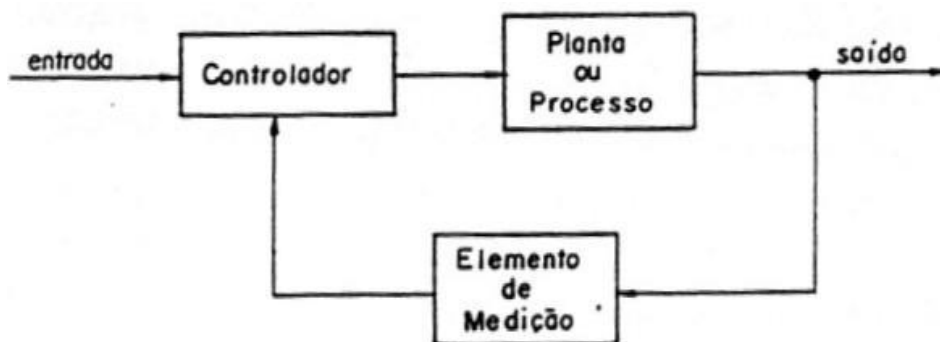


Fig. 2.7 - Sistema de Controle em Malha Fechada

2.3 - REALIMENTAÇÃO

É a característica do sistema de malha fechada que permite a saída ser comparada com a entrada. Geralmente a realimentação é produzida num sistema, quando existe uma sequência fechada de relações de causa e efeito entre variáveis do sistema. Quando a realimentação se processa no sentido de eliminar a defasagem entre o valor desejado e o valor do processo, esta recebe o nome de realimentação negativa.

2.4 - DIAGRAMA DE BLOCOS

Um sistema de controle pode consistir de vários componentes, o que o torna bastante difícil de ser analisado. Para facilitar o seu entendimento e a fim de mostrar as funções desempenhadas por seus componentes, a engenharia de controle utiliza sempre um diagrama denominado "Diagrama de Blocos".

Diagrama de blocos de um sistema é uma representação das funções desempenhadas por cada componente e do fluxo de sinais. Assim, conforme pode ser visto na figura 2.8, os componentes principais de um sistema são representados por blocos e são integrados por meio de linhas que indicam os sentidos de fluxos de sinais entre os blocos. Estes diagramas são, então utilizados para representar as relações de dependência entre as variáveis que interessam à cadeia de controle.

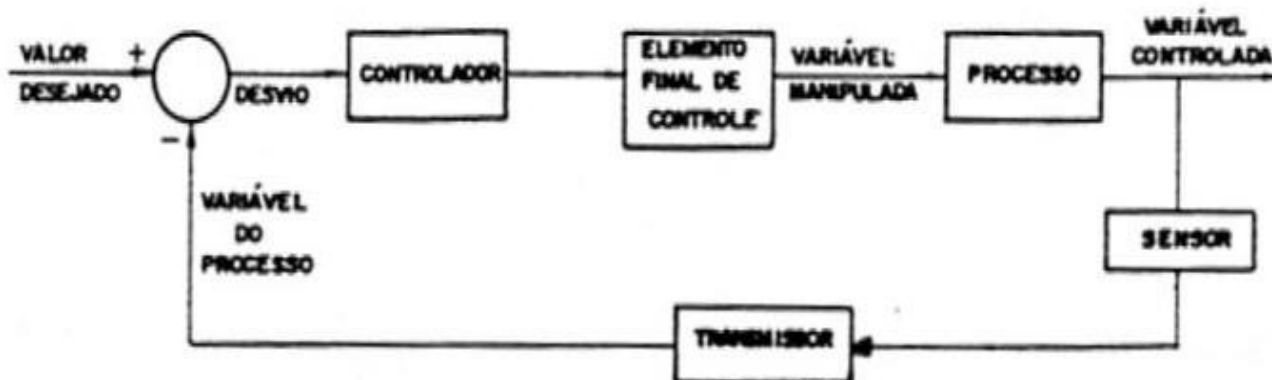


Fig. 2.8 - Representação em Diagrama de Bloco de um Sistema de Controle

2.5 - ATRASOS NO PROCESSO

Todo processo possui características que determinam atraso na transferência de energia e/ou massa, o que consequentemente dificulta a ação de controle, visto que elas são inerentes aos processos. Quando, então, vai se definir o sistema mais adequado de controle, deve-se levar em consideração estas características e suas intensidades. São elas: Tempo Morto, Capacitância e Resistência.

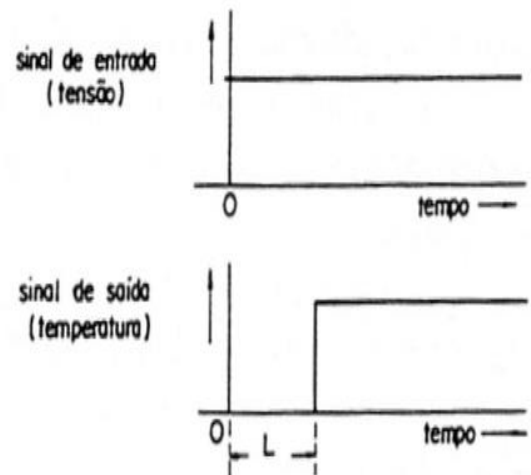
2.5.1 - Tempo Morto

É o intervalo de tempo entre o instante em que o sistema sofre uma variação qualquer e o instante em que esta começa a ser detectada pelo elemento sensor. Como exemplo veja o caso do controle de temperatura apresentado na figura 2.9. Para facilitar, suponha que o comprimento do fio de resistência R seja desprezível em relação à distância $l(m)$ que o separa do termômetro e que o diâmetro da tubulação seja suficientemente pequeno.

Se uma tensão for aplicada em R como sinal de entrada fechando-se a chave S conforme a figura 2.10, a temperatura do líquido subirá imediatamente. No entanto, até que esta seja detectada pelo termômetro como sinal de saída, sendo $V(m/min)$ a velocidade de fluxo de líquido, terá passado em tempo dado por $L = l/V$ (min). Este valor L corresponde ao tempo que decorre até que a variação do sinal de entrada apareça como variação do sinal de saída recebe o nome de tempo morto. Este elemento tempo morto dá apenas a defasagem temporal sem variar a forma oscilatória do sinal.



Fig. 2.9 Exemplo do Elemento Tempo Morto Fig. 2.10 - Resposta ao Degrau Unitário do Elemento Tempo Morto



2.5.2) Capacitância

A capacitância de um processo é um fator muito importante no controle automático. É uma medida das características próprias do processo para manter ou transferir uma quantidade de energia ou de material com relação a uma quantidade unitária de alguma variável de referência.

Em outras palavras, é uma mudança na quantidade contida, por unidade mudada na variável de referência. Como exemplo veja o caso dos tanques de armazenamento da figura 2.11. Neles a capacitância representa a relação entre a variação de volume e a variação de altura do material do tanque. Assim, observe que embora os tanques tenham a mesma capacidade (por exemplo 100 m^3), apresentam capacitâncias diferentes.

Neste caso, a capacitância pode ser representada por :

$$C = \frac{dV}{dh} \quad A$$

onde: dV = Variação de Volume
 dh = Variação de Nível
 A = Área

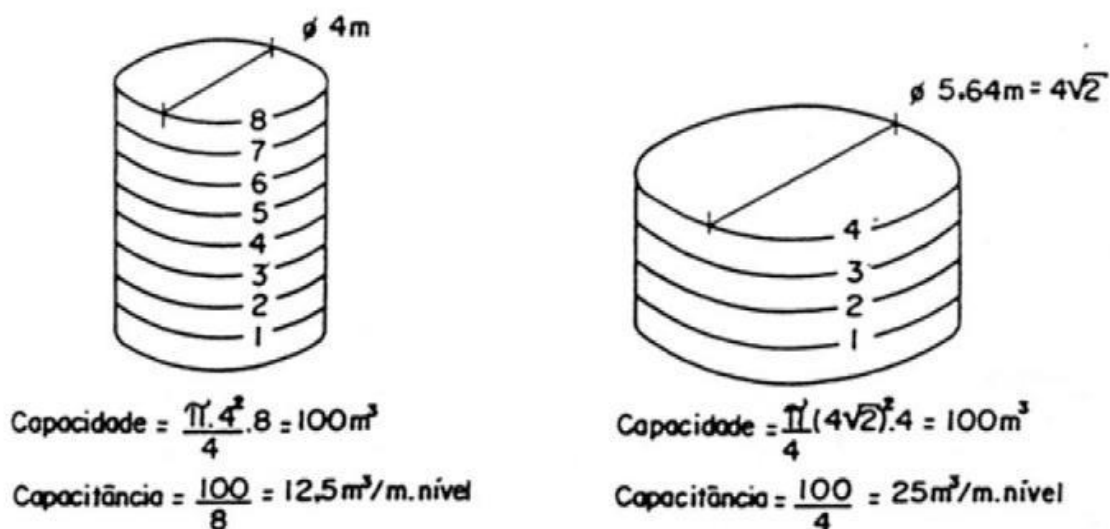


Fig. 2.11 - Capacitância com relação à capacidade

2.5.3) Resistência

A resistência é uma oposição total ou parcial à transferência de energia ou de material entre as capacitâncias. Na figura 2.12, está sendo mostrado o caso de um processo contendo uma resistência e uma capacitância.

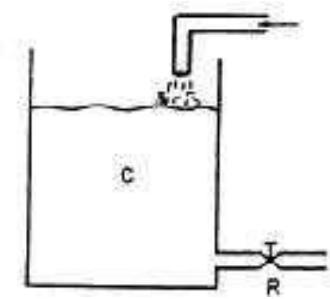


Fig.2.12 - Processo com uma resistência e uma capacitância

Observação :

O efeito combinado de suprir uma capacitância através de uma resistência produz um tempo de retardo na transferência entre capacitâncias. Tal tempo de retardo devido à resistência-capacitância (RC) é frequentemente chamado de "atraso de transferência".

EXERCÍCIO – SISTEMAS DE CONROLE 1

- 1) Cite um exemplo prático de um sistema de controle em malha aberta?
- 2) O que é um sistema de controle em Malha Fechada?
- 3) Cite um exemplo prático de um sistema de controle em Malha Fechada:
- 4) O que vem a ser realimentação de um processo?
- 5) O que é automação de processos Contínuos?
- 6) O que é automação de processos de manufatura?
- 7) O que é automação de processos descontínuos?
- 8) Como é conhecido o processo descontínuo?
- 9) O que é um processo mono variável?
- 10) O que implica a escolha do tipo de malha de controle a ser utilizada em processos industrial?

CAPÍTULO 3

3 - Tipos de ações de controle

3.1- AÇÕES DE CONTROLE

Foi visto que no controle automático, efetua-se sempre a medição variável controlada (saída), compara-se este valor medido com o valor desejado e a diferença entre estes dois valores é então processada para finalmente modificar ou não a posição do elemento final de controle. O processamento é feito em uma unidade chamada unidade de controle através de cálculos matemáticos. Cada tipo de cálculo é denominado ação de controle e tem o objetivo de tornar os efeitos corretivos no processo em questão os mais adequados.

Existem 4 tipos de ações básicas de controle que podem ser utilizados isoladamente ou associados entre si e dois modos de acionamento do controlador. Iniciaremos definindo estes dois modos par em seguida estudar cada tipo de ação e suas associações principais.

3.1) MODOS DE ACIONAMENTO

O sinal de saída do controlador depende de diferença entre a variável do processo (PV) e o valor desejado para aquele controle (SP ou SV). Assim, dependendo do resultado desta diferença, a saída pode aumentar ou diminuir. Baseado nisto um controlador pode ser designado a trabalhar de dois modos distintos chamados de *"ação direta"* e *"ação indireta"*.

3.1.1) Ação direta (normal)

Dizemos que um controlador está funcionando na ação direta quando um aumento na variável do processo em relação ao valor desejado, provoca um aumento no sinal de saída do mesmo.

3.1.2) Ação indireta (reversa)

Dizemos que um controlador está funcionando na *"ação reversa"* quando um aumento na variável do processo em relação ao valor desejado, provoca um decréscimo no sinal de saída desse controlador.

3.2) AÇÃO DE CONTROLE ON-OFF (LIGA-DESLIGA)

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

Como o próprio nome indica, ela só permite duas posições para o elemento final de controle, ou seja: totalmente aberto ou totalmente fechado.

Assim, a variável manipulada é rapidamente mudada para o valor máximo ou o valor mínimo, dependendo se a variável controlada está maior ou menor que o valor desejado.

Devido a isto, o controle com este tipo de ação fica restrito a processos prejudiciais, pois este tipo de controle não proporciona balanço exato entre entrada e saída de energia.

Para exemplificar um controle ON-OFF, recorremos ao sistema de controle de nível mostrado na figura 4.1. Neste sistema, para se efetuar o controle de nível utiliza-se um flutuado para abrir e fechar o contato (S) energia ou não o circuito de alimentação da bobina de uma válvula do tipo solenoide.

Este solenoide estando energizado permite passagem da vazão máxima e estando desenergizado bloqueia totalmente o fluxo do líquido para o tanque. Assim este sistema efetua o controle estando sempre em uma das posições extremas, ou seja, totalmente aberto ou totalmente fechado.

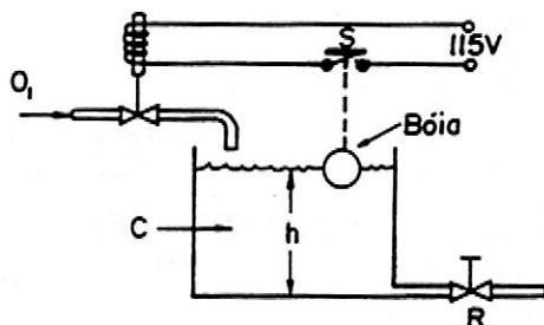


Fig. 3.1 - Sistema ON-OFF de Controle de Nível de Líquido

Observe que neste tipo de ação vai existir sempre um intervalo entre o comando "liga" e o comando "desliga". Este intervalo diferencial faz com que a saída do controlador mantenha seu valor presente até que o sinal de erro tenha se movido ligeiramente além do valor zero.

Em alguns casos este intervalo é proveniente de atritos e perdas de movimento não intencionalmente introduzido no sistema. Entretanto, normalmente ele é introduzido com a intenção de evitar uma operação de liga-desliga mais frequente o que certamente afetaria na vida útil do sistema.

A figura 3.2, mostra através do gráfico, o que vem a ser este intervalo entre as ações liga-desliga.

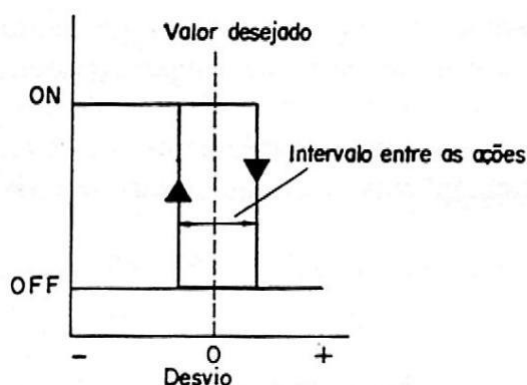
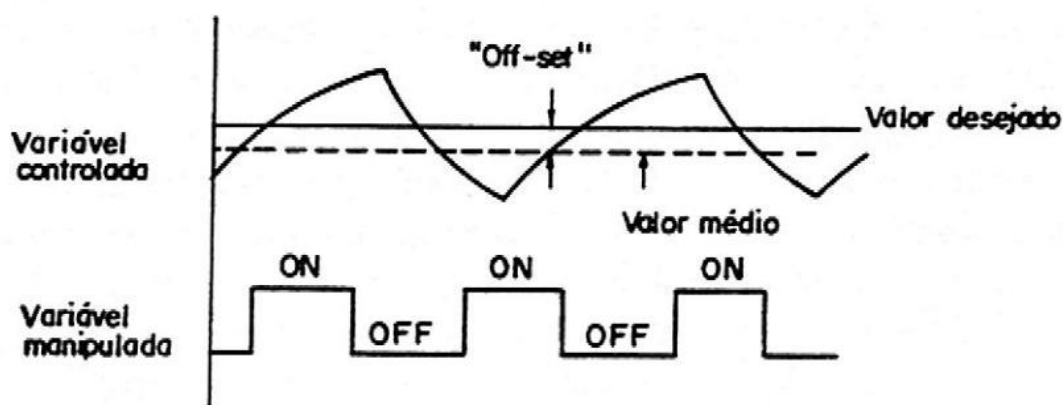


Fig. 3.2 - Intervalo ente as ações de liga-desliga

O fato deste controle levar a variável manipulada sempre a uma das suas posições extremas faz com que a variável controlada oscile continuamente em torno do valor desejado. Esta oscilação varia em frequência e amplitude em função do intervalo entre as ações e, também em função da variação da carga. Com isto, o valor médio da grandeza sob controle será sempre diferente do valor desejado, provocando o aparecimento de um desvio residual denominado erro de "offset". (vide fig. 3.3).



3.2.1) Características básicas do controle ON-OFF

Basicamente todo controlador do tipo ON-OFF apresenta as seguintes características:

- a) A correção independe da intensidade do desvio
- b) O ganho é infinito
- c) Provoca oscilações no processo
- d) Deixa sempre erro de offset

3.2.2) Conclusão

Conforme já foi dito, o controle através da ação em duas posições é simples e, ainda, econômico sendo, portanto, utilizado largamente nos dias atuais.

Principalmente, os controles de temperatura nos fornos elétricos pequenos, fornos de secagem, etc, são realizados em sua maioria por este método. No entanto, por outro lado, apresenta certas desvantagens por provocar oscilações e "offset" e, principalmente, quando provoca tempo morto muito grande, os resultados de controle por estes controles simples tornam-se acentuadamente inadequados.

Assim, quando não é possível utilizar este tipo de controle, recorre-se a outros tipos de controle mais complexos, mas que eliminam os inconvenientes deste tipo.

3.3) AÇÃO PROPORCIONAL (AÇÃO P)

Foi visto anteriormente, que na ação liga-desliga, quando a variável controlada se desvia do valor ajustado, o elemento final de controle realiza um movimento brusco de ON (liga) para Off (desliga), provocando uma oscilação no resultado de controle. Para evitar tal tipo de movimento foi desenvolvido um tipo de ação no qual a ação corretiva produzida por este mecanismo é proporcional ao valor do desvio. Tal ação denominou-se ação proporcional.

A figura 3.4 indica o movimento do elemento final de controle sujeito apenas à ação de controle proporcional em uma malha aberta, quando é aplicado um desvio em degrau num controlador ajustado para funcionar na ação direta.

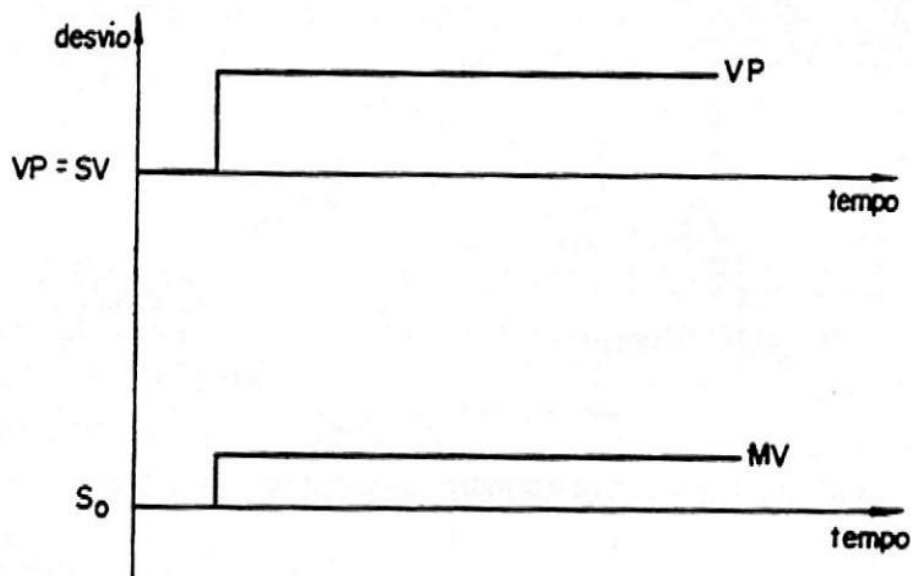


Fig. 3.4 - Movimento do elemento final de controle

A ação proporcional pode ser determinada pela seguinte equação:

$$MV = K_P \cdot DV + S_o \quad (1)$$

Onde:

MV = Sinal de saída do controlador

K

P = Constante de proporcionalidade ou ganho proporcional

DV = Desvio = $|VP - SV|$

S

o = Sinal de saída inicial

V

P = Variável do processo (PV)

SP = SV = Valor Setado (Desejado)

Note que mesmo quando o desvio é zero, há um sinal S_o saindo do controlador cuja finalidade é a de manter o elemento final de controle na posição de regime. E mais, para se obter o controle na ação direta ou reversa, basta mudar a relação de desvio.

Assim, para $DV = (PV - SV)$ tem-se a ação direta e $DV = (SV - PV)$ tem-se a ação reversa.

Um exemplo simples de controle utilizando apenas a ação proporcional é o mostrado na figura 3.5, onde a válvula de controle é aberta ou fechada proporcionalmente à amplitude do desvio.

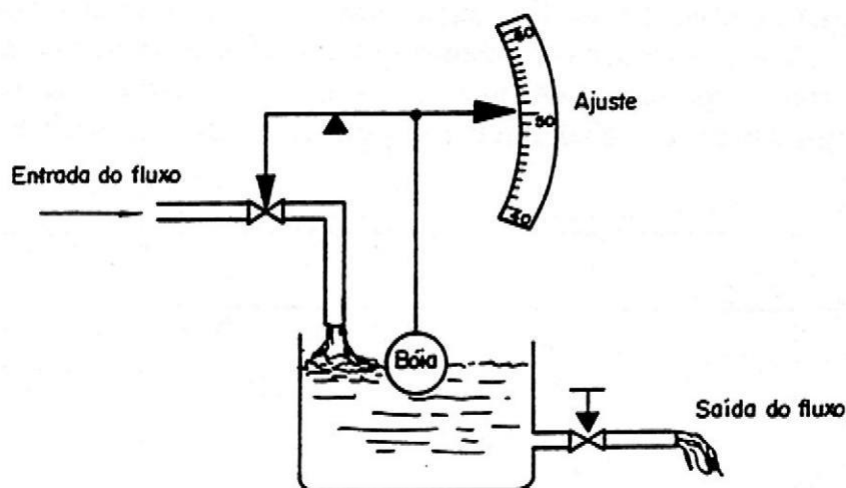


Fig. 3.5 - Exemplo de um sistema simples com ação proporcional

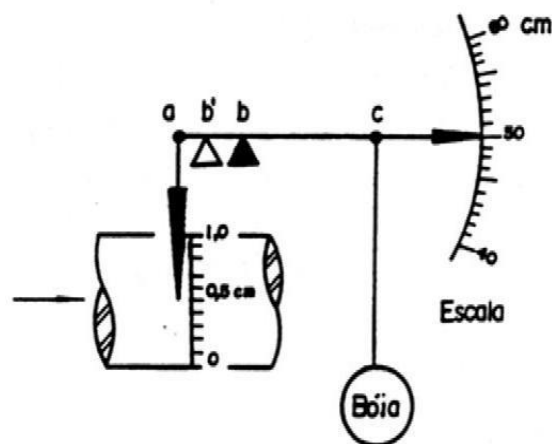


Fig. 3.6 - Controle pela ação proporcional

Para melhor explicar este exemplo, considera-se que a válvula esteja aberta em 50% e que o nível do líquido deva ser mantido em 50cm de altura. E ainda, a válvula tem seu curso total conforme indicado na figura 3.6. Neste caso, o ponto suporte da alavanca deve estar no ponto b para que a relação $ab : bc = 1:100$ seja mantida.

Então, se o nível do líquido descer 1 cm, o movimento da válvula será 1/10, abrindo-se 0,1 cm a mais. Deste modo, se o nível do líquido descer 5cm a válvula ficará completamente aberta. Ou seja, a válvula se abrirá totalmente quando o nível do líquido atingir 45cm. Inversamente, quando o nível atingir 55cm, a válvula se fechará totalmente.

Pode-se portanto concluir que a faixa na qual a válvula vai da situação totalmente aberta para totalmente fechada, isto é, a faixa em que se realiza a ação proporcional será 10cm.

A seguir, se o ponto de apoio for transportado para a situação b' e a relação passar a ser $a.b' : b'.c = 1 : 20$, o movimento da válvula será 1/20 do nível do líquido se este descer 1cm.

Neste caso, a válvula estará totalmente aberta na graduação 40cm e totalmente fechada em 60cm e então, a faixa em que a válvula passa de totalmente aberta para totalmente fechada será igual a 20cm.

Assim, não é difícil concluir que a relação entre a variação máxima da grandeza a ser controlada e o curso total da válvula depende neste caso, do ponto de apoio escolhido. Este ponto de apoio vai determinar uma relação de proporcionalidade.

E como existe uma faixa na qual a proporcionalidade é mantida, esta recebe o nome de faixa proporcional (também chamada de Banda Proporcional).

3.3.1) Faixa Proporcional

É definida como sendo a porcentagem de variação da variável controlada capaz de produzir a abertura ou fechamento total da válvula. Assim, por exemplo, se a faixa proporcional é 20%, significa que uma variação de 20% no desvio produzirá uma variação de 100% na saída, ou seja, a válvula se moverá de totalmente aberta para totalmente fechada quando o erro variar 20% da faixa de medição.

A figura 3.7 mostra a relação entre a abertura da válvula e a variável controlada.

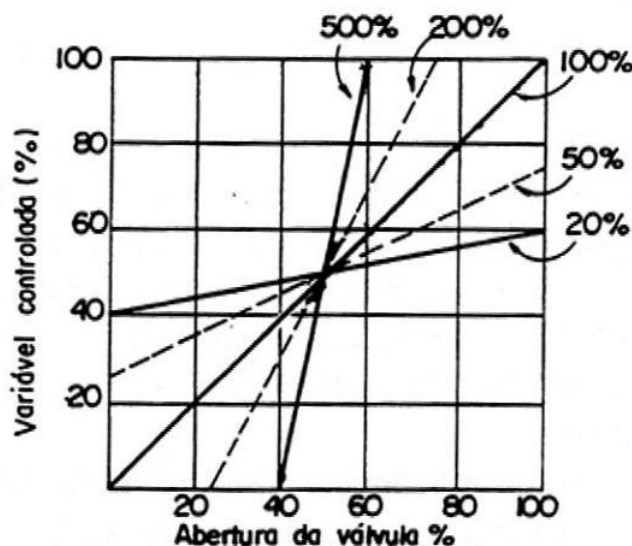


Fig. 3.7 - Representação gráfica de diversas faixas proporcionais

Observando a figura 3.7 chega-se a conclusão de que "quanto menor a faixa proporcional, maior será o movimento da válvula em relação ao mesmo desvio e, portanto, mais eficiente será a ação proporcional".

Porém, se a faixa proporcional for igual a zero, a ação proporcional deixa atuar, passando então a ser um controle de ação liga-desliga.

Então, podemos concluir que existe uma relação bem definida entre a faixa proporcional (FP) e o ganho proporcional (K_p). Esta relação pode ser expressa da seguinte forma:

$$\frac{100}{FP} = \frac{\text{Variação da saída}}{\text{Variação da entrada}}$$

3.3.2) Erro de Off-Set

Verificamos até aqui que ao introduzirmos os mecanismos da ação proporcional, eliminamos as oscilações no processo provocados pelo controle liga-desliga, porém o controle proporcional não consegue eliminar o erro de off-set, visto que quando houver um distúrbio qualquer no processo, a ação proporcional não consegue eliminar totalmente a diferença entre o valor desejado e o valor medido (variável controlada), conforme pode ser visto na figura 3.8.

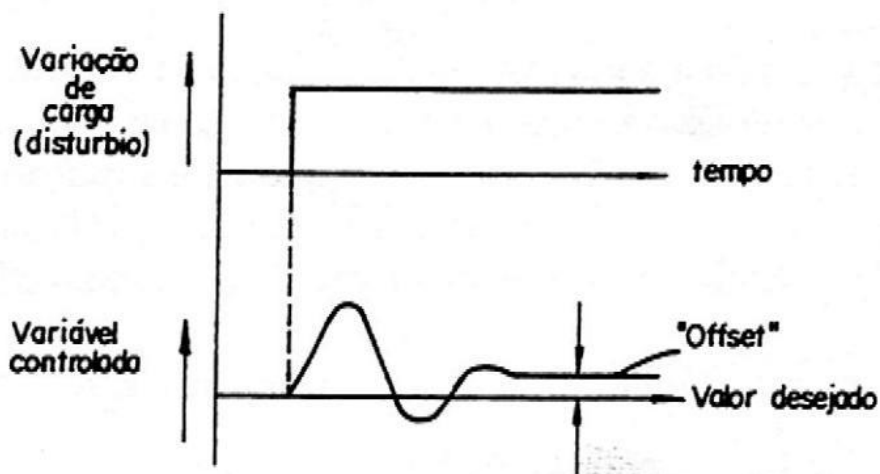


Fig. 3.8 - Resultado do controle pela ação proporcional

Para melhor esclarecer como aparece este erro de "off-set", voltemos à figura 4.6. Para tal, suponha que a válvula esteja aberta em 50% e que a variável controlada (nível) esteja igual ao valor desejado (50cm, por exemplo). Agora, suponha que ocorra uma variação de carga fazendo com que a vazão de saída aumente. O nível neste caso descerá e, portanto, a bóia também, abrindo mais a válvula de controle e assim aumentando a vazão de entrada até que o sistema entre em equilíbrio.

Como houve alteração nas vazões de saída e de entrada de líquido, as condições de equilíbrio sofreram alteração e este será conseguido em outra posição. Esta mudança na posição de equilíbrio então provocará o aparecimento de uma diferença entre os valores medidos e desejados. Esta diferença permanecerá constante enquanto nenhum outro distúrbio acontecer, já que a ação proporcional só atua no momento em que o distúrbio aparece.

Uma observação importante que deve ser feita é de que o valor do erro off-set depende diretamente da faixa proporcional, tornando assim cada vez menor à medida que a faixa proporcional diminuiu. No entanto, a medida que a faixa proporcional diminuiu, aumenta a possibilidade do aparecimento de oscilações, sendo portanto, importante estar atento quando escolher a faixa proporcional de controle.

3.3.3) Características básicas do controle proporcional

Basicamente todo controlador do tipo proporcional apresenta as seguintes características:

- a) Correção proporcional ao desvio
- b) Existência de uma realimentação negativa
- c) Deixa erro de off-set após uma variação de carga

3.3.4) Esquema básico de um controlador proporcional

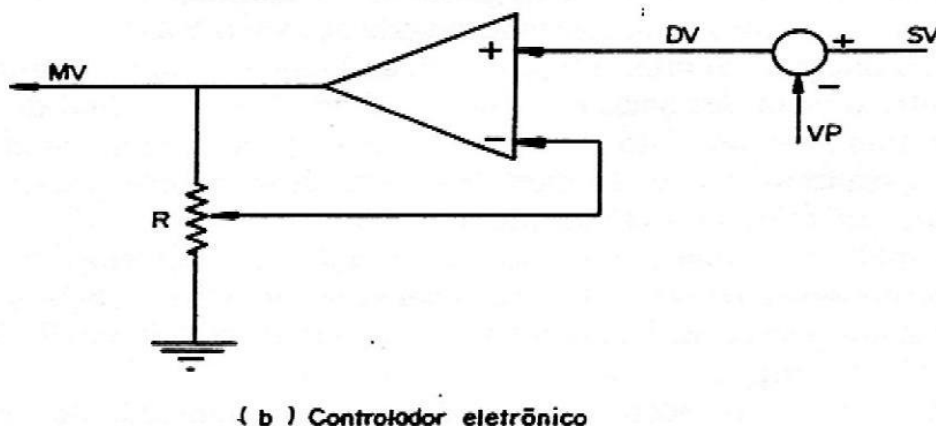
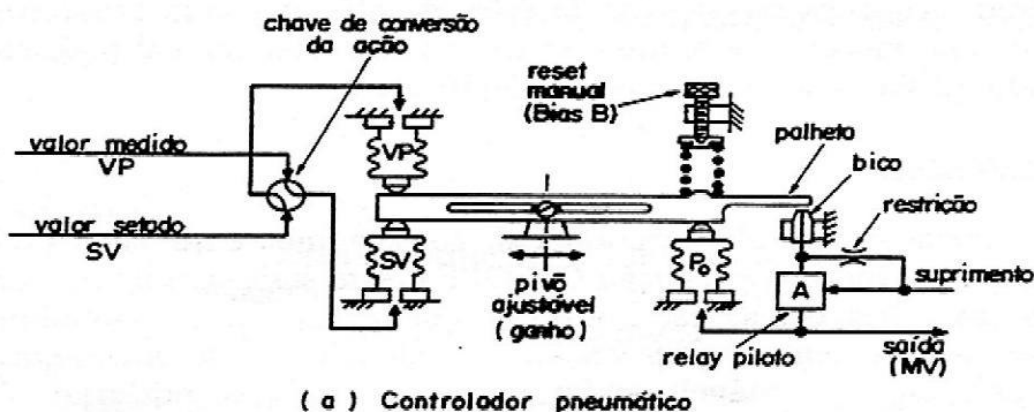


Fig. 3.9 - Controladores proporcionais

3.3.5) Conclusão

Vimos que com a introdução da ação proporcional, se consegue eliminar os inconvenientes oscilações provocadas pelo controle "ON-OFF". No entanto esta ação não consegue manter o sistema em equilíbrio sem provocar o aparecimento do erro de offset caso haja variação na carga, que muitas vezes pode ser contornado pelo operador que de tempos em tempos manualmente faz o reajuste do controle eliminando este erro. Se, entretanto, isto ocorrer com frequência, torna-se desvantajosa a ação de correção do operador e então outro dispositivo deve ser usado.

Assim, sistemas de controle apenas com ação proporcional somente devem ser empregados em processos em que grandes variações de carga são improváveis, que permitem pequenas incidências de erros de offset ou em processos com pequenos tempos mortos. Neste último caso, a faixa proporcional pode ser bem pequena (alto ganho) a qual reduz o erro de offset.

3.4) AÇÃO INTEGRAL

Ao utilizar o controle proporcional, conseguimos eliminar o problema das oscilações provocadas pela ação ON-OFF e este seria o controle aceitável na maioria das aplicações se não houvesse o inconveniente da não eliminação do erro de offset sem a intervenção do operador. Esta intervenção em pequenos processos é aceitável, porém em grandes plantas industriais, isto se torna impraticável. Para resolver este problema e eliminar este erro de offset, desenvolveu-se uma nova unidade denominada ação integral.

A ação integral vai atuar no processo ao longo do tempo enquanto existir diferença entre o valor desejado e o valor medido. Assim, o sinal de correção é integrado no tempo e por isto enquanto a ação proporcional atua de forma instantânea quando acontece um distúrbio em degrau, a ação integral vai atuar de forma lenta até eliminar por completo o erro.

Para melhor estudarmos como atua a ação integral em um sistema de controle, recorreremos à figura 3.10, onde está sendo mostrado como se comporta esta ação quando o sistema é sensibilizado por um distúrbio do tipo degrau em uma malha aberta.

Observe que a resposta da ação integral foi aumentando enquanto o desvio esteve presente, até atingir o valor máximo do sinal de saída (até entrar em saturação).

Assim, quanto mais tempo o desvio perdurar, maior será a saída do controlador e ainda se o desvio fosse maior, sua resposta seria mais rápida, ou seja, a reta da figura 3.10 seria mais inclinada.

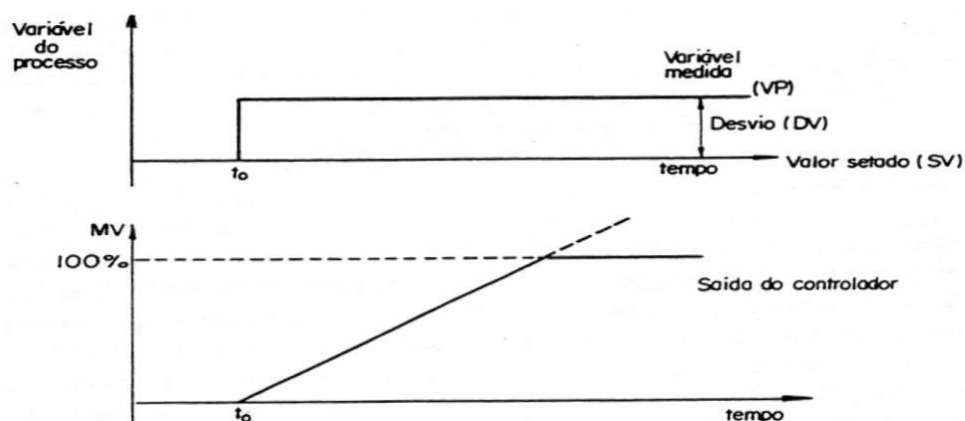


Fig. 3.10 - Resposta da ação integral em distúrbio em degrau

Percebemos então que a resposta desta ação de controle é função do tempo e do desvio e deste modo podemos analiticamente expressá-la pela seguinte equação:

$$\frac{Ds}{Dt} = K_I.DV \quad (2)$$

Onde:

$\frac{ds}{dt}$ = Taxa de variação de saída do controlador DV = desvio
 K_I = ganho integral ou taxa integral.

Na maioria das vezes o inverso de K_I , chamado de tempo integral T_{IK}^{1I} é usado para descrever a ação integral.

$[T_i$ = tempo necessário para que uma repetição do efeito proporcional seja obtido, sendo expresso em minuto por repetição (MPR) ou segundo por repetição (SPR)].

Integrando a equação (2), nós encontramos a saída atual do controlador em qualquer tempo como:

$$MV(t) = K_I \int_0^t DV(t) \cdot dt + S_0 \quad (3)$$

Onde:

$MV(t)$ = saída do controlador para um tempo t qualquer S_0 = saída do controlador para $t = 0$

Esta equação mostra que a saída atual do controlador $MV(t)$, depende do histórico dos desvios desde quando este começou a ser observado em $t = 0$ e por conseguinte ao ser feita a correção do desvio, esta saída não mais retornará ao valor inicial, como ocorre na ação proporcional.

Podemos ver pela equação (2), por exemplo, que se o desvio dobra, a razão de saída do controlador muda em dobro também. A constante K_I significa que pequenos desvios produzem uma grande relação de mudanças de S e vice-versa. A figura 3.11(a) ilustra graficamente a relação entre S , a razão de mudança e o desvio para dois diferentes valores de K_I . A figura 3.11(b) mostra como, para um desvio em degrau, os diferentes valores para MV como função do tempo conforme foi estabelecido pela equação (2). Portanto, podemos concluir que a rápida razão gerada por K_I causa uma saída do controlador muito maior para um particular tempo depois que o desvio é gerado. (OBS.: Figura 3.11)

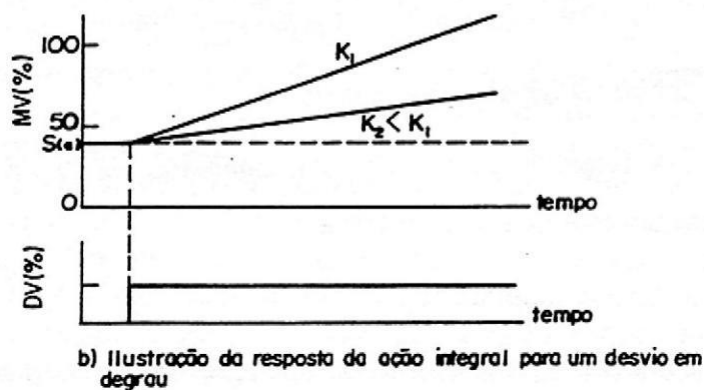


Fig. 3.11 - Ação do controle integral

3.4.1) Características básicas do controle integral:

As principais características do controle integral são:

- a) Correção depende não só do erro mas também do tempo em que ele perdurar.
- b) Ausência do erro de offset.
- c) Quanto maior o erro maior será velocidade de correção.
- d) No controle integral, o movimento da válvula não muda de sentido enquanto o sinal de desvio não se inverter.

3.4.2) Esquema básico de um controlador integral

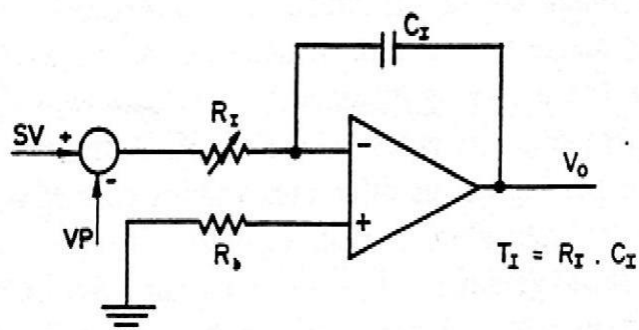


Fig. 3.12 - Controlador integral eletrônico

3.4.3) Conclusão

Vimos que a ação integral foi introduzida principalmente para eliminar o erro de offset deixado pela ação proporcional, atuando então, até que o desvio volte a ser nulo. No entanto, como ela é uma função do tempo, sua resposta é lenta e por isto, desvios grandes em curtos espaços de tempo não são devidamente corrigidos.

Um outro fator importante notado quando se usa este tipo de ação, é que enquanto o desvio não mudar de sentido, a correção (ou seja, o movimento da válvula) não mudará de sentido podendo provocar instabilidade no sistema.

Tipicamente, a ação integral não é usada sozinha, vindo sempre associada à ação proporcional, pois deste modo tem-se o melhor das duas ações de controle.

A ação proporcional corrige os erros instantaneamente e a integral se encarrega de eliminar a longo prazo qualquer desvio que permaneça (por exemplo, erro de offset).

Entretanto, às vezes ela pode ser utilizada sozinha quando o sistema se caracteriza por apresentar por pequenos atrasos de processos e correspondentemente pequenas capacitâncias.

3.5 - AÇÃO PROPORCIONAL + INTEGRAL (AÇÃO P+ I)

Esta é a ação de controle resultante da combinação da ação proporcional e a ação integral. Esta combinação tem por objetivos principais, corrigir os desvios instantâneos (proporcional) e eliminar ao longo do tempo qualquer desvio que permaneça (integral).

Matematicamente esta combinação é obtida pela combinação das equações (1) e (3), sendo então:

$$MV(t) = K_p \cdot DV + K_p \cdot K_I \int_0^t DV \cdot dt + S_o \quad (IV)$$

Na prática, como sempre desejamos conhecer a saída para um tempo conhecido e um erro constante, podemos significar esta equação (IV) que é então assim representada:

$$MV = K_p \cdot DV + K_p \cdot K_I \cdot DV \cdot T + S_o \quad (V)$$

Onde:

T = tempo para o qual se deseja saber a saída MV

A figura 3.13 mostra como esta combinação faz atuar o elemento final de controle quando a variável controlada sofre um desvio em degrau em malha aberta. Em (b) temos o caso em que o controlador está ajustado apenas para atuar na ação proporcional, em (c) ele está ajustado para atuar na ação integral e finalmente em (d) temos as duas ações atuando de forma combinada.

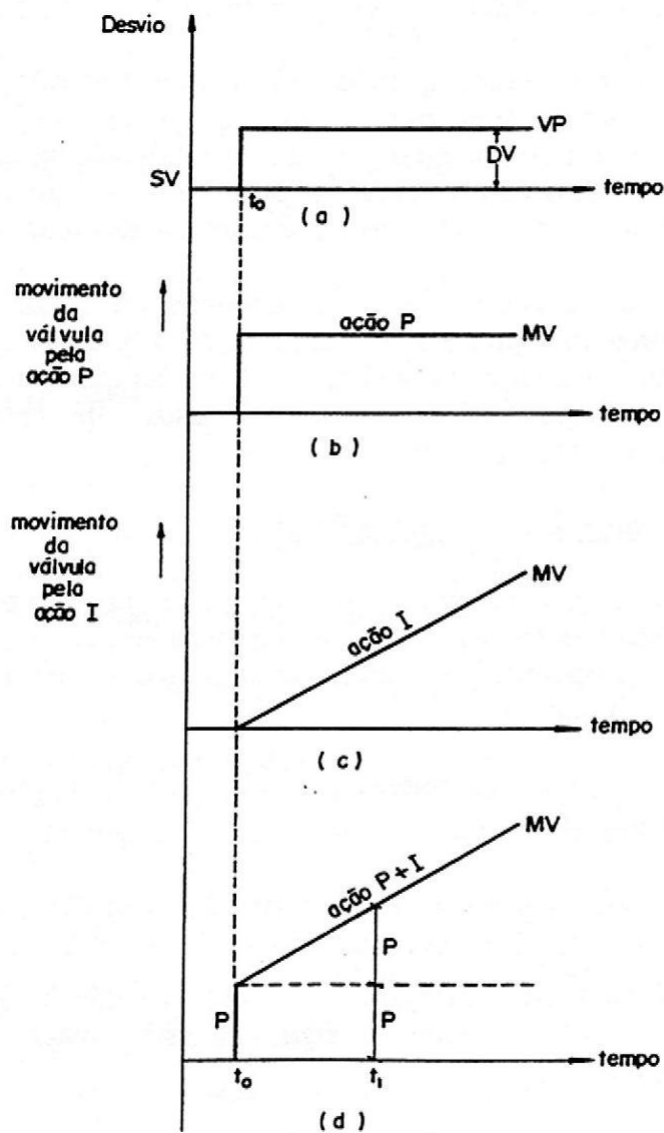


Fig. 3.13 - Resposta em malha aberta das ações P, I e P+ I

Vejamos agora o gráfico da figura 3.14 que representa o sinal de saída de um controlador (P+I) sujeito a um distúrbio, em malha aberta, que após um determinado tempo é eliminado. Observe que neste caso, após cessado o distúrbio, a saída do controlador não mais retorna ao valor inicial. Isto acontece porque devido a atuação da ação integral, uma correção vai sendo incrementada (ou decrementada) enquanto o desvio permanecer. Observe que o sinal de correção é sempre incrementado (ou decrementado) enquanto o desvio se mantém no mesmo sentido.

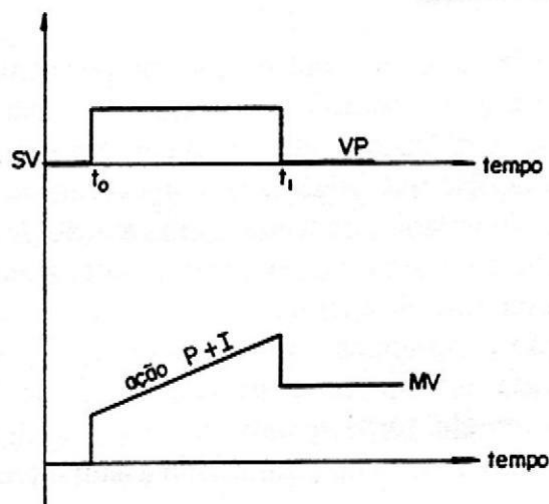


Fig. 3.14 - Resposta em Malha Aberta da Ação P+I

3.5.1) Esquema básico de um controlador P + I.

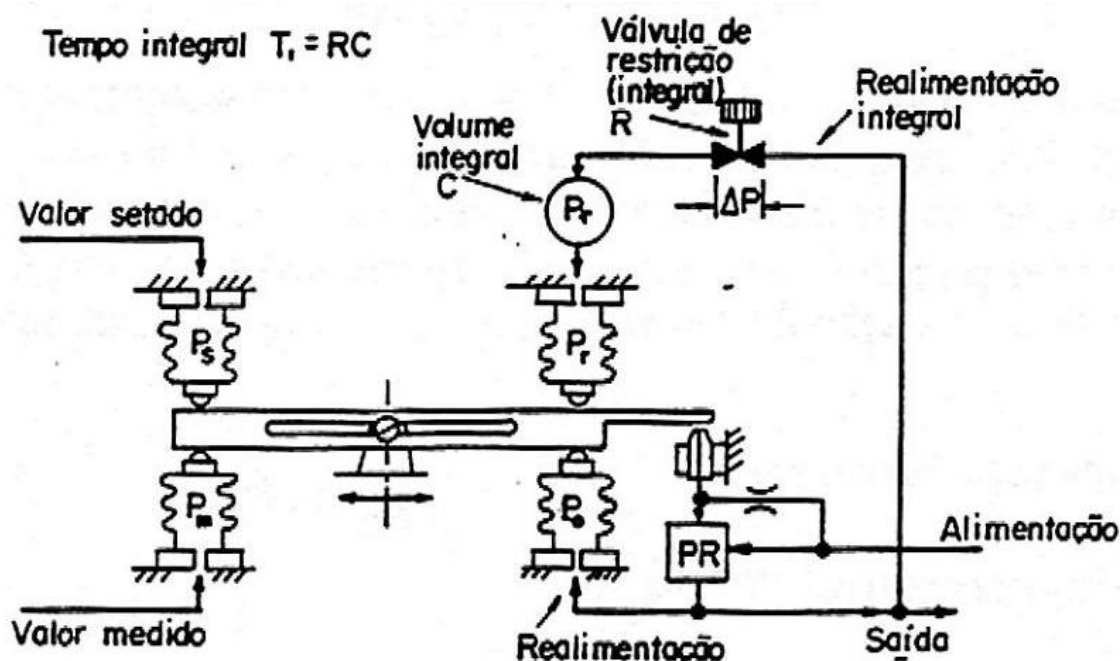


Fig. 3.15 - Exemplo típico de um controlador com ações P e I pneumático

3.5.2) Conclusão

Como notado, através da combinação das ações proporcional e integral, consegue-se eliminar as oscilações e o desvio de offset e por isto essa associação é largamente utilizada em Controle de Processo. No entanto, deve-se estar atento ao utilizar a ação integral, pois se o processo se caracteriza por apresentar mudanças rápidas, esta ação pode vir a introduzir oscilações que implicaria em instabilidade do sistema.

Outro tipo de processo no qual deve-se ter muito cuidado com a ação integral é o processo em batelada, pois no início de sua operação a ação integral pode causar "over-shoot" na variável sob controle.

Por fim, em processo que se caracteriza por ter constante de tempo grande (mudanças lentas) esta associação torna-se ineficiente e uma terceira ação se faz necessário para acelerar a correção. A esta ação dá-se o nome de ação derivativa (ou diferencial).

3.6 - AÇÃO DERIVATIVA (AÇÃO D)

Vimos até agora que o controlador proporcional tem sua ação proporcional ao desvio e que o controlador integral tem sua ação proporcional ao desvio versus tempo. Em resumo, eles só atuam em presença do desvio. O controlador ideal seria aquele que impedisse o aparecimento de desvios, o que na prática seria difícil. No entanto, pode ser obtida a ação de controle que reaja em função da velocidade do desvio, ou seja, não importa a amplitude do desvio, mas sim a velocidade com que ele aparece.

Este tipo de ação é comumente chamado de ação derivativa. Ela atua, fornecendo uma correção antecipada do desvio, isto é, no instante em que o desvio tende a acontecer ela fornece uma correção de forma a prevenir o sistema quanto ao aumento do desvio, diminuindo assim o tempo de resposta.

Matematicamente esta ação pode ser representada pela seguinte equação:

$$\square \frac{MV}{Td_{dt}} \square So \quad (6)$$

Onde:

$$\frac{de}{dt} = \text{Taxa de variação do desvio}$$

So = Saída para desvio zero

Td = Tempo derivativo

O tempo derivativo, também chamado de ganho derivativo, significa o tempo gasto para se obter a mesma quantidade operacional da ação proporcional somente pela ação derivativa, quando o desvio varia numa velocidade constante.

As características deste dispositivo podem ser notadas através dos gráficos da figura 3.16.

No caso (a), houve uma variação em degrau, isto é, a velocidade de variação foi infinita. Neste caso a ação derivativa que é proporcional à velocidade desvio causou uma mudança brusca considerável na variável manipulada.

No caso (b), está sendo mostrada a resposta da ação derivativa para a situação na qual o valor medido é mudado numa razão constante (rampa). A saída derivativa é proporcional à razão de mudança deste desvio.

Assim, para uma grande mudança, temos uma maior saída do desvio à ação derivativa.

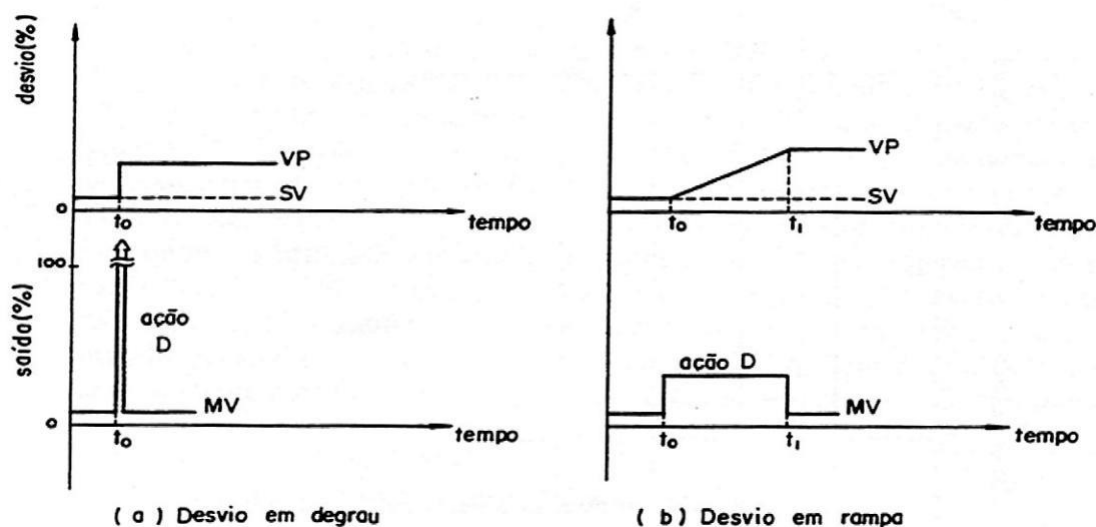


Fig. 3.16 - Resposta da ação derivativa a uma mudança da variável do processo

Analisaremos agora a figura 3.17 que mostra a saída do controlador em função da razão de mudança de desvio. Observe que para uma dada razão de mudança do desvio, existe um único valor de saída do controlador. O tempo traçado do desvio e a nova resposta do controlador, mostram o comportamento desta ação conforme pode ser visto pela figura 3.18.

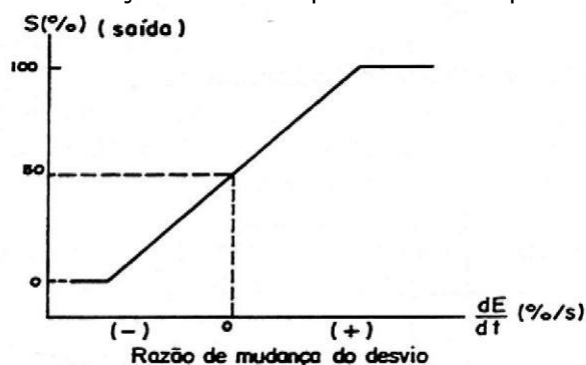


Fig. 3.17 - Ação controle do modo derivativo onde uma saída de 50% foi assumida para o estado derivativo zero.

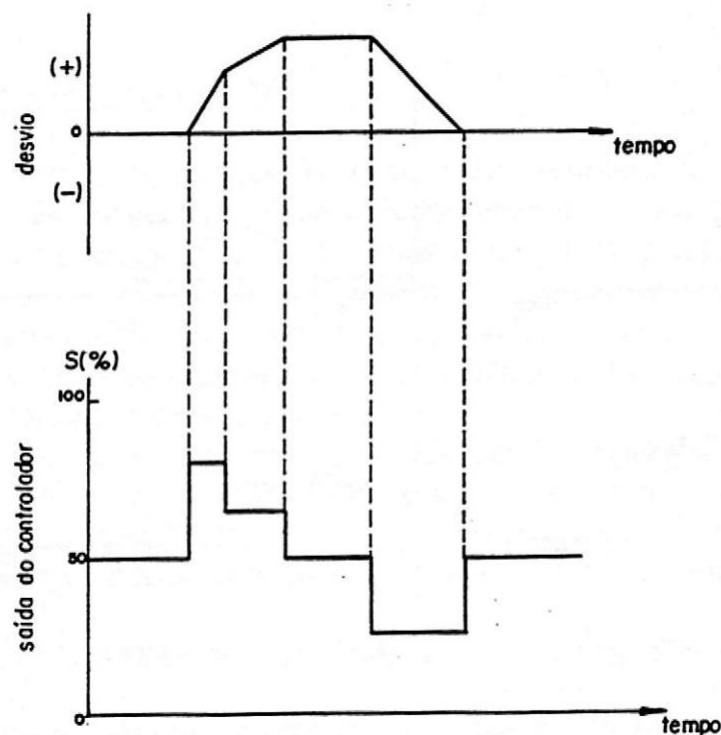


Fig. 3.18 - Ação de controle do modo derivativo para uma amostra de sinal de desvio.

2.6.1) Características básicas do controle derivativo

As principais características do controle derivativo são:

- a) A correção é proporcional à velocidade de desvio.
- b) Não atua caso o desvio for constante.
- c) Quanto mais rápida a razão de mudança do desvio, maior será a correção.

3.6.2) Esquema básico de um controlador derivativo

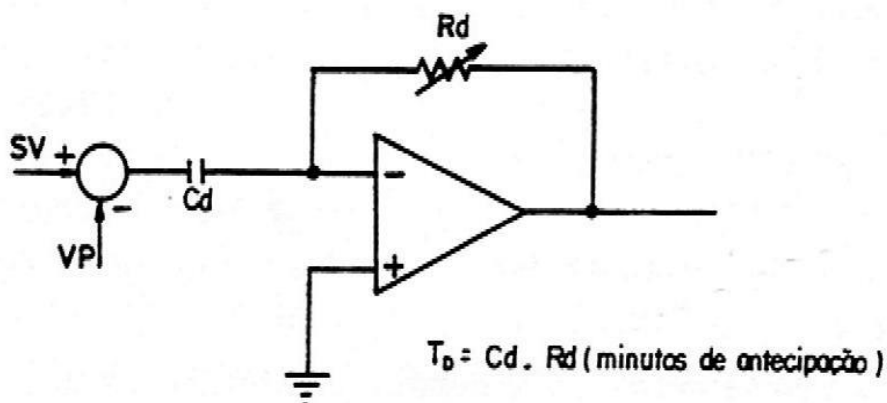


Fig. 3.19 - Esquema elétrico do controle derivativo

3.6.3) Conclusão

Como esta ação de controle depende somente da razão da variação do desvio e não da amplitude deste, não deve ser utilizada sozinha pois tende a produzir movimentos rápidos no elemento final de controle tornando o sistema instável. No entanto, para processos com grandes constantes de tempo, ela pode vir associada à ação proporcional e principalmente às ações proporcional e integral. Esta ação não deve ser utilizada em processos com resposta rápida e não pode ser utilizada em qualquer processo que apresente ruídos no sinal de medição, tal como vazão, pois neste caso a ação derivativa no controle irá provocar rápidas mudanças na medição devido a estes ruídos. Isto causará grandes e rápidas variações na saída do controlador, o qual irá manter a válvula em constante movimento, danificando-a e levando o processo à instabilidade.

3.7 - AÇÃO PROPORCIONAL + INTEGRAL + DERIVATIVA (PID)

O controle proporcional associado ao integral e ao derivativo, é o mais sofisticado tipo de controle utilizado em sistemas de malha fechada.

A proporcional elimina as oscilações, a integral elimina o desvio de off -set, enquanto a derivativa fornece ao sistema uma ação antecipativa evitando previamente que o desvio se torne maior quando o processo se caracteriza por ter uma correção lenta comparada com a velocidade do desvio (por exemplo, alguns controles de temperatura).

A figura 3.20 mostra dois tipos de desvios que aparecem num processo e como cada ação atua neste caso. Em (a), houve um desvio em degrau e a ação derivativa atuou de forma brusca fornecendo uma grande quantidade de energia de forma antecipada no sistema, que pode acarretar instabilidade no sistema pois o sistema responde de forma rápida ao distúrbio. Já em (b), ocorreu um desvio em rampa, ou seja numa velocidade constante e a ação derivativa só irá atuar no ponto de inflexão quando aconteceu fornecendo também uma energia antecipada no sentido de acelerar a correção do sistema, pois agora pode-se observar que o sistema reage de forma lenta quando ocorre o distúrbio.

Como este controle é feito pela associação das três ações de controle, a equação matemática que o representa será:

$$MV = K_P \cdot E + K_I \int_0^t E \cdot dt + K_D \frac{dE}{dt} \quad (7)$$

Onde:

$E = DV =$ desvio

$K_D = T_D =$ ganho derivativo (tempo derivativo)

Esta equação na prática pode ser simplificada para

$$MV = K_P \cdot E + K_P \cdot K_I \cdot E \cdot T + K_P \cdot K_D \cdot V_C$$

Onde:

$T =$ tempo

$V_C =$ velocidade do desvio

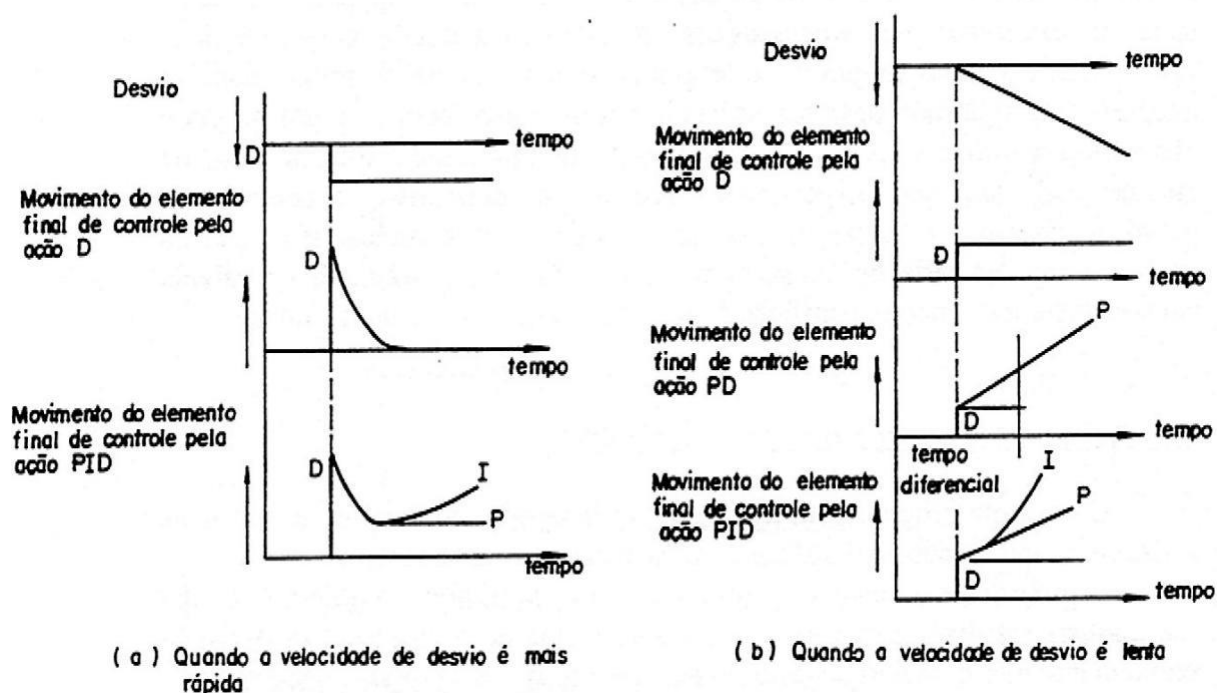


Fig. 3.20 - Movimento do elemento de controle pela ação PID

3.7.1) Esquema básico de um controlador PID

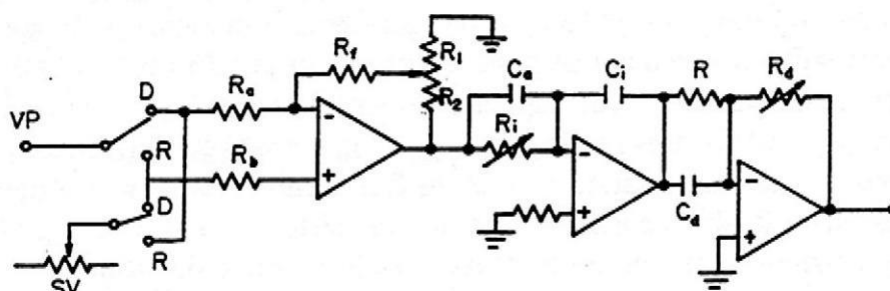


Fig. 3.21 - Esquema básico de um controlador PID eletrônico

3.7.2) Conclusão

A associação das três ações de controle permite-nos obter um tipo de controle que reúne todas as vantagens individuais de cada um deles e por isto, virtualmente ela pode ser utilizada para controle de qualquer condição do processo. Na prática, no entanto, esta associação é normalmente utilizada em processo com resposta lenta (constante de tempo grande) e sem muito ruído, tal como ocorre na maioria dos controles de temperatura.

3.8 - QUADRO COMPARATIVO ENTRE O TIPO DE DESVIO E A RESPOSTA DE CADA AÇÃO

Na figura 3.22, estão sendo mostradas formas de resposta das ações de controle sozinhas ou combinadas, após a ocorrência de distúrbios em degrau, pulso, rampa e senoidal, sendo que o sistema se encontra em malha aberta.

ENTRADAS AÇÕES DE CONTROLE	DEGRAU	PULSO	RAMPA	SENOIDAL
P				
I				
D				
PI				
PD				
PID				

Fig. 3.22 - Resposta das ações de controle a diversos tipos de distúrbios (malha aberta).

3.9) EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

- 1) Um controlador de temperatura cujo range é de 300 K a 440 K tem seu valor desejado ajustado em 384 K . Achar o erro percentual quando a temperatura medida é de 379 K.

SOLUÇÃO:

O erro percentual é definido por:

$$DV = \frac{VP - SV}{Faixa} \cdot 100 = \frac{379 - 384}{440 - 300} \cdot 100 = -3,6\%$$

OBS: Neste caso o desvio é negativo pois o valor medido está abaixo do valor desejado.

- 2) Um sistema está sendo controlado através da ação proporcional direta, se encontra funcionando nas seguintes condições: VP = 50%; SV = 40% e FP = 60%. Calcular a sua saída neste instante sabendo que So é igual a 50%.

SOLUÇÃO:

$$MV = So \pm K_p \cdot DV$$

$$MV = So + \frac{100}{FP} \cdot (VP - SV) \text{ Ação direta}$$

$$MV = 50 + \frac{100}{60} \cdot (50 - 40) \text{ Ação direta}$$

$$MV = 50 + 16,67 = 66\%$$

$$MV = \frac{66,66}{100} \cdot 16 + 4 \text{ (mA)} = 14,66 \text{ (mA)}$$

- 3) Um controlador proporcional de ação reversa é sensibilizado por um desvio se manifesta a uma taxa de 8 % / min. Sabendo-se que a faixa proporcional é de 20%, qual é a variação produzida na saída do controlador ao final dos primeiros 20 segundos?

SOLUÇÃO:

60 s ----- 8%

20 s ----- DV

Então: DV = 8 3

$$MV - So = \pm \frac{100}{FP} \cdot DV$$

$$MV - So = \pm \frac{100}{20} \cdot 8$$

$$3 \text{ } MV - So = \pm 13,34\%$$

$$MV - So = \pm \frac{13,34 \cdot 16}{100}$$

$$MV - So = \pm 2,13 \text{ (mA)}$$

- 4) Um controlador P + I é sensibilizado em um determinado instante por um desvio de 10 %. Considerando que este controlador se encontra em uma bancada de teste (malha aberta), calcular a nova saída 5 segundos após ter sido introduzido o desvio, sabendo-se que:

Faixa Proporcional = 60%

Ganho Integral = 2 rpm (repetições por minuto) Ação do Controlador = Reversa

Saída Anterior So = 12 mA VP>SV

SOLUÇÃO:

$$MV = So \pm (Kp \cdot DV + Kp \cdot Ki \cdot DV \cdot T)$$

$$So = \frac{(12 - 4)}{16} \cdot 100 = 50\%$$

$$MV = 50\% \pm \left(\frac{100 \cdot 10}{60} + \frac{100}{60} \cdot \frac{2}{60} \cdot 10 \cdot 5 \right)$$

$$MV = 50\% \pm (16,66 + 2,77)$$

$$MV = 50 \pm 19,44 \text{ (Ação Reversa)}$$

$$MV = 50 - 19,44$$

$$MV = 30,56\%$$

Ou seja:

$$MV = \frac{30,56}{100} \cdot 16 + 4 = 8,88 \text{ (mA)}$$

- 5) Um controlador P + D é sensibilizado por um desvio que se manifesta com uma velocidade de 20%/min. Considerando VP > SV, ação direta; Kp = 2; KD = 0,25 min e So= 50%, qual a saída do controlador 10 segundos após o início do desvio?

SOLUÇÃO:

$$MV = So \pm (Kp \cdot DV + Kp \cdot KD \cdot \frac{DE}{dt})$$

$$MV = 50\% \pm (Kp \cdot \frac{20 \cdot 10}{60} + Kp \cdot KD \cdot 20)$$

$$MV = 50\% \pm (2 \cdot \frac{20 \cdot 10}{60} + 2 \cdot 0,25 \cdot 20)$$

$$MV = 50\% \pm (6,667 + 10)$$

$$MV = 50 \pm 16,667 \text{ (Ação Direta)}$$

$$MV = 50 + 16,667$$

$$MV = 66,667\%$$

Ou seja:

$$MV = \frac{66,667}{100} \cdot 16 + 4 = 14,66 \text{ (mA)}$$