

**MONITORAMENTO
E CONTROLE
DE PROCESSOS**



PETROBRAS ABASTECIMENTO

EIDER PRUDENTE DE AQUINO
Diretor – Gerente do Abastecimento

LUIZ EDUARDO VALENTE MOREIRA
Gerente Geral de Tecnologia de Refino

AUGUSTO FARIAS
Gerente de Recursos Humanos de Abastecimento

MAURÍCIO LIMA
Coordenador de Formação, Capacitação e Certificação no Abastecimento

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA – CNI Conselho Nacional do SENAI

CARLOS EDUARDO MOREIRA FERREIRA
Presidente

COMISSÃO DE APOIO TÉCNICO E ADMINISTRATIVO AO PRESIDENTE DO CONSELHO NACIONAL DO SENAI

DAGOBERTO LIMA GODOY
Vice-Presidente da CNI

FERNANDO CIRINO GURGEL
Diretor – 1º Tesoureiro da CNI

MAX SCHRAPPE
Vice-Presidente da Federação das Indústrias do Estado de São Paulo

SENAI – DEPARTAMENTO NACIONAL

JOSÉ MANUEL DE AGUIAR MARTINS
Diretor-Geral

MÁRIO ZANONI ADOLFO CINTRA
Diretor de Desenvolvimento

EDUARDO OLIVEIRA SANTOS
Diretor de Operações

ALBERTO BORGES DE ARAÚJO
Coordenador da COTED

MONITORAMENTO E CONTROLE DE PROCESSOS

MARCELO GIGLIO GONÇALVES

TOMO 2



MONITORAMENTO E CONTROLE DE PROCESSOS

© 2003 Marcelo Giglio Gonçalves

Todos os direitos reservados

SENAI

Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
Departamento Nacional
Setor Bancário Norte – Quadra 1 – Bloco C
Edifício Roberto Simonsen
70040-903 – Brasília – DF
Tel.: (61) 317-9001 – Fax: (61) 317-9190
<http://www.dn.senai.br>

PETROBRAS

Petróleo Brasileiro S. A.
Avenida Chile, 65 – 20º andar
20035-900 – Rio de Janeiro – RJ
Tel.: (21) 2534-6013

Série Qualificação Básica de Operadores

1. VIDA E AMBIENTE
2. MONITORAMENTO E CONTROLE DE PROCESSOS
3. SISTEMAS DE PROCESSOS INDUSTRIALIS
4. OPERAÇÃO E PROCESSOS
5. GESTÃO DA QUALIDADE
6. OPERAÇÃO SEM RISCOS

A publicação desta série é uma co-edição entre o Senai e a Petrobras

SENAI

DEPARTAMENTO NACIONAL
UNIDADE DE CONHECIMENTO E
TECNOLOGIA DA EDUCAÇÃO – COTED

PETROBRAS

DIRETORIA DE ABASTECIMENTO

SENAI-RJ

DIRETORIA DE EDUCAÇÃO
GERÊNCIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL – GEP

FICHA CATALOGRÁFICA

Gonçalves, Marcelo Giglio.

Monitoramento e controle de processos, 2 / Marcelo Giglio
Gonçalves. — Rio de Janeiro: Petrobras ; Brasília : SENAI/
DN, 2003.
100 p. : il. — (Série Qualificação Básica de Operadores).

TÍTULO

CDU

Sumário

Lista de ilustrações	7
Apresentação	9
Uma palavra inicial	13
UNIDADE 4	
Instrumentação, controle e automação dos processos industriais	15
Aspectos gerais da área de instrumentação	17
Terminologia	19
Principais sistemas de medidas	27
Telemetria	27
Medição de pressão	31
Dispositivos para medição de pressão	33
Medição de temperatura	39
Conceito	39
Temperatura e calor	40
Escalas de temperatura	41
Medidores de temperatura por dilatação/expansão	43
Efeitos termoelétricos	48
Leis termoelétricas	49
Correlação da FEM em função da temperatura	51
Tipos e características dos termopares	52
Correção da junta de referência	57
Medição de temperatura por termorresistência	59
Medição de nível	61
Métodos de medição de nível de líquido	61

Medição de vazão	71
Tipos de medidores de vazão	72
Medidores especiais de vazão	77
Elementos finais de controle	79
Válvulas de controle	80
Válvula de controle: ação	82
Posicionador	83
Características de vazão de uma válvula	84
Controle e automação industrial	85
Atrasos de tempo do processo	85
Atrasos na malha de controle	86
Ações de um controlador	87
Ações de uma válvula de controle	88
Modos de controle	89
Ajustes de um controlador proporcional	91
Influência do ajuste da faixa proporcional (ou do ganho)	93
Controle proporcional + integral	94
Controle proporcional + derivativo	96
Controle proporcional + integral + derivativo	98

Lista de Ilustrações

UNIDADE 4

FIGURAS

- FIGURA 1 – Malha de controle fechada /18
FIGURA 2 – Malha de controle aberta /18
FIGURA 3 – Indicador /22
FIGURA 4 – Registrador /22
FIGURA 5 – Transmissor /23
FIGURA 6 – Transdutor /23
FIGURA 7 – Controlador /23
FIGURA 8 – Elemento final de controle /24
FIGURA 9 – Sinais utilizados nos fluxogramas de processo /25
FIGURA 10 – Símbolos de instrumentos utilizados
nos fluxogramas de processo /25
FIGURA 11 – Sistema fieldbus /30
FIGURA 12 – Diagrama das escalas /32
FIGURA 13 – Tipos de tubos Bourdon /33
FIGURA 14 – Manômetros de Bourdon tipo C /34
FIGURA 15 – Manômetro de tubo em U /34
FIGURA 16 – Manômetro de tubo inclinado e de reservatório /35
FIGURA 17 – Sensor capacitivo /36
FIGURA 18 – Tira extensiométrica /37
FIGURA 19– Tira extensiométrica /37
FIGURA 20 – Efeito piezoelétrico /37
FIGURA 21 – Termômetros à dilatação de líquido em recipiente de vidro /44
FIGURA 22– Termômetro à dilatação de líquido em recipiente metálico /45

- FIGURA 23 – Termômetro à pressão de gás / 46
- FIGURA 24 – Termômetro bimetálico / 47
- FIGURA 25 – Termopar / 47
- FIGURA 26 – Efeito termoelétrico de Seebeck / 48
- FIGURA 27 – Efeito termoelétrico de Peltier / 49
- FIGURA 28 – Lei do circuito homogêneo / 49
- FIGURA 29 – Lei dos metais intermediários / 50
- FIGURA 30 – Lei das temperaturas intermediárias / 51
- FIGURA 31 – Correlação entre temperatura e FEM / 52
- FIGURA 32 – Correção da junta de referência / 57
- FIGURA 33 – Diferença entre as temperaturas das junções / 58
- FIGURA 34 – Bulbos de resistência / 59
- FIGURA 35 – Régua / 62
- FIGURA 36 – Tanques para medição / 62
- FIGURA 37 – Bóia ou flutuador / 63
- FIGURA 38 – Medição de nível indireta / 63
- FIGURA 39 – Supressão de zero / 64
- FIGURA 40 – Medição em tanques pressurizados / 65
- FIGURA 41 – Medição de nível com selagem / 65
- FIGURA 42 – Sistema de borbulhador / 66
- FIGURA 43 – Medição de nível por empuxo / 67
- FIGURA 44 – Flutuador de forma cilíndrica / 67
- FIGURA 45 – Valores de altura de interface / 68
- FIGURA 46 – Medição por capacidade / 68
- FIGURA 47 – Sonda de proximidade / 68
- FIGURA 48 – Ultra-som / 69
- FIGURA 49 – Nível descontínuo por condutividade / 70
- FIGURA 50 – Nível descontínuo por bóia / 70
- FIGURA 51 – Tipos de medidores de vazão / 72
- FIGURA 52 – Medição de vazão por pressão diferencial / 73
- FIGURA 53 – Rotâmetro / 74
- FIGURA 54 – Placa de orifício / 75
- FIGURA 55 – Tipos de orifício / 76
- FIGURA 56 – Tubo venturi / 77

- FIGURA 57 – Medidor magnético de vazão /77
- FIGURA 58 – Medidor tipo turbina /78
- FIGURA 59 – Válvula de controle /79
- FIGURA 60 – Válvula globo /80
- FIGURA 61 – Válvula borboleta /80
- FIGURA 62 – Atuador direto /81
- FIGURA 63 – Atuador indireto /81
- FIGURA 64 – Castelo normal /81
- FIGURA 65 – Castelo aletado /81
- FIGURA 66 – Castelo alongado /81
- FIGURA 67 – Castelo com foles de vedação /81
- FIGURA 68 – Sede simples /82
- FIGURA 69 – Sede dupla /82
- FIGURA 70 – Posicionador /83
- FIGURA 71 – Curva de reação /86
- FIGURA 72 – Curva de reação /86
- FIGURA 73 – Diagrama em blocos de uma malha de controle fechada /87
- FIGURA 74 – Controlador de ação direta /87
- FIGURA 75 – Controlador de ação inversa /88
- FIGURA 76 – Ações de uma válvula de controle /88
- FIGURA 77 – Controle on-off /89
- FIGURA 78 – Posição da válvula x variável controlada no controle on-off /90
- FIGURA 79 – Posição da válvula x variável controlada no controle on-off
com zona diferencial /90
- FIGURA 80 – Faixa proporcional /92
- FIGURA 81 – Resposta de um controlador proporcional /93
- FIGURA 82 – Ajuste instável /93
- FIGURA 83 – Oscilação contínua /94
- FIGURA 84 – Ajuste estável /94
- FIGURA 85 – Controladores proporcional + integral /95
- FIGURA 86 – Controladores proporcional + derivativo /97
- FIGURA 87 – Comparação dos controladores proporcional, proporcional + integral,
e proporcional + integral + derivativo /98
- FIGURA 88 – Correção dos modos de controle /99

TABELAS

TABELA 1 – Sistema de unidades geométricas e mecânicas /30

TABELA 2 – Conversão de unidades /33

TABELA 3 – Comparação de escalas /42

TABELA 4 – Ponto de solidificação, de ebulação e faixa de uso /44

TABELA 5 – Utilização dos líquidos /45

TABELA 6 – Identificação de termopares /57

QUADROS

QUADRO 1 – Identificação de instrumentos de acordo com a Norma ISA-S5 /24

QUADRO 2 – Identificação funcional dos instrumentos /26

Apresentação

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

Nesse cenário, impõe-se a educação continuada, exigindo que os profissionais busquem atualização constante durante toda a vida; e os operadores das UNIDADES DE NEGÓCIOS DO SISTEMA PETROBRAS incluem-se nessas novas demandas sociais.

É preciso, pois, promover para esses profissionais as condições que propiciem o desenvolvimento de novas aprendizagens, favorecendo o trabalho de equipe, a pesquisa e a iniciativa, entre outros, ampliando suas possibilidades de atuar com autonomia, de forma competente.

Seguindo essa linha de pensamento, o SENAI e a PETROBRAS organizaram o curso QUALIFICAÇÃO BÁSICA DOS OPERADORES DAS UNIDADES DE NEGÓCIOS DO SISTEMA PETROBRAS. Seu objetivo principal é propiciar aos operadores em exercício da função condições de rever conceitos, atualizar e/ou aperfeiçoar conhecimentos, visando

à inclusão do processo de certificação profissional e nacional da PETROBRAS, que ocorrerá na formação específica.

Para realizar o curso, você tem à sua disposição, além dos professores e um ambiente de sala de aula apropriado, este material didático, também bastante útil para orientar sua aprendizagem.

Nele, você vai encontrar os temas a serem trabalhados durante a realização do curso. Por essa razão, é importante ler, atentamente, cada parte que compõe o material, pois, assim, terá mais facilidade de acompanhar as aulas e organizar os conhecimentos adquiridos. Lembramos, no entanto, que será necessário, ainda, que você tenha uma participação efetiva nas atividades de sala de aula, apresentando suas idéias, fazendo perguntas aos professores e demais colegas, assim como ouvindo o que eles têm a dizer, pois também é através dessa troca de experiências que vamos aprendendo sempre e cada vez mais.

JOSÉ MANUEL DE AGUIAR MARTINS
Diretor-Geral
SENAI/DN

EIDER PRUDENTE DE AQUINO
Diretor – Gerente do Abastecimento
PETROBRAS

Uma palavra inicial

A unidade industrial, também chamada de órgão operacional, é uma instalação onde se realiza um conjunto de atividades e operações que tem como objetivo a transformação de matérias-primas em produtos. As unidades industriais cujos processos transformam matérias-primas, tais como metais, plásticos e outros, em produtos, como máquinas, ferramentas e equipamentos para uso final do consumidor (carros, eletrodomésticos etc.), são chamadas de fábricas ou unidades fabris. Já aquelas cujos processos têm "fluidos", como matérias-primas e/ou produtos, são chamadas de indústrias de processo.



Vista noturna de uma refinaria

Esse tipo de indústria utiliza equipamentos (estáticos, dinâmicos e elétricos) e seus acessórios, que compõem os sistemas de uma unidade industrial. O funcionamento com qualidade dos processos industriais exige um controle permanente, sendo necessário manter constantes algumas variáveis (pressão, vazão, temperatura, nível, pH, condutividade, velocidade, umidade etc.).

Nesta publicação, apresentamos os principais equipamentos que compõem os sistemas de uma unidade industrial (estáticos, dinâmicos e elétricos) e seus acessórios. Para isso temos os seguintes objetivos:

- Compreender a função dos equipamentos estáticos e dinâmicos e seus acessórios
- Definir e classificar os equipamentos e seus acessórios
- Compreender seus princípios de funcionamento
- Reconhecer e identificar as características gerais dos equipamentos
- Diferenciar os tipos através da identificação de características específicas relevantes
- Analisar comparativamente as principais características dos diferentes tipos
- Reconhecer os termos usuais

Esperamos assim fornecer o conhecimento teórico básico para a compreensão dos problemas práticos enfrentados no dia-a-dia de uma unidade industrial, além de desenvolver nos participantes desse curso uma visão crítica e o auto-aprendizado.

Unidade 4

Instrumentação, controle e
automação dos processos industriais

Nesta unidade

- Aspectos gerais da área de instrumentação
- Medição de pressão
- Medição de temperatura
- Medição de nível
- Medição de vazão
- Elementos finais de controle
- Controle e automação industrial

"A lei suprema da invenção humana é que só se inventa trabalhando"

Émile-Auguste Chartier Alain

Unidade 4

Aspectos gerais da área de instrumentação

Os processos industriais exigem controle na fabricação de seus produtos. Estes processos são muito variados e abrangem diversos tipos de produtos, como, por exemplo, a fabricação dos derivados do petróleo, produtos alimentícios, a indústria de papel e celulose etc.

Em todos estes processos é absolutamente necessário controlar e manter constantes algumas variáveis, tais como: pressão, vazão, temperatura, nível, pH, condutividade, velocidade, umidade etc. Os instrumentos de medição e controle permitem manter constantes as variáveis do processo, objetivando a melhoria em qualidade, o aumento em quantidade do produto e a segurança.

No princípio da era industrial, o operário atingia os objetivos citados através de controle manual destas variáveis, utilizando somente instrumentos simples (manômetro, termômetro, válvulas manuais etc.), e isto era suficiente, por serem simples os processos. Com o passar do tempo, estes foram se complicando, exigindo um aumento da automação nos processos industriais, através dos instrumentos de medição e controle. Enquanto isso, os operadores iam se liberando de sua atuação física direta no processo e, ao mesmo tempo, ocorria a centralização das variáveis em uma única sala.

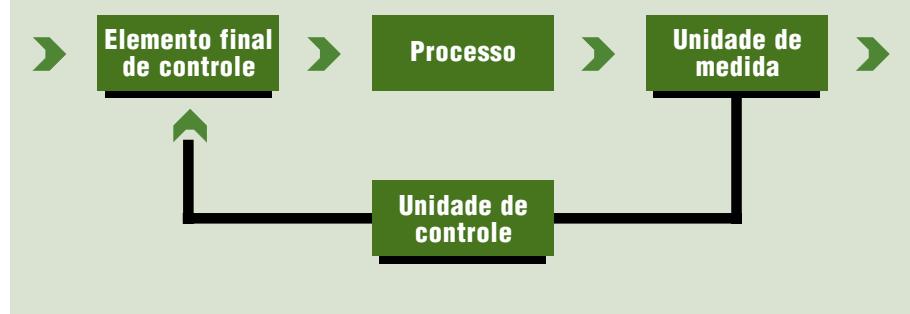
Devido à centralização das variáveis do processo, podemos fabricar produtos que seriam impossíveis por meio do controle manual. Mas, para atingir o nível em que estamos hoje, os sistemas de controle sofreram grandes transformações tecnológicas, como: controle manual, controle mecânico e hidráulico, controle pneumático, controle elétrico, controle eletrônico e atualmente controle digital.

Os processos industriais podem dividir-se em dois tipos: processos contínuos e descontínuos. Em ambos os tipos devem-se manter as variáveis próximas aos valores desejados.

O sistema de controle que permite fazer isto se define como aquele que compara o valor da variável do processo com o valor desejado e toma uma atitude de correção de acordo com o desvio existente, sem a intervenção do operador.

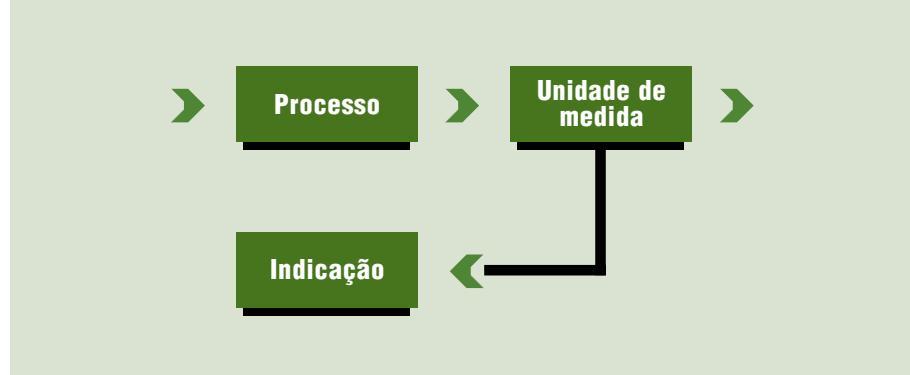
Para que se possa realizar esta comparação e consequentemente a correção, é necessário que se tenha uma unidade de medida, uma unidade de controle e um elemento final de controle no processo.

FIGURA 1 MALHA DE CONTROLE FECHADA



Este conjunto de unidades forma uma malha de controle, que pode ser aberta ou fechada. Na Figura 1 vemos uma malha fechada, e na Figura 2, uma malha de controle aberta.

FIGURA 2 MALHA DE CONTROLE ABERTA



Terminologia

Os instrumentos de controle empregados na indústria de processos (química, siderúrgica, papel etc.) têm sua própria terminologia. Os termos utilizados definem as características próprias de medida e controle dos diversos instrumentos: indicadores, registradores, controladores, transmissores e válvulas de controle.

A terminologia empregada é unificada entre os fabricantes, os usuários e os organismos que intervêm direta ou indiretamente no campo da instrumentação industrial.

■ FAIXA DE MEDIDA (*range*)

Conjunto de valores da variável medida que estão compreendidos dentro do limite superior e inferior da capacidade de medida ou de transmissão do instrumento. Expressa-se determinando os valores extremos.

EXEMPLO

100 a 500m³ 0 a 20psi

■ ALCANCE (*span*)

É a diferença algébrica entre o valor superior e o inferior da faixa de medida do instrumento.

EXEMPLO

Em um instrumento com
range de 100 a 500m³, seu
span é de 400m³

■ ERRO

É a diferença entre o valor lido ou transmitido pelo instrumento em relação ao valor real da variável medida. Se tivermos o processo em regime permanente, chamaremos de *erro estático*, que poderá ser positivo ou negativo, dependendo da indicação do instrumento, o qual poderá estar indicando a mais ou menos. Quando tivermos a variável alterando seu valor ao longo do tempo, teremos um atraso na transferência de energia do

meio para o medidor. O valor medido estará geralmente atrasado em relação ao valor real da variável. Esta diferença entre o valor real e o valor medido é chamada de *erro dinâmico*.

Exatidão

Podemos definir como a aptidão de um instrumento de medição para dar respostas próximas a um valor verdadeiro. A exatidão pode ser descrita de três maneiras:

-  Percentual do Fundo de Escala (% do FE)
-  Percentual do *Span* (% do *span*)
-  Percentual do Valor Lido (% do VL)

EXEMPLO

Para um sensor de temperatura com *range* de 50 a 250°C e valor medindo 100°C, determine o intervalo provável do valor real para as seguintes condições :

 **Exatidão 1% do Fundo de Escala**

$$\text{Valor real} = 100^\circ\text{C} \pm (0,01 \times 250) = 100^\circ\text{C} \pm 2,5^\circ\text{C}$$

 **Exatidão 1% do *Span***

$$\text{Valor real} = 100^\circ\text{C} \pm (0,01 \times 200) = 100^\circ\text{C} \pm 2,0^\circ\text{C}$$

 **Exatidão 1% do Valor Lido (Instantâneo)**

$$\text{Valor real} = 100^\circ\text{C} \pm (0,01 \times 100) = 100^\circ\text{C} \pm 1,0^\circ\text{C}$$

RANGEABILIDADE (largura de faixa)

É a relação entre o valor máximo e o valor mínimo, lidos com a mesma exatidão na escala de um instrumento.

EXEMPLO

Para um sensor de vazão cuja escala é 0 a 300gpm (galões por minuto), com exatidão de 1% do *span* e rangeabilidade 10:1, a exatidão será respeitada entre 30 e 300gpm

ZONA MORTA

É a máxima variação que a variável pode ter sem que provoque alteração na indicação ou sinal de saída de um instrumento.

EXEMPLO

Um instrumento com *range* de 0 a 200°C e uma zona morta de:

$$0,01\% = 0,1 \times \frac{200}{100} = \pm 0,2^\circ\text{C}$$

SENSIBILIDADE

É a mínima variação que a variável pode ter, provocando alteração na indicação ou sinal de saída de um instrumento.

EXEMPLO

Um instrumento com *range* de 0 a 500°C e com uma sensibilidade de 0,05% terá valor de:

$$0,05\% = \frac{500}{100} = \pm 0,25^\circ\text{C}$$

HISTERESE

É o erro máximo apresentado por um instrumento para um mesmo valor em qualquer ponto da faixa de trabalho, quando a variável percorre toda a escala nos sentidos ascendente e descendente.

Expressa-se em percentagem do *span* do instrumento.

Deve-se destacar que a expressão zona morta está incluída na histerese.

EXEMPLO

Num instrumento com *range* de -50°C a 100°C, sendo sua histerese de $\pm 0,3\%$, o erro será 0,3% de 150°C = $\pm 0,45^\circ\text{C}$

REPETIBILIDADE

É a máxima diferença entre diversas medidas de um mesmo valor da variável, adotando sempre o mesmo sentido de variação. Expressa-se em percentagem do *span* do instrumento. O termo repetibilidade não inclui a histerese.

FUNÇÕES DE INSTRUMENTOS

Podemos denominar os instrumentos e dispositivos utilizados em instrumentação de acordo com a função que desempenham no processo.

INDICADOR

Instrumento que dispõe de um ponteiro e de uma escala graduada na qual podemos ler o valor da variável. Existem também indicadores digitais que mostram a variável em forma numérica com dígitos ou barras gráficas, como podemos observar na Figura 3.

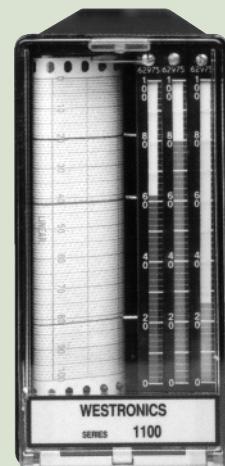
FIGURA 3 INDICADOR



REGISTRADOR

Instrumento que registra a variável através de um traço contínuo ou pontos em um gráfico, como podemos observar na Figura 4.

FIGURA 4 REGISTRADOR



TRANSMISSOR

A Figura 5 apresenta um instrumento que determina o valor de uma variável no processo através de um elemento primário, tendo o mesmo sinal de saída (pneumático ou eletrônico), cujo valor varia apenas em função da variável do processo.

FIGURA 5 TRANSMISSOR**FIGURA 6 TRANSDUTOR**

TRANSDUTOR

Temos na Figura 6 um instrumento que recebe informações na forma de uma ou mais quantidades físicas, modifica, caso necessário, estas informações e fornece um sinal de saída resultante. Dependendo da aplicação, o transdutor pode ser um elemento primário, um transmissor ou outro dispositivo. O conversor é um tipo de transdutor que trabalha apenas com sinais de entrada e saída padronizados.

CONTROLADOR

A Figura 7 mostra um instrumento que compara a variável controlada com um valor desejado e fornece um sinal de saída a fim de manter a variável controlada em um valor específico ou entre valores determinados. A variável pode ser medida diretamente pelo controlador ou indiretamente através do sinal de um transmissor ou transdutor.

FIGURA 7 CONTROLADOR

ELEMENTO FINAL DE CONTROLE

Observe na Figura 8 esse instrumento. Ele modifica diretamente o valor da variável manipulada de uma malha de controle.

Além dessas denominações, os instrumentos podem ser classificados em instrumentos de painel, campo, à prova de explosão, poeira, líquido etc. Combinações dessas classificações são efetuadas formando instrumentos de acordo com as necessidades.

FIGURA 8 ELEMENTO FINAL DE CONTROLE



Identificação de instrumentos

As normas de instrumentação estabelecem símbolos, gráficos e codificação para identificação alfanumérica de instrumentos ou funções programadas, que deverão ser utilizadas nos diagramas e malhas de controle de projetos de instrumentação. De acordo com a norma ISA-S5, cada instrumento ou função programada será identificado por um conjunto de letras que o classifica funcionalmente e um conjunto de algarismos que indica a malha à qual o instrumento ou função programada pertence.

Eventualmente, para completar a identificação, poderá ser acrescido um sufixo. O Quadro 1 mostra um exemplo de instrumento identificado de acordo com a norma preestabelecida.

QUADRO 1 IDENTIFICAÇÃO DE INSTRUMENTOS

De acordo com a Norma ISA-S5

P	R C	001	02	A
Variável	Função	Área da atividade	Nº seqüencial da malha	Sufixo
Identificação funcional		Identificação da malha		
Identificação do instrumento				

P = Variável medida – Pressão

R = Função passiva ou de informação – Registrador

C = Função ativa ou de saída – Controlador

001 = Área de atividade onde o instrumento atua

02 = Número seqüencial da malha

A = Sufixo

As simbologias apresentadas nas Figuras 9 e 10 são utilizadas em fluxogramas de processo e engenharia e seguem a Norma ANSI/ISA-S5.1.

FIGURA 9 SINAIS UTILIZADOS NOS FLUXOGRAMAS DE PROCESSO

_____	Suprimento ou impulso
#####	Sinal pneumático
	Sinal hidráulico
~~~~~	Sinal eletromagnético ou sônico guiado
---o---	Ligação por software
****	Sinal binário pneumático
-----	Sinal não-definido
	Sinal elétrico
*****	Tubo capilar
~~~	Sinal eletromagnético ou sônico não-guiado
-o-o-	Ligação mecânica
----	Sinal binário elétrico

FIGURA 10 SÍMBOLOS DE INSTRUMENTOS

Utilizados nos fluxogramas de processo

Instrumentos	Painel principal acessível ao operador	Montado no campo	Painel auxiliar acessível ao operador	Painel auxiliar não-acessível ao operador
Instrumentos discretos	○	○	○	○
Instrumentos compartilhados	□	□	□	□
Computador de processo	○	○	○	○
Controlador lógico programável	△	△	△	△

QUADRO 2 IDENTIFICAÇÃO FUNCIONAL DOS INSTRUMENTOS

PRIMEIRA LETRA		LETROS SUCESSIVAS		
Variável medida	Letra de modificação	Função de leitura passiva	Função de saída	Letra de modificação
A Analisador	Alarme	Alarme		
B Queimador (chama)	Botão de pressão			
C Condutibilidade elétrica			Controlador	
D Densidade ou peso específico	Diferencial			
E Tensão (Fem)		Elemento primário		
F Vazão	Relação			
G Medida dimensional		Visor		
H Comando manual	Entrada manual			Alto
I Corrente elétrica		Indicação ou Indicador		
J Potência	Varredura			
K Tempo ou programa		Cálculos em sistema digital		
L Nível		Lâmpada piloto		Baixo
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 freqüência	Velocidade/ Chave de segurança		Interruptor ou chave	
T Temperatura			Transmissão Transmissor	
U Multivariável		Cálculo feito por computador	Multifunção	Multifunção
V Vibração			Válvula	
W Peso ou força		Poço		
X ou Y Escolha do usuário		Solenóide / Conversor de sinal	Relé ou computador	
Z Posição / Deslocamento			El. final de controle	

Como se nota no Quadro 2, pode-se obter combinações possíveis de acordo com o funcionamento dos dispositivos automáticos.

EXEMPLO

T = Temperatura	R = Registrador	P = Pressão	I = Indicador
F = Vazão	V = Válvula	L = Nível	G = Visor

Principais sistemas de medidas

Os sistemas podem ser classificados quanto à natureza de suas unidades fundamentais, quanto ao valor dessas unidades e também quanto às relações escolhidas na determinação dos derivados.

Os principais sistemas são:

SISTEMA MÉTRICO DECIMAL

Tem como unidades fundamentais o metro, o quilograma e o segundo (MKS)

SISTEMA FÍSICO OU CEGESIMAL

Tem como unidades fundamentais o centímetro, o grama e o segundo (CGS)

SISTEMA INDUSTRIAL FRANCÊS

Tem como unidades fundamentais o metro, a tonelada e o segundo (MTS), definidas em função do sistema métrico decimal

SISTEMA INGLÊS

Tem como unidades fundamentais o pé (*foot*), a libra (*pound*) e o segundo (*second*)

Telemetria

Chamamos de telemetria a técnica de transportar medições obtidas no processo a distância, em função de um instrumento transmissor.

A transmissão a distância dos valores medidos está tão intimamente relacionada com os processos contínuos, que a necessidade e as vantagens da aplicação da telemetria e do processamento contínuo se entrelaçam.

Um dos fatores que se destacam na utilização da telemetria é a possibilidade de centralizar instrumentos e controles de um determinado processo em painéis de controle ou em uma sala de controle.

VANTAGENS DA TELEMETRIA

- ✓ Os instrumentos agrupados podem ser consultados mais fácil e rapidamente, possibilitando à operação uma visão conjunta do desempenho da unidade
- ✓ Podemos reduzir o número de operadores com simultâneo aumento da eficiência do trabalho
- ✓ Cresce, consideravelmente, a utilidade e a eficiência dos instrumentos em face das possibilidades de pronta consulta, manutenção e inspeção, em situação mais acessível, mais protegida e mais confortável



Transmissores

Os transmissores são instrumentos que medem uma variável do processo e a transmitem, a distância, a um instrumento receptor, indicador, registrador, controlador ou a uma combinação destes. Existem vários tipos de sinais de transmissão: pneumáticos, elétricos, hidráulicos e eletrônicos.

■ TRANSMISSÃO PNEUMÁTICA

Em geral, os transmissores pneumáticos geram um sinal pneumático variável, linear, de 3 a 15psi (libras força por polegada ao quadrado) para uma faixa de medidas de 0 a 100% da variável. Esta faixa de transmissão foi adotada pela SAMA (*Scientific Apparatus Makers Association*), Associação de Fabricantes de Instrumentos, e pela maioria dos fabricantes de transmissores e controladores dos Estados Unidos. Podemos, entretanto, encontrar transmissores com outras faixas de sinais de transmissão. Por exemplo: de 20 a 100kPa.

Nos países que utilizam o sistema métrico decimal, adotam-se as faixas de 0,2 a 1kgf/cm² que equivalem, aproximadamente, de 3 a 15psi.

O alcance do sinal no sistema métrico é cerca de 5% menor que o sinal de 3 a 15psi. Este é um dos motivos pelos quais devemos calibrar os instrumentos de uma malha (transmissor, controlador, elemento final de controle etc.), sempre utilizando uma mesma norma.

Note-se que o valor mínimo do sinal pneumático também não é zero, e sim 3psi ou 0,2kgf/cm². Deste modo, conseguimos calibrar corretamente o instrumento, comprovando sua correta calibração e detectando vazamentos de ar nas linhas de transmissão.

Percebe-se que, se tivéssemos um transmissor pneumático de temperatura de *range* de 0 a 200°C e o mesmo mantivesse o bulbo a 0°C e um sinal de saída de 1psi, este estaria descalibrado.

Se o valor mínimo de saída fosse 0psi, não seria possível fazermos esta comparação rapidamente. Para que pudéssemos detectá-lo, teríamos de esperar um aumento de temperatura para que tivéssemos um sinal de saída maior que 0 (o qual seria incorreto).

■ TRANSMISSÃO ELETRÔNICA

Os transmissores eletrônicos geram vários tipos de sinais em painéis, sendo os mais utilizados: 4 a 20 mA, 10 a 50 mA e 1 a 5 V. Temos estas discrepâncias nos sinais de saída entre diferentes fabricantes, porque tais ins-

trumentos estão preparados para uma fácil mudança do seu sinal de saída. A relação de 4 a 20 mA, 1 a 5 V está na mesma relação de um sinal de 3 a 15psi de um sinal pneumático.

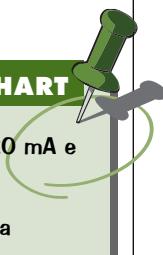
O "zero vivo" utilizado, quando adotamos o valor mínimo de 4 mA, oferece a vantagem também de podermos detectar uma avaria (rompimento dos fios), que provoca a queda do sinal, quando ele está em seu valor mínimo.

■ PROTOCOLO HART (Highway Adress Remote Transducer)

Consiste num sistema que combina o padrão 4 a 20 mA com a comunicação digital. É um sistema a dois fios com taxa de comunicação de 1.200 bits/s (BPS) e modulação FSK (*Frequency Shift Keying*). O Hart é baseado no sistema mestre/escravo, permitindo a existência de dois mestres na rede simultaneamente.

VANTAGENS DO PROTOCOLO HART

- ✓ Usa o mesmo par de cabos para o 4 a 20 mA e para a comunicação digital
- ✓ Usa o mesmo tipo de cabo empregado na instrumentação analógica
- ✓ Dispõe de equipamentos de vários fabricantes



As desvantagens são que existe uma limitação quanto à velocidade de transmissão das informações e a falta de economia de cabeamento (precisa-se de um par de fios para cada instrumento).

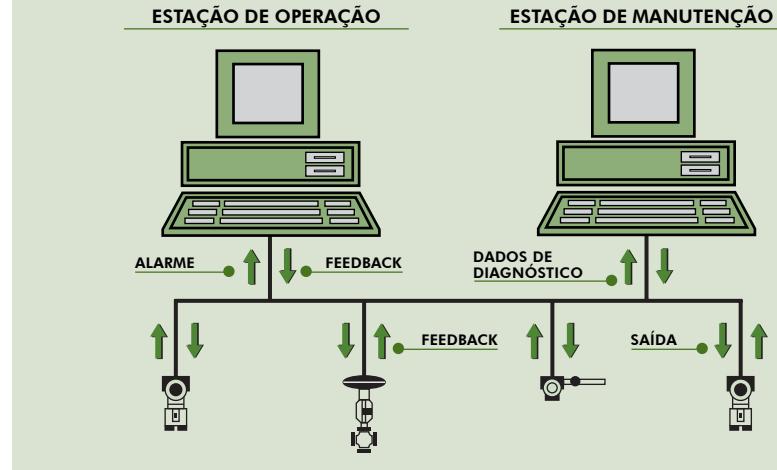
■ FIELDBUS

É um sistema de comunicação digital bidirecional, que interliga equipamentos inteligentes de campo com o sistema de controle ou com equipamentos localizados na sala de controle, como mostra a Figura 11.

Este padrão permite comunicação entre uma variedade de equipamentos, tais como: transmissores, válvulas, controladores, CLP etc. Eles podem ser de fabricantes diferentes (interoperabilidade) e ter controle distribuído (cada instrumento tem a capacidade de processar um sinal recebido e enviar informações a outros instrumentos para correção de uma variável – pressão, vazão, temperatura etc.).

Uma grande vantagem é a redução do número de cabos do controlador aos instrumentos de campo. Apenas um par de fios é o suficiente para a interligação de uma rede *fieldbus*, como se pode observar na Figura 11.

FIGURA 1.1 SISTEMA FIELDBUS



Na Tabela 1, você encontrará alguns sistemas de unidades geométricas e mecânicas que o ajudarão na aplicação de alguns conceitos básicos.

TABELA 1 SISTEMA DE UNIDADES GEOMÉTRICAS E MECÂNICAS

GRANDEZAS	DEFINIÇÃO	DIMENSÃO	FÍSICO (CGS)	DECIMAL (MKS)	GRAVITATÓRIO (MKFS)	PRÁTICO INGLÊS
Comprimento	L	L	centímetro (cm)	metro (m) mícron (μ) = 10^{-6} m angstrom(A) = 10^{-10} m	metro (m)	foot (ft) = $1/3$ Yd = 12 in = $30,48$ cm
Massa	M	M	grama (g)	quilograma (kg)	($9,81$ kg)	($32,174$ pd)
Tempo	t	t	segundo (seg)	segundo (seg)	segundo (seg)	second (sec)
Superfície	S^2	S^2	cm^2	m^2	m^2	square-foot = $929cm^2$ square-inch = $6,45cm^2$
Volume	V^3	V^3	cm^3	m^3	m^3	cubic-foot = $28.317cm^3$ cubic-inch = $16,39cm^3$
Velocidade	$v = \frac{e}{t}$	LT^{-1}	cm/seg	m/seg $1m/seg = 197$ ft/min	m/seg $1m/seg = 197$ ft/min	foot per second (ft/sec) ft/min = $0,5076$ cm/s
Aceleração	$y = \frac{v}{t}$	LT^{-2}	cm/seg ²	m/seg^2	m/seg^2	ft/sec ²
Força	$F = m \cdot y$	$M \cdot L \cdot T^{-2}$	dina (d) ($m = 1$ g; $y = 1$ cm/ss) Megadina (M) $= 10^6$ dinas	Giorgi Newton (n) ($m = 1$ kg; $y = 1$ m/seg ²) $= 10^5$ d	quilograma-força(kgf) $(m = 1$ kg; $y = 9,81$ m/seg ²) $\times 10^3 \times 981 =$ dinas $\times 10^3 \times 9,81 =$ sth	pound (pd) $(m = 1$ pd; $y = 32,174$ ft/sec ²) $= 0,4536$ kgf = 444981 d $= 7000$ grains
Trabalho	$T = F \cdot x \cdot e$	$M \cdot S^2 \cdot T^{-3}$	erg ($F = 1$ d; $e = 1$ cm)	Joule (j) ($F = 1$ n; $e = 1$ m) $= 10^7$ ergs	quilográmetro (kgm) ($F = 1$ kgf; $e = 1$ m) $= 9,81$ joules	foot-pound (ft.pd) ($f = 1$ pd; $e = 1$ ft) $= 0,1383$ kgm = $1,3563$ j
Potência	$w = \frac{T}{t}$	$M \cdot S^2 \cdot T^{-3}$	erg/seg ($T = 1$ erg; $t = 1$ seg)	Watt (w) ($T = 1$ j; $1 = 1$ seg) $= 10^7$ ergs/seg $= 44,8$ ft. pd/min	kgm/seg Cavalo-vapor (C.V.) $= 75$ kgm/seg $= 736$ watts	foot pound per second Horse Power (HP) $= 76$ kgm/seg (75) $= 33000$ ft.pd/min
Pressão	$P = \frac{F}{A}$	$M \cdot L^{-1} \cdot T^{-2}$	bária ($F = 1$ d; $S^2 = 1$ cm ²) Bar = 10^5 bárias ($F = 1$ M; $s^2 = 1$ cm ²)	Pascal ($F = 1$ n; $S^2 = 1$ m ²) $= 10$ bárias	$kgf/cm^2 = 1000$ gf/cm ² kgf/m ² atm = 1033 gf/cm ² (em Hg = 76 cm)	pd/in ² = $70,308$ gf/cm ² pd/ft ² atm = $11,692$ pd/in ²

Unidade 4

Medição de pressão

Medição de pressão é o mais importante padrão de medida, pois as medidas de vazão, nível etc. podem ser feitas utilizando-se esse processo.

Pressão é definida como uma força atuando em uma unidade de área.

$$P = \frac{F}{A}$$

P = Pressão F = Força A = Área

PRESSÃO ATMOSFÉRICA

É a pressão exercida pela atmosfera terrestre medida em um barômetro. No nível do mar esta pressão é aproximadamente de 760mmHg

PRESSÃO RELATIVA

É a pressão medida em relação à pressão atmosférica, tomada como unidade de referência

PRESSÃO ABSOLUTA

É a soma da pressão relativa e atmosférica. Também se diz que é medida a partir do vácuo absoluto

IMPORTANTE

Ao se exprimir um valor de pressão, deve-se determinar se a pressão é relativa ou absoluta. O fato de se omitir esta informação na indústria significa que a maior parte dos instrumentos mede pressão relativa

EXEMPLO

3kgf/cm² ABS ➤ Pressão Absoluta
4kgf/cm² ➤ Pressão Relativa

PRESSÃO NEGATIVA OU VÁCUO

É quando um sistema tem pressão relativa menor que a pressão atmosférica

PRESSÃO DIFERENCIAL

É a diferença entre duas pressões, representada pelo símbolo ΔP (delta P). Essa diferença de pressão normalmente é utilizada para medir vazão, nível, pressão etc.

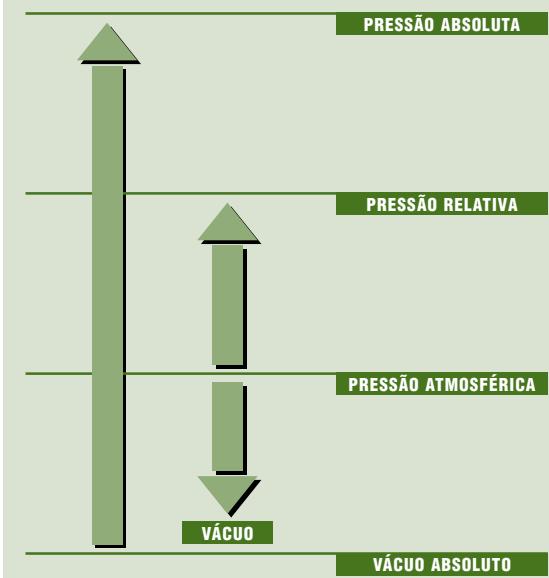
PRESSÃO ESTÁTICA

É o peso exercido por um líquido em repouso ou que esteja fluindo perpendicularmente à tomada de impulso, por unidade de área exercida

PRESSÃO DINÂMICA OU CINÉTICA

É a pressão exercida por um fluido em movimento. É medida fazendo-se a tomada de impulso de tal forma que receba o impacto do fluxo

FIGURA 12 **DIAGRAMA DAS ESCALAS**



UNIDADES DE PRESSÃO

Como existem muitas unidades de pressão, é necessário saber a correspondência entre elas, pois nem sempre na indústria temos instrumentos padrões com todas as unidades. Para isso é necessário saber fazer a conversão, de acordo com a Tabela 2 da página ao lado

EXEMPLO

Como fazer a conversão de psi para kgf/cm²

$$10 \text{ psi} = ? \text{ kgf/cm}^2$$

$$1 \text{ psi} = 0,0703 \text{ kgf/cm}^2$$

$$10 \times 0,0703 = 0,703 \text{ kgf/cm}^2$$

TABELA 2 CONVERSÃO DE UNIDADES

	PSI	KPA	POL H₂O	mm H₂O	POL Hg	mm HG	BARS	mBARS	kgf/cm²	gf/cm²
PSI	1,0000	6,8947	27,7020	705,1500	2,0360	51,7150	0,0689	68,9470	0,07030	70,3070
KPA	0,1450	1,0000	4,0266	102,2742	0,2953	7,5007	0,0100	10,0000	0,01020	10,1972
POL H₂O	0,0361	0,2483	1,0000	25,4210	0,0734	1,8650	0,0025	2,4864	0,00250	2,5355
mm H₂O	0,0014	0,0098	0,0394	1,0000	0,0028	0,0734	0,0001	0,0979	0,00001	0,0982
POL Hg	0,4912	3,3867	13,6200	345,9400	1,0000	25,4000	0,0339	33,8640	0,03450	34,5320
mm HG	0,0193	0,1331	0,5362	13,6200	0,0394	1,0000	0,0013	1,3332	0,00140	1,3595
BARS	14,5040	100,0000	402,1800	10215,0000	29,5300	750,0600	1,0000	1000,0000	1,01970	1019,7000
mBARS	0,0145	0,1000	0,4022	10,2150	0,0295	0,7501	0,0010	1,0000	0,00100	1,0197
kgf/cm²	14,2230	97,9047	394,4100	10018,0000	28,9590	735,5600	0,9000	980,7000	1,00000	1000,0000
gf/cm²	0,0142	0,0979	0,3944	10,0180	0,0290	0,7356	0,0009	0,9807	0,00100	1,0000

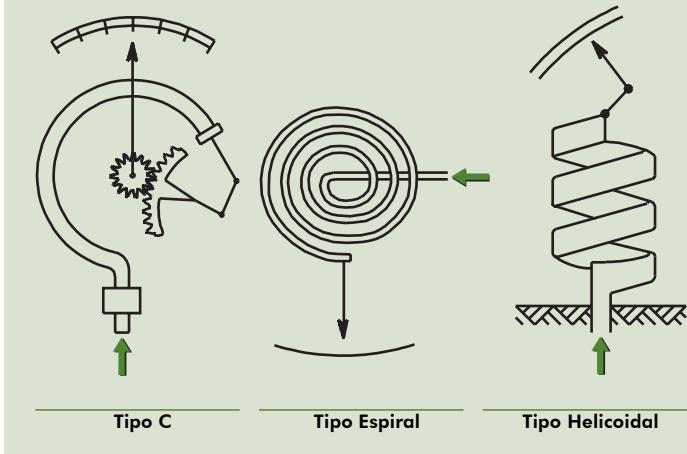
Dispositivos para medição de pressão

O instrumento mais simples para se medir pressão é o manômetro, que pode ter vários elementos sensíveis, utilizados também por transmissores e controladores. Vamos então ao estudo de alguns tipos de elementos sensíveis.

Tubo de Bourdon

Consiste geralmente em um tubo com seção oval, disposto na forma de arco de circunferência, tendo uma extremidade fechada e a outra aberta à pressão a ser medida. Com a pressão agindo em seu interior, o tubo tende a tomar uma seção circular, resultando num movimento em sua extremidade fechada. Esse movimento através da engrenagem é transmitido a um ponteiro que vai indicar uma medida de pressão.

Quanto ao formato, o tubo de Bourdon pode se apresentar nas seguintes formas: tipo C, espiral e helicoidal, conforme a Figura 13.

FIGURA 13 TIPOS DE TUBOS BOURDON

Com o avanço da tecnologia, os manômetros de Bourdon helicoidal e espiral caíram em desuso.

Devido ao baixo custo e à boa precisão, os manômetros de Bourdon tipo C, apresentados na Figura 14, são os mais utilizados até hoje nas indústrias. Ao se aplicar uma pressão superior à atmosférica, o tubo muda seu formato para uma seção transversal mais circular. Nos manômetros que utilizam o Bourdon tipo C, devido ao pequeno movimento realizado por sua extremidade livre quando submetida à pressão em medição, é necessária a utilização de um mecanismo para amplificação deste movimento. Este mecanismo de amplificação empregado nos manômetros é chamado de máquina. Os materiais mais usados nos Bourdons são o aço-liga, aço inoxidável ou bronze fosforoso, que variam de acordo com o tipo de produto a ser medido e são recomendados pelo fabricante. A faixa de aplicação varia de 1kgf/cm² de vácuo até 2.000kgf/cm² de sobrepressão. Por recomendação do fabricante, a faixa da escala que possui maior precisão de medição é a faixa compreendida entre 1/3 e 2/3 da escala.

Coluna de Líquido

Consiste, basicamente, num tubo de vidro, contendo certa quantidade de líquido, fixado a uma base com uma escala graduada. As colunas podem ser de três tipos: coluna reta vertical, reta inclinada e em forma de U. Os líquidos mais utilizados nas colunas são: água (normalmente com um corante) e mercúrio. Quando se aplica uma pressão na coluna, o líquido é deslocado (observe as Figuras 15 e 16), sendo este deslocamento proporcional à pressão aplicada.

FIGURA 14 MANÔMETROS DE BOURDON

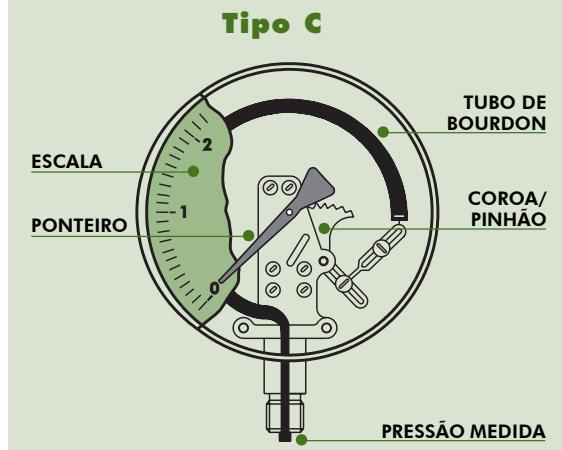
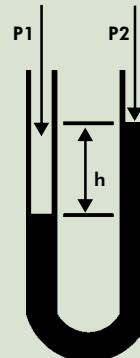


FIGURA 15 MANÔMETRO

De tubo em U

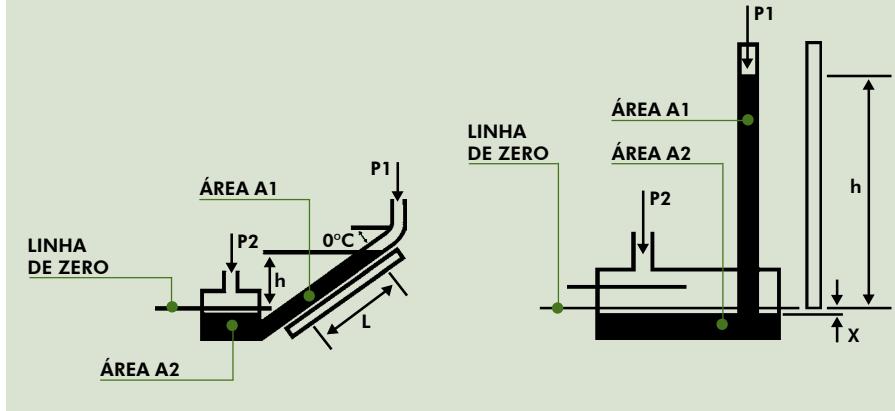


VEJA A FÓRMULA

$$P_1 - P_2 = h \cdot \rho g$$

h = altura da coluna deslocada = valor da pressão medida

FIGURA 16 MANÔMETRO DE TUBO INCLINADO E DE RESERVATÓRIO



Tipo capacitivo

A principal característica dos sensores capacitivos é a completa eliminação dos sistemas de alavancas na transferência da força/deslocamento entre o processo e o sensor.

Este tipo de sensor resume-se na deformação, diretamente pelo processo de uma das armaduras do capacitor. Tal deformação altera o valor da capacidade total, que é medida por um circuito eletrônico.

Esta montagem, se, de um lado, elimina os problemas mecânicos das partes móveis, de outro, expõe a célula capacitiva às rudes condições do processo, principalmente à temperatura do processo. Este inconveniente pode ser superado através de circuitos compensatórios de temperatura, montados junto ao sensor. Observe um sensor capacitivo na Figura 17, a seguir.

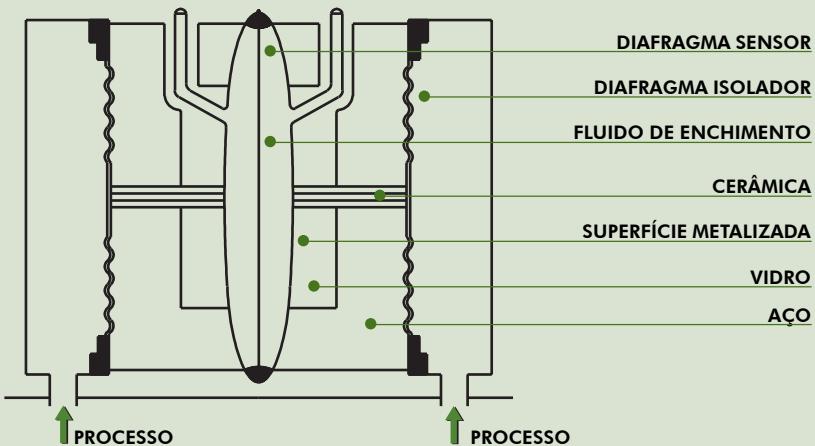


CARACTERÍSTICAS DE UM SENSOR CAPACITIVO

ALTA PRECISÃO

- ✓ Quartzo $\pm 0,05\%$ do fim de escala
- ✓ Aço inoxidável $\pm 0,11\%$ do fim de escala
- ✓ Limitada devido à expansão térmica do aço

FIGURA 17 SENSOR CAPACITIVO



O sensor é formado pelos seguintes componentes:

- Armaduras fixas metalizadas sobre um isolante de vidro fundido
- Dielétrico formado pelo óleo de enchimento (silicone ou fluorube)
- Armadura móvel (diafragma sensor)

A diferença de pressão entre as câmaras de alta (*high*) e de baixa pressão (*low*) produz uma força no diafragma isolador que é transmitida pelo líquido de enchimento.

A força atinge a armadura flexível (diafragma sensor), provocando sua deformação e alterando, portanto, o valor das capacitâncias formadas pelas armaduras fixas e a armadura móvel. Esta alteração é medida pelo circuito eletrônico, que gera um sinal proporcional à variação de pressão aplicada à câmara da cápsula de pressão diferencial capacitiva.

Tipo STRAIN GAUGE

Baseia-se no princípio de variação da resistência de um fio, mudando-se as suas dimensões.

O sensor consiste em um fio firmemente colado sobre uma lâmina de base, dobrando-se tão compacto quanto possível. Esta montagem denomina-se tira extensiométrica, como se pode ver nas Figuras 18 e 19.

Uma das extremidades da lâmina é fixada em um ponto de apoio rígido, enquanto a outra extremidade será o ponto de aplicação da força. Da física

tradicional sabemos que Pressão = Força/área. Portanto, ao inserirmos uma pressão na câmara de um sensor *strain gauge*, sua lâmina sofre uma deformação proveniente desta força aplicada. Esta deformação altera o comprimento do fio fixado na lâmina, provocando mudança em sua resistência. A faixa de aplicação deste sensor varia de 2" de H₂O a 200.000psi, e sua precisão gira em torno de 0,1% a 2% do fim de escala.

Tipo piezoelétrico

Os elementos piezoelétricos são cristais, como o quartzo, a turmalina e o titanato, que acumulam cargas elétricas em certas áreas da estrutura cristalina, quando sofrem uma deformação física, por ação de uma pressão. São elementos pequenos e de construção robusta, e seu sinal de resposta é linear com a variação de pressão, sendo capazes de fornecer sinais de altíssimas freqüências.

O efeito piezoelétrico é um fenômeno reversível. Se for conectado a um potencial elétrico, resultará em uma correspondente alteração da forma cristalina. Este efeito é altamente estável e exato, sendo por isso utilizado em relógios de precisão.

A carga devida à alteração da forma é gerada sem energia auxiliar, uma vez que o quartzo é um elemento transmissor ativo. Esta carga é conectada à entrada de um amplificador e indicada ou convertida em um sinal de saída, para tratamento posterior. Observe a Figura 20. Como vantagem, esse efeito apresenta uma relação linear Pressão x Voltagem produzida e é ideal para locais de freqüentes variações de pressão. Sua principal desvantagem é o fato de, em condições estáticas, apresentar redução gradativa de potencial, além de ser sensível à variação de temperatura.

FIGURA 18 TIRA EXTENSIOMÉTRICA

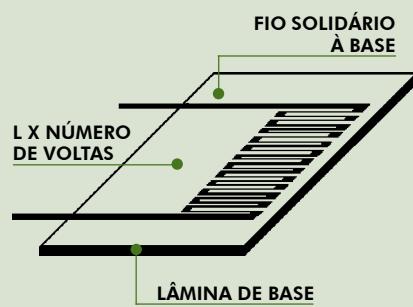


FIGURA 19 TIRA EXTENSIOMÉTRICA

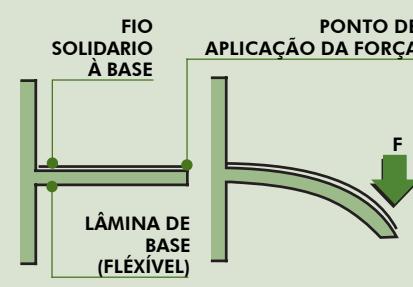
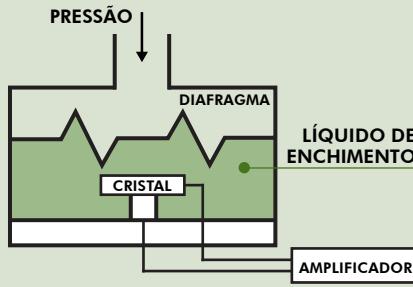


FIGURA 20 EFEITO PIEZOELÉTRICO



Tome Nota



Unidade 4

Medição de temperatura

O objetivo de se medirem e controlarem as diversas variáveis físicas em processos industriais é obter produtos de alta qualidade, com melhores condições de rendimento e segurança, a custos compatíveis com as necessidades do mercado consumidor.

Nos diversos segmentos de mercado, seja químico, petroquímico, siderúrgico, cerâmico, farmacêutico, vidreiro, alimentício, papel e celulose, hidrelétrico, nuclear entre outros, a monitoração da variável temperatura é fundamental para a obtenção do produto final específico.

Conceito

Termometria significa medição de temperatura. Eventualmente, alguns termos são utilizados com o mesmo significado, porém, baseando-se na etimologia das palavras, podemos definir:

PIROMETRIA

Medição de altas temperaturas, na faixa onde os efeitos de radiação térmica passam a se manifestar

CRIOMETRIA

Medição de baixas temperaturas, ou seja, aquelas próximas ao zero absoluto de temperatura

TERMOMETRIA

Termo mais abrangente que incluiria tanto a pirometria como a criometria, que seriam casos particulares de medição

Temperatura e calor

Todas as substâncias são constituídas de pequenas partículas, moléculas que se encontram em contínuo movimento. Quanto mais rápido o movimento das moléculas, mais quente se apresenta o corpo, e quanto mais lento, mais frio. Então define-se temperatura como o grau de agitação térmica das moléculas. 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. Outros conceitos que se confundem às vezes com o de temperatura são o de energia térmica e o de calor.

ENERGIA TÉRMICA	CALOR
<p>A energia térmica de um corpo é o somatório das energias cinéticas dos seus átomos e, além de depender da temperatura, depende também da massa e do tipo de substância</p>	<p>Calor é energia em trânsito ou a forma de energia que é transferida através da fronteira de um sistema em virtude da diferença de temperatura</p>

Até o final do século XVI, quando foi desenvolvido o primeiro dispositivo para avaliar temperatura, os sentidos do nosso corpo foram os únicos elementos de que dispunham os homens para dizer se um certo corpo estava mais quente ou frio do que outro, apesar da inadequação destes sentidos do ponto de vista científico.

A literatura geralmente reconhece três meios distintos de transmissão de calor: condução, radiação e convecção.

CONDUÇÃO	RADIAÇÃO	CONVEÇÃO
<p>A condução é um processo pelo qual o calor flui de uma região de alta temperatura para outra de temperatura mais baixa, dentro de um meio sólido, líquido ou gasoso ou entre meios diferentes em contato físico direto</p>	<p>A radiação é um processo pelo qual o calor flui de um corpo de alta temperatura para um de baixa, quando os mesmos estão separados no espaço, ainda que exista um vácuo entre eles</p>	<p>A convecção é um processo de transporte de energia pela ação combinada da condução de calor, armazenamento de energia e movimento da mistura</p> <p>ATENÇÃO A convecção é mais importante como mecanismo de transferência de energia (calor) entre uma superfície sólida e um líquido ou gás</p>

Escalas de temperatura

Desde o início da termometria, os cientistas, pesquisadores e fabricantes de termômetro sentiam a dificuldade para atribuir valores de forma padronizada à temperatura por meio de escalas reproduzíveis, como existia na época, para peso, distância e tempo.

As escalas que ficaram consagradas pelo uso foram a Fahrenheit e a Celsius. A escala Fahrenheit é definida atualmente com o valor 32 no ponto de fusão do gelo e 212 no ponto de ebulição da água. O intervalo entre estes dois pontos é dividido em 180 partes iguais, e cada parte é um grau Fahrenheit.

A escala Celsius é definida atualmente como o valor zero no ponto de fusão do gelo e 100 no ponto de ebulição da água. O intervalo entre os dois pontos está dividido em 100 partes iguais, e cada parte é um grau Celsius. A denominação "grau centígrado" utilizada anteriormente no lugar de "grau Celsius" não é mais recomendada, devendo ser evitado o seu uso.

Tanto a escala Celsius como a Fahrenheit são relativas, ou seja, os seus valores numéricos de referência são totalmente arbitrários.

Se abaixarmos a temperatura continuamente de uma substância, atingimos um ponto limite além do qual é impossível ultrapassar, pela própria definição de temperatura. Este ponto, onde cessa praticamente todo movimento atômico, é o zero absoluto de temperatura.

Através da extrapolação das leituras do termômetro a gás, pois os gases se liquefazem antes de atingir o zero absoluto, calculou-se a temperatura deste ponto na escala Celsius em $-273,15^{\circ}\text{C}$.

Existem escalas absolutas de temperatura, assim chamadas porque o zero delas é fixado no zero absoluto de temperatura.

Existem duas escalas absolutas atualmente em uso: a escala Kelvin e a Rankine.

A escala Kelvin possui a mesma divisão da Celsius, isto é, um grau Kelvin é igual a um grau Celsius, porém o seu zero se inicia no ponto de temperatura mais baixa possível, 273,15 graus abaixo do zero da escala Celsius.

A escala Rankine possui obviamente o mesmo zero da escala Kelvin, porém sua divisão é idêntica à da escala Fahrenheit. A representação das escalas absolutas é análoga à das escalas relativas:

Kelvin → 400K (sem o símbolo de grau “°”). Rankine → 785R

Conversão de escalas

A Tabela 3 compara as escalas de temperaturas existentes.

TABELA 3 COMPARAÇÃO DE ESCALAS

ESCALAS DE TEMPERATURA		PONTO DE EBULIÇÃO DA ÁGUA	PONTO DE FUSÃO DA ÁGUA	ZERO ABSOLUTO
ESCALAS ABSOLUTAS				
Rankine	R	671,67R	491,67R	0
Kelvin	K	373,15K	273,15K	0
ESCALAS RELATIVAS				
Celsius	C	100°C	0°C	-273,15°C
Fahrenheit	F	212°F	32°F	-456,67°F

Desta comparação podemos retirar algumas relações básicas entre as escalas:

RELAÇÃO ENTRE AS ESCALAS

$$\text{FAHRENHEIT } F \text{ PARA CELSIUS } C$$
$$\text{CELSIUS } C \text{ PARA FAHRENHEIT } F$$

$$\frac{C}{5} = \frac{F - 32}{9}$$

$$\text{FAHRENHEIT } F \text{ PARA KELVIN } K$$
$$\text{KELVIN } K \text{ PARA FAHRENHEIT } F$$

$$\frac{K - 273}{5} = \frac{F - 32}{9}$$

$$\text{CELSIUS } C \text{ PARA KELVIN } K$$

$$C = K - 273$$

$$\frac{C}{5} = \frac{F - 32}{9} = \frac{K - 273}{5}$$

EXEMPLO

O ponto de ebulação do oxigênio é -182,86°C.
Exprimir esta temperatura em graus Kelvin e graus Fahrenheit:

✓ Graus Celsius para graus Kelvin

$$K = 273 + (-182,86) = 90,14K$$

✓ Graus Celsius para graus Fahrenheit

$$\frac{-182,86}{5} = \frac{F - 32}{9} = 297,14F$$

Normas

Com o desenvolvimento tecnológico diferente em diversos países, criou-se uma série de normas e padronizações, cada uma atendendo uma dada região. As mais importantes são:



Medidores de temperatura por dilatação/expansão

Termômetro à dilatação de líquido

Os termômetros à dilatação de líquidos baseiam-se na lei de expansão volumétrica de um líquido com a temperatura, dentro de um recipiente fechado.

Os tipos podem ser de vidro transparente ou de recipiente metálico. Variar conforme sua construção:

■ TERMÔMETROS À DILATAÇÃO DE LÍQUIDO EM RECIPIENTE DE VIDRO

É constituído de um reservatório, cujo tamanho depende da sensibilidade desejada, soldada a um tubo capilar de seção, mais uniforme possível, fechado na parte superior.

O reservatório e parte do capilar são preenchidos por um líquido. Na parte superior do capilar existe um alargamento que protege o termômetro no caso de a temperatura ultrapassar seu limite máximo.

Após a calibração, a parede do tubo capilar é graduada em graus ou frações deste. A medição de temperatura se faz pela leitura da escala no ponto em que se tem o topo da coluna líquida.

Os líquidos mais usados são: mercúrio, tolueno, álcool e acetona.

Nos termômetros industriais, o bulbo de vidro é protegido por um poço metálico, e o tubo capilar, por um invólucro metálico. A Tabela 4 apresenta o ponto de solidificação e de ebulação desses líquidos, assim como as suas faixas de uso.

TABELA 4 PONTO DE SOLIDIFICAÇÃO, DE EBULIÇÃO E FAIXA DE USO

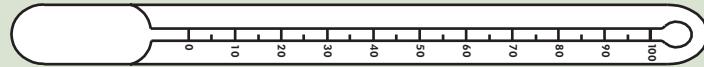
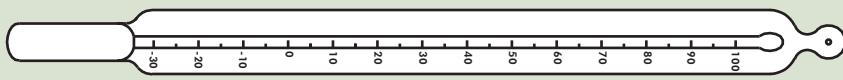
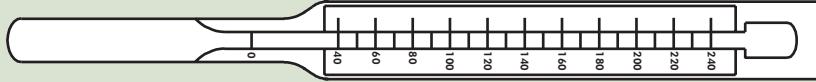
LÍQUIDO	PONTO DE SOLIDIFICAÇÃO (°C)	PONTO DE EBULIÇÃO (°C)	FAIXA DE USO (°C)
Mercúrio	-39	+357	-38 a 550
Álcool etílico	-115	+78	-100 a 70
Tolueno	-92	+110	-80 a 100

No termômetro de mercúrio, pode-se elevar o limite máximo até 550°C, injetando-se gás inerte sob pressão, para evitar a vaporização do mercúrio.

Por ser frágil, é impossível registrar sua indicação ou transmiti-la a distância. O uso deste termômetro é mais comum em laboratórios ou em indústrias, com a utilização de uma proteção metálica. A Figura 21 mostra alguns desses termômetros.

FIGURA 21 TERMÔMETROS À DILATAÇÃO

De líquido em recipiente de vidro



TERMÔMETRO À DILATAÇÃO DE LÍQUIDO EM RECIPIENTE METÁLICO

Neste termômetro, o líquido preenche todo o recipiente e, sob o efeito de um aumento de temperatura, se dilata, deformando um elemento extensível (sensor volumétrico), como se observa na Figura 22.

FIGURA 22 TERMÔMETRO À DILATAÇÃO



Características dos elementos básicos deste termômetro:

BULBO

Suas dimensões variam de acordo com o tipo de líquido e principalmente com a sensibilidade desejada. A Tabela 5 mostra os líquidos mais usados e sua faixa de utilização.

TABELA 5 UTILIZAÇÃO DOS LÍQUIDOS

LÍQUIDO	FAIXA DE UTILIZAÇÃO (°C)
Mercúrio	-35 a +550
Xileno	-40 a +400
Tolueno	-80 a +100
Álcool	50 a +150

CAPILAR

Suas dimensões são variáveis, devendo o diâmetro interno ser o menor possível, a fim de evitar a influência da temperatura ambiente, e não oferecer resistência à passagem do líquido em expansão.

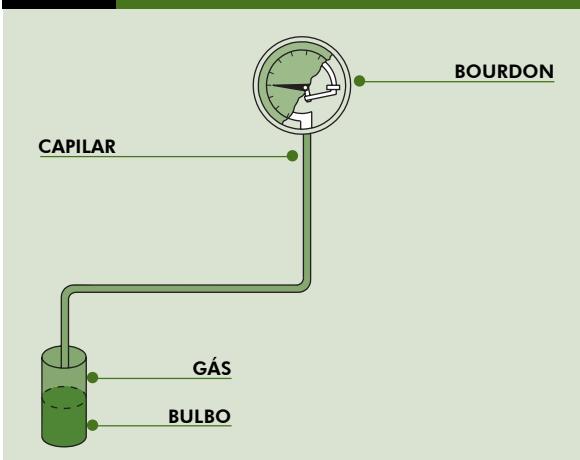
ELEMENTO DE MEDição

O elemento usado é o tubo de Bourdon. Normalmente são aplicados nas indústrias em geral, para indicação e registro, pois permitem leituras re-

motas e são os mais precisos dos sistemas mecânicos de medição de temperatura. Porém, não são recomendáveis para controle devido ao fato de seu tempo de resposta ser relativamente grande (mesmo usando fluido trocador de calor entre bulbo e poço de proteção para diminuir este atraso, conforme Figura 23). O poço de proteção permite manutenção do termômetro com o processo em operação.

Recomenda-se não dobrar o capilar com curvatura acentuada para que não se formem restrições que prejudicariam o movimento do líquido em seu interior, causando problemas de medição.

FIGURA 23 TERMÔMETRO À PRESSÃO DE GÁS



Termômetros à pressão de gás

Princípio de funcionamento

Fisicamente idêntico ao termômetro de dilatação de líquido, consta de um bulbo, elemento de medição e capilar de ligação entre estes dois elementos.

O volume do conjunto é constante e preenchido com um gás a alta pressão. Com a variação da temperatura, o gás varia sua pressão, conforme aproximadamente a lei dos gases perfeitos, com o elemento de medição operando como

medidor de pressão. Observa-se que as variações de pressão são linearmente dependentes da temperatura, sendo o volume constante.

Termômetros à dilatação de sólidos (termômetros bimetálicos)

Princípio de funcionamento

Baseia-se no fenômeno da dilatação linear dos metais com a temperatura.

Características de construção

O termômetro bimetálico consiste em duas lâminas de metais com coeficientes de dilatação diferentes sobrepostas, formando uma só peça. Variando-se a temperatura do conjunto, observa-se um encurvamento que é pro-

porcional à temperatura. Na prática a lâmina bimetálica é enrolada em forma de espiral ou hélice, como mostra a Figura 24, o que aumenta bastante a sensibilidade.

O termômetro mais usado é o de lâmina helicoidal, que consiste em um tubo bom condutor de calor, no interior do qual é fixado um eixo. Este eixo, por sua vez, recebe um ponteiro que se desloca sobre uma escala.

A faixa de trabalho dos termômetros bimetálicos vai aproximadamente de -50°C a 800°C , sendo sua escala bastante linear. Possui precisão na ordem de $\pm 1\%$.

FIGURA 24 TERMÔMETRO BIMETÁLICO

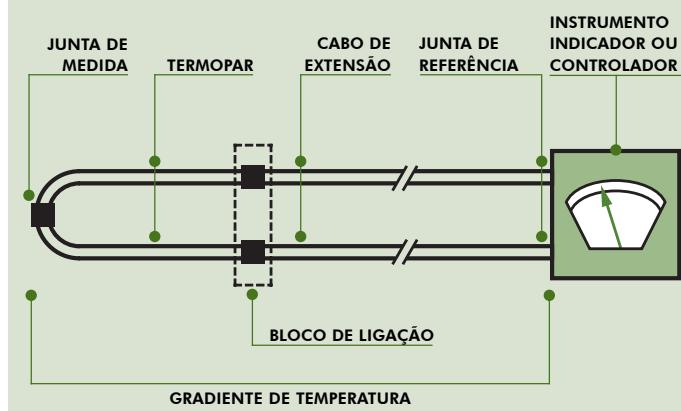


Medição de temperatura com termopar

Um termopar consiste em dois condutores metálicos, de natureza distinta, na forma de metais puros ou de ligas homogêneas, conforme mostra a Figura 25. Os fios são soldados em um extremo, ao qual se dá o nome de junta quente ou junta de medição. A outra extremidade dos fios é levada ao instrumento de medição de FEM (força eletromotriz), fechando um circuito elétrico por onde flui a corrente. O ponto onde os fios que formam o termopar se conectam ao instrumento de medição é chamado de junta fria ou de referência.

O aquecimento da junção de dois metais gera o aparecimento de uma FEM. Este princípio, conhecido por efeito Seebeck, propiciou a utilização de termopares para a medição de temperatura. Nas aplicações práticas o termopar apresenta-se normalmente conforme a Figura 25.

FIGURA 25 TERMOPAR



Efeitos termoelétricos

Efeito termoelétrico de Seebeck

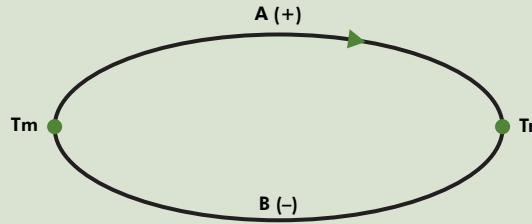
O fenômeno da termoelectricidade foi descoberto em 1821 por T. J. Seebeck, quando ele notou que em um circuito fechado, formado por dois condutores diferentes A e B, ocorre uma circulação de corrente enquanto existir uma diferença de temperatura ΔT entre as suas junções. Denominamos a junta de medição de T_m , e a outra, junta de referência de T_r .

A existência de uma FEM térmica AB no circuito é conhecida como efeito Seebeck. Quando a temperatura da junta de referência é mantida constante, verifica-se que a FEM térmica é uma função da temperatura T_m da junção de teste.

Este fato permite utilizar um par termoelétrico como um termômetro, conforme se observa na Figura 26.

O efeito Seebeck se produz pelo fato de os elétrons livres de um metal diferirem de um condutor para outro, dependendo da temperatura. Quando dois condutores diferentes são conectados para formar duas junções e estas se mantêm a diferentes temperaturas, a difusão dos elétrons nas junções se produz a ritmos diferentes.

FIGURA 26 EFEITO TERMOELÉTRICO DE SEEBECK

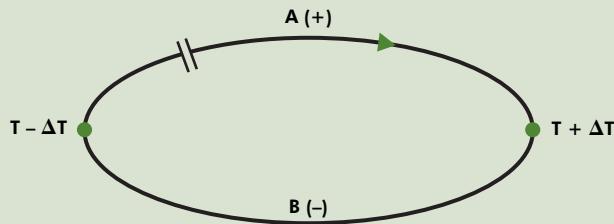


Efeito termoelétrico de Peltier

Em 1834, Peltier descobriu que, dado um par termoelétrico com ambas as junções à mesma temperatura, se, mediante uma bateria exterior, produz-se uma corrente no termopar, as temperaturas das junções variam em uma quantidade não inteiramente devida ao efeito Joule. Esta variação adicional de temperatura é o efeito Peltier, que se produz tanto pela corrente proporcionada por uma bateria exterior como pelo próprio par termoelétrico, como está demonstrado na Figura 27. O coeficiente Peltier depende da temperatura e dos metais que formam uma junção, sendo independente

da temperatura da outra junção. O calor Peltier é reversível. Quando se inverte o sentido da corrente, permanecendo constante o seu valor, o calor Peltier é o mesmo, porém em sentido oposto.

FIGURA 27 EFEITO TERMOELÉTRICO DE PELTIER



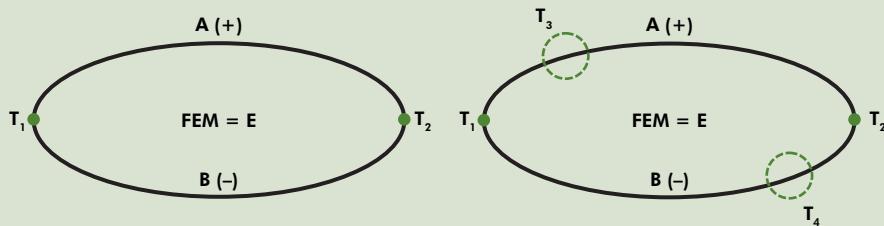
Leis termoelétricas

Fundamentados nos efeitos descritos anteriormente e nas leis termoelétricas, podemos compreender todos os fenômenos que ocorrem na medida de temperatura com estes sensores.

Lei do circuito homogêneo

A FEM termal, desenvolvida em um circuito termoelétrico de dois metais diferentes, com suas junções às temperaturas T_1 e T_2 , é independente do gradiente de temperatura e de sua distribuição ao longo dos fios. Em outras palavras, a FEM medida depende única e exclusivamente da composição química dos dois metais e das temperaturas existentes nas junções. Observe a Figura 28.

FIGURA 28 LEI DO CIRCUITO HOMOGÊNEO

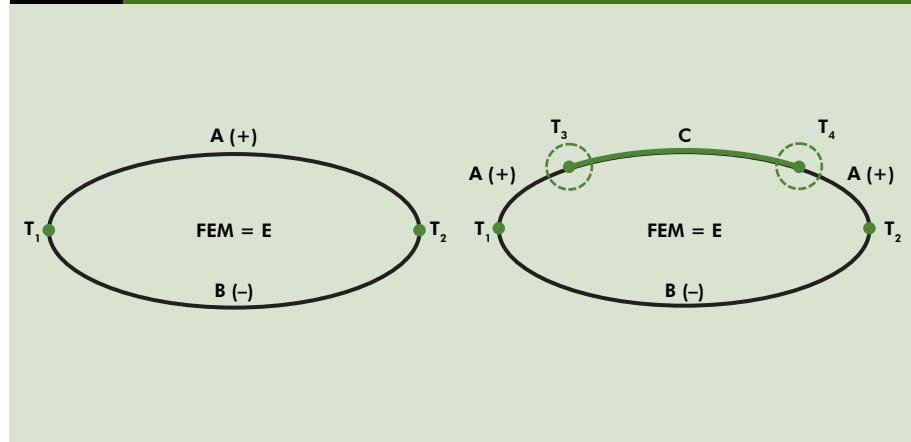


Um exemplo de aplicação prática desta lei é que podemos ter uma grande variação de temperatura em um ponto qualquer, ao longo dos fios dos termopares, que esta não influirá na FEM produzida pela diferença de temperatura entre as juntas. Portanto, pode-se fazer medidas de temperaturas em pontos bem definidos com os termopares, pois o importante é a diferença de temperatura entre as juntas.

Lei dos metais intermediários

A soma algébrica das FEM termais em um circuito composto de um número qualquer de metais diferentes é zero, se todo o circuito tiver a mesma temperatura. Deduz-se daí que num circuito termoelétrico, composto de dois metais diferentes, a FEM produzida não será alterada ao inserirmos, em qualquer ponto do circuito, um metal genérico, desde que as novas junções sejam mantidas a temperaturas iguais. Veja a Figura 29.

FIGURA 29 LEI DOS METAIS INTERMEDIÁRIOS



Onde conclui-se que:

$$\begin{aligned} T_3 &= T_4 \rightarrow E_1 = E_2 \\ T_3 &= T_4 \rightarrow E_1 = E_2 \end{aligned}$$

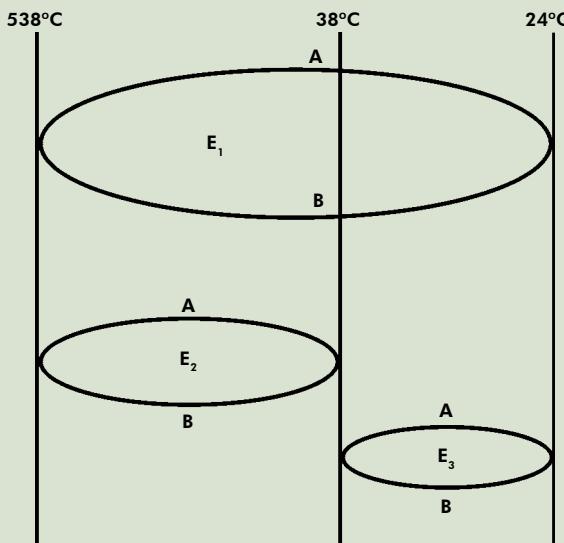
Um exemplo de aplicação prática desta lei é a utilização de contatos de latão ou cobre, para interligação do termopar ao cabo de extensão no cabeçote.

Lei das temperaturas intermediárias

A FEM produzida em um circuito termoelétrico de dois metais homogêneos e diferentes entre si, com as suas junções às temperaturas T_1 e T_3 respectivamente, é a soma algébrica da FEM deste circuito, com as junções às temperaturas T_1 e T_2 e a FEM deste mesmo circuito com as junções às temperaturas T_2 e T_3 . Um exemplo prático da aplicação

desta lei é a compensação ou correção da temperatura ambiente pelo instrumento receptor de milivoltagem.

FIGURA 30 LEI DAS TEMPERATURAS INTERMEDIÁRIAS



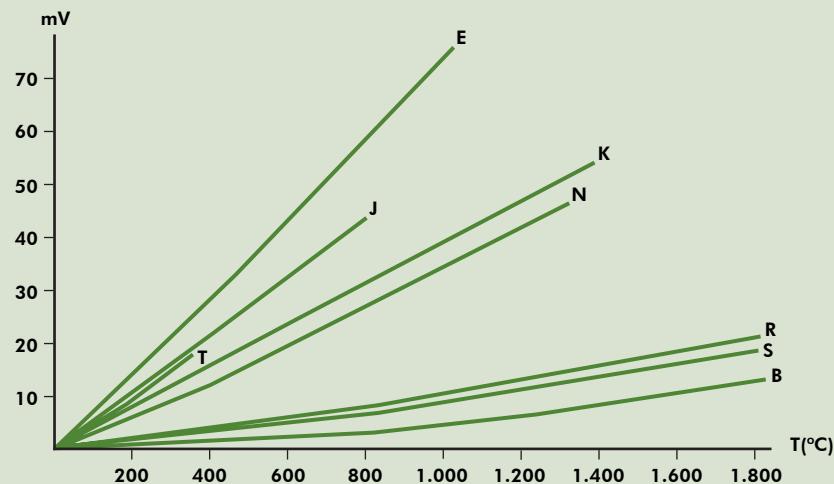
Correlação da FEM em função da temperatura

Visto que a FEM gerada em um termopar depende da composição química dos condutores e da diferença de temperatura entre as juntas, isto é, a cada grau de variação de temperatura podemos observar uma variação da FEM gerada pelo termopar, podemos, portanto, construir um gráfico, de correlação entre a temperatura e a FEM (Figura 31). Por uma questão prática, padronizou-se o levantamento destas curvas com a junta de referência à temperatura de 0°C.

Esses gráficos foram padronizados por diversas normas internacionais e levantados de acordo com a Escala Prática Internacional de Temperatura de 1968 (IPTS-68), recentemente atualizada pela ITS-90, para os termopares mais utilizados.

A partir deles podemos construir outros gráficos, relacionando a milivoltagem gerada em função da temperatura, para os termopares, segundo a norma ANSI, com a junta de referência a 0°C.

FIGURA 31 CORRELAÇÃO ENTRE TEMPERATURA E FEM



Tipos e características dos termopares

Existem várias combinações de dois metais condutores operando como termopares. As combinações de fios devem possuir uma relação razoavelmente linear entre temperatura e FEM, assim como desenvolver uma FEM por grau de mudança de temperatura que seja detectável pelos equipamentos normais de medição. Foram desenvolvidas diversas combinações de pares de ligas metálicas, desde os mais corriqueiros, de uso industrial, até os mais sofisticados, para uso especial ou restritos a laboratórios. Podemos dividir os termopares em grupos básicos e nobres.

Termopares básicos

São assim chamados os termopares de maior uso industrial, em que os fios são de custo relativamente baixo e sua aplicação admite um limite de erro maior.

TIPO T

Nomenclaturas

T – Adotado pela Norma ANSI

CC – Adotado pela Norma JIS

Cu-Co – Cobre-Constantan

Liga

(+) Cobre 99,9%

(-) Constantan

São as ligas de Cu-Ni compreendidas no intervalo entre Cu 50% e Cu 65% Ni 35%. A composição mais utilizada para este tipo de termopar é de Cu 58% e Ni 42%.

Características

Faixa de utilização: -200°C a 370°C

FEM produzida: -5,603mV a 19,027mV

Aplicações

Criometria (baixas temperaturas)

Indústrias de refrigeração

Pesquisas agronômicas e ambientais

Química

Petroquímica

TIPO J**Nomenclaturas**

J – Adotada pela Norma ANSI

IC – Adotada pela Norma JIS

Fe-Co – Ferro-Constantan

Liga

(+) Ferro 99,5%

(-) Constantan – Cu 58% e Ni 42%

Normalmente se produz o ferro a partir de sua característica, casando-se o constantan adequado.

Características

Faixa de utilização: -40°C a 760°C

FEM produzida: -1,960mV a 42,922mV

Aplicações

Centrais de energia

Metalúrgica
Química
Petroquímica
Indústrias em geral

TIPO E

Nomenclatura

E – Adotada pela Norma ANSI
CE – Adotada pela Norma JIS
NiCr-Co

Liga

- (+) Chromel – Ni 90% e Cr 10%
(-) Constantan – Cu 58% e Ni 42%

Características

Faixa de utilização: -200°C a 870°C
FEM produzida: -8,824mV a 66,473mV

Aplicações

Química
Petroquímica

TIPO K

Nomenclaturas

K – Adotada pela Norma ANSI
CA – Adotada pela Norma JIS

Liga

- (+) Chromel – Ni 90% e Cr 10%
(-) Alumel – Ni 95,4%, Mn 1,8%, Si 1,6%, Al 1,2%

Características

Faixa de utilização: -200°C a 1.260°C
FEM produzida: -5,891mV a 50,99mV

Aplicações

Metalúrgicas
Siderúrgicas
Fundição
Usina de cimento e cal
Vidros
Cerâmica
Indústrias em geral

Termopares nobres

Aqueles cujos pares são constituídos de platina. Embora possuam custo elevado e exijam instrumentos receptores de alta sensibilidade, devido à baixa potência termoelétrica, apresentam uma altíssima precisão, dada a homogeneidade e pureza dos fios dos termopares.

TIPOS

Nomenclaturas

S – Adotada pela Norma ANSI
Pt Rh 10% – Pt

Liga

- (+) Platina 90%, Rhodio 10%
- (-) Platina 100%

Características

Faixa de utilização: 0°C a 1.600°C
FEM produzida: 0mV a 16,771mV

É utilizado em sensores descartáveis na faixa de 1.200 a 1.768°C, para medição de metais líquidos em siderúrgicas e fundições



Aplicações

Siderúrgica
Fundição
Metalúrgica
Usina de cimento
Cerâmica
Vidro
Pesquisa científica

TIPO R

Nomenclaturas

R – Adotada pela Norma ANSI

PtRh 13% – Pt

Liga

(+) Platina 87%, Rhodio 13%

(-) Platina 100%

Características

Faixa de utilização: 0°C a 1.600°C

FEM produzida: 0mV a 18,842mV

Aplicações

As mesmas do tipo S

Siderúrgica, Fundição, Metalúrgica,

Usina de cimento, Cerâmica,

Vidro e Pesquisa científica

TIPO B

Nomenclaturas

B – Adotada pela Norma ANSI

PtRh 30% – PtRh 6%

Liga

(+) Platina 70%, Rhodio 30%

(-) Platina 94%, Rhodio 6%

Características

Faixa de utilização: 600 a 1.700°C

FEM produzida: 1,791mV a 12,426mV

Aplicações

Vidro

Siderúrgica

Alta temperatura em geral

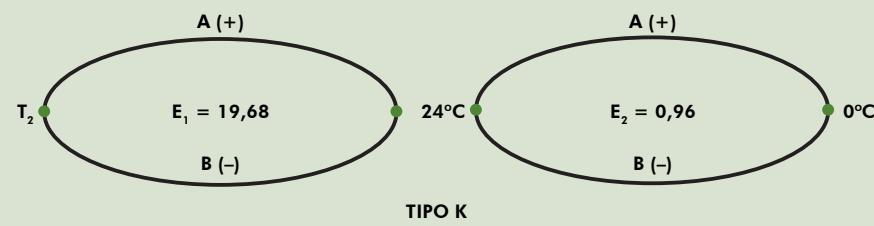
TABELA 6 IDENTIFICAÇÃO DE TERMOPARES

TERMOPAR TIPO	EXTENSÃO OU COMPENSAÇÃO TIPO	MATERIAL DOS CONDUTORES	COLORAÇÃO DA ISOLAÇÃO											
			NORMA AMERICANA ANSI MC - 96.1 - 1982				NORMA ALEMÃ DIN 43710-4				IEC 584-3			
			POSITIVO	NEGATIVO	CAPA EXTERNA	POSITIVO	NEGATIVO	CAPA EXTERNA	POSITIVO	NEGATIVO	CAPA EXTERNA	POSITIVO	NEGATIVO	
T	TX	Cobre	Constantan	Azul	Azul	Vermelha	Marrom	Vermelha	Marrom	Marrom	Marrom	Marrom	Branca	
J	JX	Ferro	Constantan	Preta	Branca	Vermelha	Azul	Vermelha	Azul	Preto	Preto	Preto	Branca	
E	EX	Chromel	Constantan	Roxa	Roxa	Vermelha	-	-	-	Violeta	Violeta	Violeta	Branca	
K	KX	Chromel	Alumel	Amarela	Amarela	Vermelha	Verde	Vermelha	Verde	Verde	Verde	Verde	Branca	
K	WX	Ferro	Cupronel	Branca	Verde	Vermelha	Verde	Vermelha	Verde	-	-	-	-	
S,R	SX	Cobre	Cu/Ni	Verde	Preta	Vermelha	Branca	Vermelha	Branca	Laranja	Laranja	Laranja	Branca	
B	BX	Cobre	Cobre	Cinza	Cinza	Vermelha	-	-	-	-	-	-	-	
N	NX	Nicrosil	Nisil	Laranja	Laranja	Vermelha	-	-	-	Rosa	Rosa	Rosa	Branca	

Correção da junta de referência

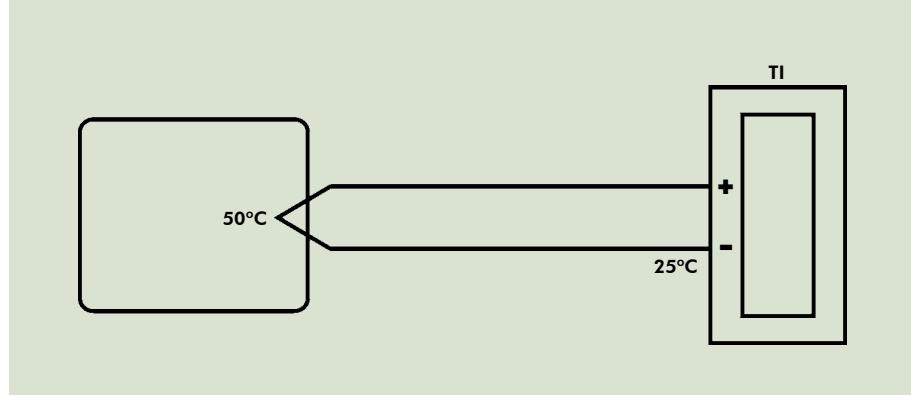
Os gráficos existentes da FEM gerada em função da temperatura para os termopares têm fixado a junta de referência a 0°C (ponto de solidificação da água). Porém, nas aplicações práticas dos termopares a junta de referência é considerada nos terminais do instrumento receptor, encontrando-se temperatura ambiente, que é normalmente diferente de 0°C e variável com o tempo. Isso torna necessário que se faça uma correção da junta de referência, podendo ela ser automática ou manual. Os instrumentos utilizados para medição de temperatura com termopares costumam fazer a correção da junta de referência automaticamente, sendo um dos métodos adotados a medição da temperatura nos terminais do instrumento, através de circuito eletrônico. Este circuito adiciona a milivoltagem que chega aos terminais, uma milivoltagem correspondente à diferença de temperatura de 0°C à temperatura ambiente, conforme apresentado na Figura 32.

FIGURA 32 CORREÇÃO DA JUNTA DE REFERÊNCIA



É importante não esquecer que o termopar mede realmente a diferença entre as temperaturas das junções. Então para medirmos a temperatura do ponto desejado, precisamos manter a temperatura da junção de referência invariável. Observe a Figura 33.

FIGURA 33 DIFERENÇA ENTRE AS TEMPERATURAS DAS JUNÇÕES



$$FEM = JM - JR$$

$$FEM = 2,25 - 1,22$$

$$FEM = 1,03mV \rightarrow 25^{\circ}C$$

Esta temperatura obtida pelo cálculo está errada, pois o valor correto que o meu termômetro tem que medir é de 50°C.

$$FEM = JM - JR$$

$$FEM = 2,25 - 1,22$$

FEM = 1,03mV + mV correspondente à temperatura ambiente para fazer a compensação automática, portanto:

$$FEM = mV JM - mV JR + mV CA \text{ (Compensação Automática)}$$

$$FEM = 2,25 - 1,22 + 1,22$$

$$FEM = 2,25mV \rightarrow 50^{\circ}C$$

A leitura agora está correta, pois 2,25mV correspondem a 50°C, que é a temperatura do processo.

Hoje em dia a maioria dos instrumentos faz a compensação da junta de referência automaticamente.

Medição de temperatura por termorresistência

Os métodos de utilização de resistências para medição de temperatura iniciaram-se por volta de 1835, com Faraday, porém só houve condições de se elaborarem as mesmas para utilização em processos industriais a partir de 1925.

Esses sensores adquiriram espaço nos processos industriais por suas condições de alta estabilidade mecânica e térmica, resistência à contaminação, baixo índice de desvio pelo envelhecimento e tempo de uso.

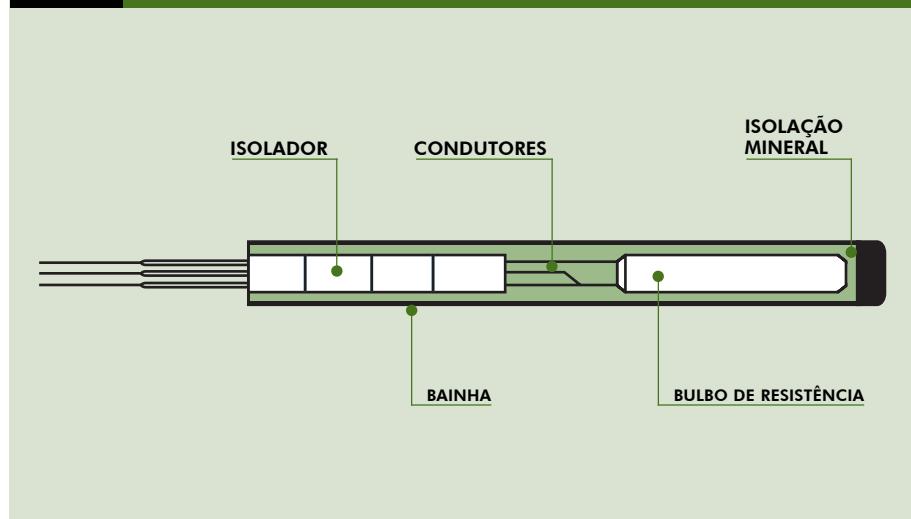
Devido a estas características, tal sensor é padrão internacional para a medição de temperaturas na faixa de -270°C a 660°C em seu modelo de laboratório.

Princípio de funcionamento

Os bulbos de resistência (veja a Figura 34) são sensores que se baseiam no princípio de variação da resistência em função da temperatura. Os materiais mais utilizados para a fabricação destes tipos de sensores são a platina, o cobre ou o níquel, metais com características de:

- Alta resistividade, permitindo assim uma melhor sensibilidade do sensor
- Alto coeficiente de variação de resistência com a temperatura
- Rigidez e ductilidade para ser transformado em fios finos

FIGURA 34 BULBOS DE RESISTÊNCIA



Vantagens e desvantagens dessa medição

Vantagens

- Possui maior precisão dentro da faixa de utilização do que outros tipos de sensores
- Com ligação adequada, não existe limitação para distância de operação
- Dispensa utilização de fiação especial para ligação
- Se adequadamente protegido, permite utilização em qualquer ambiente
- Tem boas características de reproduzibilidade
- Em alguns casos, substitui o termopar com grande vantagem

Desvantagens

- É mais caro do que os sensores utilizados nessa mesma faixa
- Deteriora-se com mais facilidade, caso haja excesso na sua temperatura máxima de utilização
- Temperatura máxima de utilização de 630°C
- É necessário que todo o corpo do bulbo esteja com a temperatura equilibrada para fazer a indicação corretamente

Unidade 4

Medição de nível

Nível é a altura do conteúdo, que pode ser sólido ou líquido, de um reservatório. Trata-se de uma das principais variáveis utilizadas em controle de processos contínuos, pois através da medição de nível torna-se possível:

- Avaliar o volume estocado de materiais em tanques de armazenamento
- Realizar o balanço de materiais de processos contínuos onde existam volumes líquidos ou sólidos de acumulação temporária, reações, mistura etc.
- Manter segurança e controle de alguns processos onde o nível do produto não pode ultrapassar determinados limites



Métodos de medição de nível de líquido

Os três tipos básicos de medição de nível são o direto, o indireto e o descontínuo.

Medição de nível direta

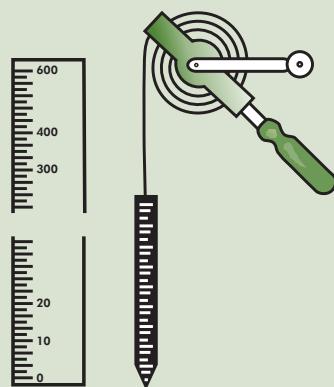
É a medição para a qual tomamos como referência a posição do plano superior da substância medida. Neste tipo de medição podemos utilizar réguas ou gabinetes, visores de nível, bóia ou flutuador.

RÉGUA OU GABARITO

Consiste em uma régua graduada que tem um comprimento conveniente para ser introduzida no reservatório a ser medido. Observe a Figura 35.

A determinação do nível se efetuará através da leitura direta do comprimento molhado na régua pelo líquido.

FIGURA 35 RÉGUA



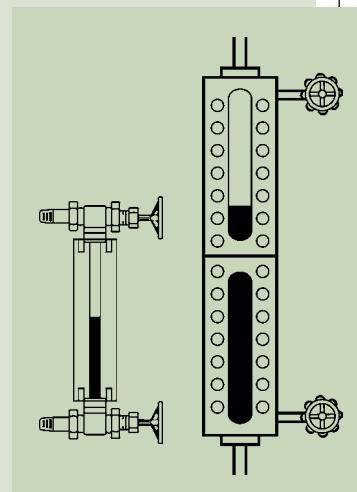
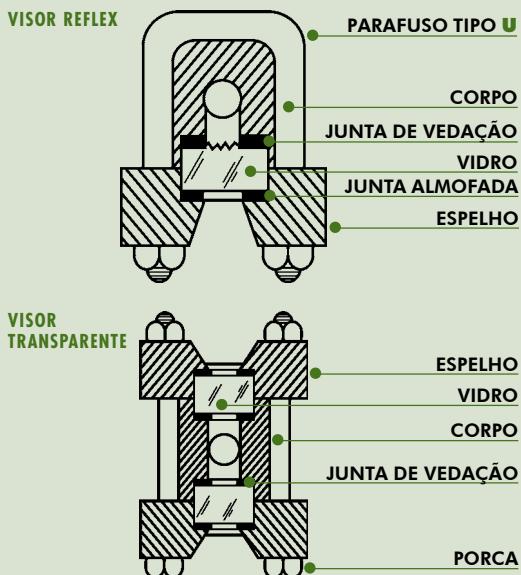
VISORES DE NÍVEL

Este medidor usa o princípio dos vasos comunicantes. O nível é observado por um visor de vidro especial, podendo haver uma escala graduada acompanhando o visor. São simples, baratos, precisos e de indicação direta. Esta medição é feita em tanques abertos e tanques fechados, como os da Figura 36.

Nessa medição pode-se usar vidro reflex, para produtos escuros sem interfaces, ou vidro transparente, para produtos claros e sua interface.

FIGURA 36 TANQUES PARA MEDAÇÃO

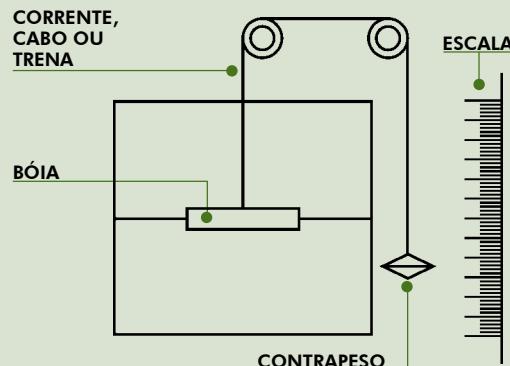
Corte dos visores de vidro plano tipo reflex e transparente



Bóia ou flutuador

Consiste numa bóia presa a um cabo que tem sua extremidade ligada a um contrapeso. No contrapeso está fixo um ponteiro que indicará diretamente o nível em uma escala. Esta medição é normalmente encontrada em tanques abertos (Figura 37).

FIGURA 37 BÓIA OU FLUTUADOR



Medição de nível indireta

Neste tipo de medição o nível é medido indiretamente em função de grandezas físicas como: pressão, empuxo, radiação e propriedades elétricas.

MEDIDA DE NÍVEL POR PRESSÃO HIDROSTÁTICA (PRESSÃO DIFERENCIAL)

Neste tipo de medição usamos a pressão exercida pela altura da coluna líquida, para medirmos indiretamente o nível, como mostra a seguir o Teorema de Stevin:

$$P = h \cdot \delta$$

P = Pressão em mm ou polegadas de coluna líquida

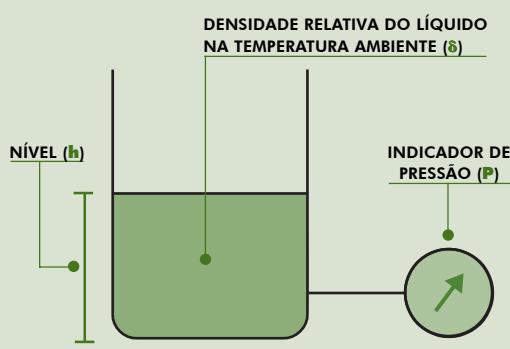
h = Nível em mm ou em polegadas

δ = densidade relativa do líquido na temperatura ambiente

Essa técnica permite que a medição seja feita independente do formato do tanque, seja ele aberto, seja pressurizado.

Neste tipo de medição, utilizamos um transmissor de pressão diferencial cuja cápsula sensora é dividida em duas câmaras: a de alta (**H**) e a de baixa pressão (**L**).

FIGURA 38 MEDIÇÃO DE NÍVEL INDIRETA



Este transmissor de nível mede a pressão diferencial, subtraindo-se a pressão da câmara alta (**H**) da câmara baixa (**L**).

$$\Delta P = PH - PL$$

ΔP = Diferencial de pressão
PH = Pressão na câmara de alta
PL = Pressão na câmara de baixa

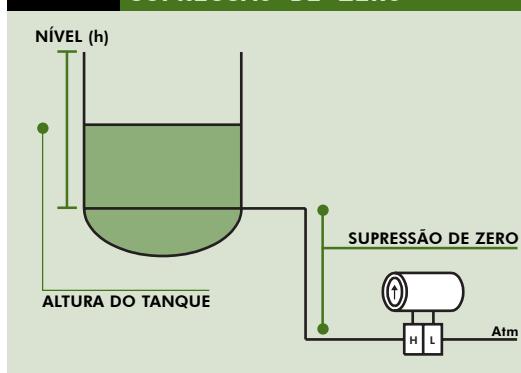


MEDIÇÃO DE NÍVEL POR PRESSÃO DIFERENCIAL EM TANQUES ABERTOS

Supressão de zero

Para maior facilidade de manutenção e acesso ao instrumento, muitas vezes o transmissor é instalado abaixo do tanque. Outras vezes a falta de uma plataforma de fixação em torno de um tanque elevado resulta na instalação de um instrumento em um plano situado em nível inferior à tomada de alta pressão. Em ambos os casos, uma coluna líquida se formará com a altura do líquido dentro da tomada de impulso. Se o problema não for contornado, o transmissor indicará um nível superior ao real. Observe a Figura 39.

FIGURA 39 SUPRESSÃO DE ZERO



MEDIÇÃO DE NÍVEL POR PRESSÃO DIFERENCIAL

EM TANQUES PRESSURIZADOS

Para medição em tanques pressurizados, a tubulação de impulso da parte de baixo do tanque é conectada à câmara de alta pressão do transmissor de nível. A pressão atuante na câmara de alta é a soma da pressão exercida sob a superfície do líquido e a pressão exercida pela coluna de líquido no fundo do reservatório. A câmara de baixa pressão do transmissor de nível é conectada na tubulação de impulso da parte superior do tanque, onde mede somente a pressão exercida sob a superfície do líquido. Veja a Figura 40, na página ao lado.

Selagem das tomadas de impulso

Quando o fluido do processo possuir alta viscosidade, ou quando o fluido se condensar nas tubulações de impulso, ou ainda no caso de o fluido ser corrosivo, devemos utilizar um sistema de selagem nas tubulações de impulso, das câmaras de baixa e alta pressão do transmissor de nível. Selam-se então ambas as tubulações de impulso, bem como as câmaras do instrumento. O líquido normalmente utilizado para selagem das tomadas de impulso é a glicerina ou o silicone líquido, devido à sua alta densidade.

Elevação de zero

Na Figura 41, apresenta-se um sistema de medição de nível com selagem, no qual deve ser feita a elevação, que consiste em se anular a pressão da coluna líquida na tubulação de impulso da câmara de baixa pressão do transmissor de nível.

FIGURA 40 MEDAÇÃO EM TANQUES PRESSURIZADOS

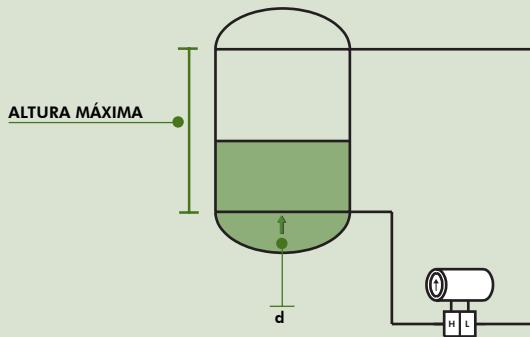
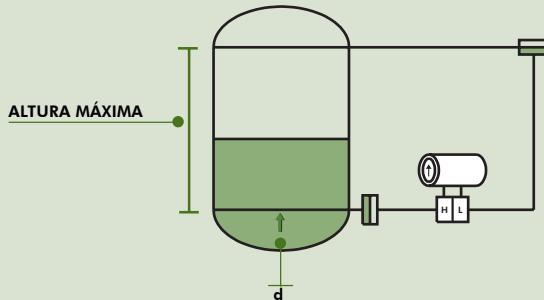


FIGURA 41 MEDAÇÃO DE NÍVEL COM SELAGEM



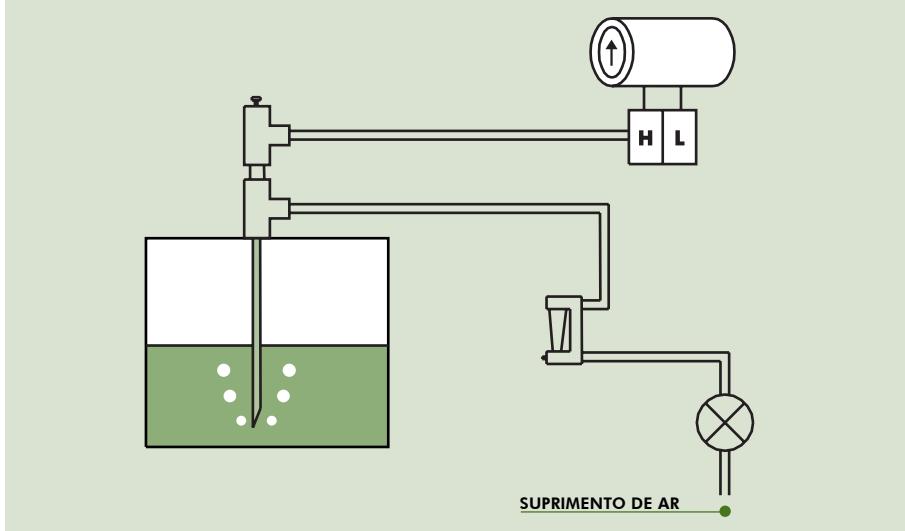
MEDAÇÃO DE NÍVEL COM BORBULHADOR

Com o sistema de borbulhador (Figura 42) podemos detectar o nível de líquidos viscosos, corrosivos, bem como de quaisquer líquidos a distância.

Neste sistema necessitamos de um suprimento de ar ou gás e uma pressão ligeiramente superior à máxima pressão hidrostática exercida pelo líquido. Este valor em geral é ajustado para aproximadamente 20% a mais que a máxima pressão hidrostática exercida pelo líquido. O sistema borbulhador engloba uma válvula agulha, um recipiente com líquido, no qual

o ar ou gás passará, e um indicador de pressão. Com o nível no máximo, ajustamos a vazão de ar ou gás até que se observe a formação de bolhas em pequenas quantidades. Um tubo levará esta vazão de ar ou gás até o fundo do vaso que queremos medir o nível. Teremos então um borbulhamento bem sensível de ar ou gás no líquido que terá seu nível medido. Na tubulação pela qual fluirá o ar ou gás, instalamos um indicador de pressão que indicará um valor equivalente à pressão, devido ao peso da coluna líquida. Nota-se que teremos condições de instalar o medidor a distância.

FIGURA 42 SISTEMA DE BORBULHADOR



MEDIDA DE NÍVEL POR EMPUXO

Fundamenta-se no princípio de Arquimedes. A força exercida pelo fluido, no corpo nele submerso ou flutuante, chamamos de empuxo (Figura 43).

Baseando-se no princípio de Arquimedes, usa-se um deslocador (*displacer*), que sofre o empuxo do nível de um líquido, transmi-

PRINCÍPIO DE ARQUIMEDES

$$E = V \cdot \delta$$

E = Empuxo

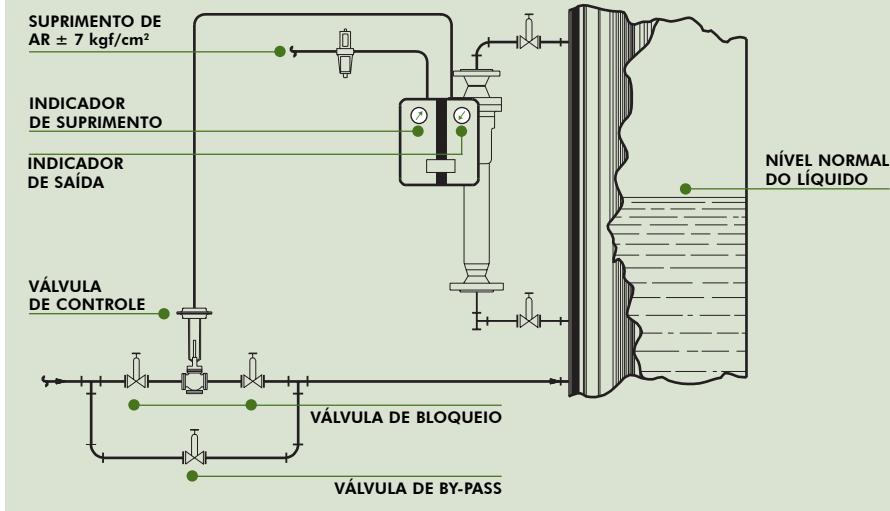
V = Volume deslocado

δ = Densidade ou peso específico do líquido

“ Todo corpo mergulhado em um fluido sofre a ação de uma força vertical dirigida de baixo para cima, igual ao peso do volume do fluido deslocado ”

tindo para um indicador este movimento, por meio de um tubo de torque. O medidor deve ter um dispositivo de ajuste para densidade do líquido cujo nível estamos medindo, pois o empuxo varia com a densidade.

FIGURA 43 MEDAÇÃO DE NÍVEL POR EMPUXO



Através dessa técnica podemos medir nível de interface entre dois líquidos não-miscíveis.

Na indústria muitas vezes temos que medir o nível da interface em um tanque com dois líquidos diferentes. Este fato ocorre em torres de destilação, torres de lavagem, decantadores etc.

Um dos métodos mais utilizados para a medição da interface é por meio da variação do empuxo, conforme demonstraremos a seguir.

Consideremos um flutuador de forma cilíndrica mergulhado em dois líquidos com pesos específicos diferentes δ_1 e δ_2 (Figura 44).

Desta forma, podemos considerar que o empuxo aplicado no flutuador será a soma dos empuxos E_1 e E_2 aplicados no cilindro, pelos líquidos de pesos específicos δ_1 e δ_2 , respectivamente. O empuxo será dado por:

FIGURA 44 FLUTUADOR



$$E_t = E_1 + E_2$$

$$E_1 = V_1 \cdot \delta_1$$

$$E_2 = V_2 \cdot \delta_2$$

Assim, para diferentes valores de altura de interface, teremos diferentes variações de empuxo, como observamos na Figura 45.

MEDIDA DE NÍVEL POR CAPACITÂNCIA

A capacidade é uma grandeza elétrica que existe entre duas superfícies condutoras isoladas entre si.

O medidor de nível capacitivo mede as possibilidades do capacitor formado pelo eletrodo submerso no líquido em relação às paredes do tanque. A capacidade do conjunto depende do nível do líquido. O elemento sensor, geralmente, é uma haste ou cabo flexível de metal. Em líquidos não condutores, se emprega um eletrodo normal. Em fluidos condutores, o eletrodo é isolado normalmente com teflon. À medida que o nível do tanque for aumentando, o valor da capacidade aumenta progressivamente devido ao dielétrico ar ser substituído pelo dieletrico líquido. Veja a Figura 46.

A capacidade é convertida por um circuito eletrônico numa corrente elétrica, sendo este sinal indicado em um medidor. A medição de nível por capacidade também pode ser feita sem contato, através de sonda de proximidade. Esta sonda consiste em um disco que compõe uma das placas do capacitor. A outra placa é a própria superfície do produto ou a base do tanque (Figura 47).

FIGURA 45 VALORES DE ALTURA

De interface

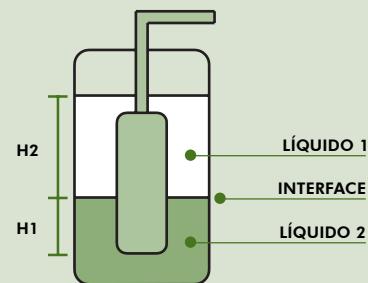


FIGURA 46 MEDIÇÃO

Por capacidade

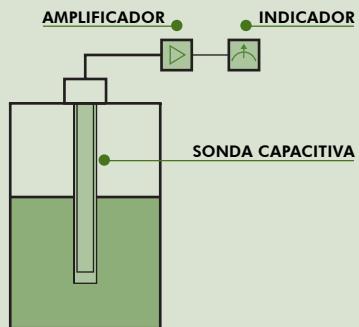
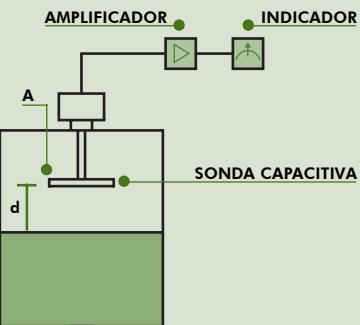


FIGURA 47 SONDA

De proximidade



MEDIÇÃO DE NÍVEL POR ULTRA-SOM

O ultra-som consiste em uma onda sonora cuja freqüência de oscilação é maior que aquela sensível pelo ouvido humano, ou seja, acima de 20 KHz.

A geração ocorre quando uma força externa excita as moléculas de um meio elástico. Esta excitação é transferida de molécula a molécula, com uma velocidade que depende da elasticidade e inércia das mesmas. A propagação do ultra-som depende, portanto, do meio (sólido, líquido ou gasoso).

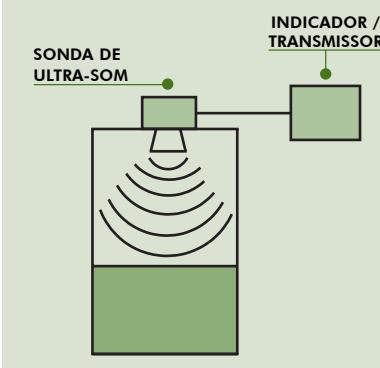
Assim, a velocidade do som é a base para a medição através da técnica de eco, usada nos dispositivos ultra-sônicos.

As ondas de ultra-som são geradas e captadas pela excitação elétrica de materiais piezoelétricos. A característica marcante dos materiais piezoelétricos é a produção de uma freqüência quando aplicamos uma tensão elétrica. Assim, eles podem ser usados como gerador de ultra-som, compondo, portanto, os transmissores.

Inversamente, quando se aplica uma força em uma material piezoelétrico, ou seja, quando ele recebe um sinal de freqüência, resulta o aparecimento de uma tensão elétrica no seu terminal. Nesta modalidade, o material piezoelétrico é usado como receptor do ultra-som.

Os dispositivos do tipo ultra-sônico podem ser usados tanto na detecção contínua de nível como na descontínua. Os dispositivos destinados à detecção contínua de nível caracterizam-se, principalmente, pelo tipo de instalação, ou seja, os transdutores podem encontrar-se totalmente submersos no produto, ou instalados no topo do equipamento sem contato com o produto.

FIGURA 4.8 ULTRA-SOM



MEDIÇÃO DE NÍVEL POR RADAR

O radar possui uma antena côncica que emite pulsos eletromagnéticos de alta freqüência à superfície a ser detectada. A distância entre a antena e a superfície a ser medida será então calculada em função do tempo de atraso entre a emissão e a recepção do sinal.

Essa técnica pode ser aplicada com sucesso na medição de nível de líquidos e sólidos em geral. A grande vantagem deste tipo de medidor em relação ao ultra-sônico é a imunidade a efeitos provocados por gases, pó e espuma entre a superfície e o detector, possuindo, porém, um custo relativamente alto.

Medição de nível descontínua

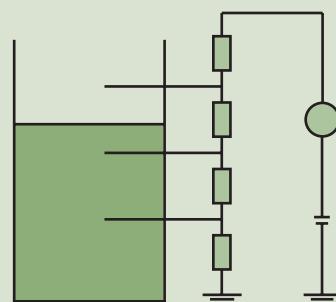
Estes medidores são empregados para fornecer indicação apenas quando o nível atinge certos pontos desejados, como, por exemplo, em sistemas de alarme e segurança de nível alto ou baixo.

MEDIÇÃO DE NÍVEL DESCONTÍNUA POR CONDUTIVIDADE

Nos líquidos que conduzem eletricidade, podemos mergulhar eletrodos metálicos de comprimento diferente. Quando houver condução entre os eletrodos, teremos a indicação de que o nível atingiu a altura do último eletrodo alcançado pelo líquido (Figura 49).

FIGURA 49 NÍVEL DESCONTÍNUO

Por condutividade

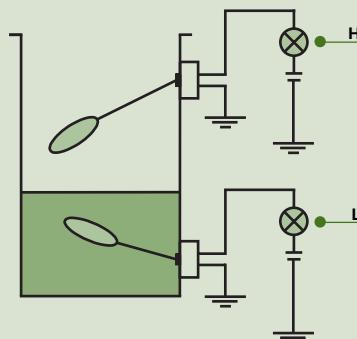


MEDIÇÃO DE NÍVEL DESCONTÍNUA POR BÓIA

Diversas técnicas podem ser utilizadas para medição descontínua, desde uma simples bóia acoplada a contatos elétricos, até sensores eletrônicos do tipo capacitivo ou ultra-sônico, que se diferenciam pela sensibilidade, tipo de fluido, características operacionais de instalação e custo (Figura 50).

FIGURA 50 NÍVEL DESCONTÍNUO

Por bóia



Unidade 4

Medição de vazão

A medição de vazão inclui, no seu sentido mais amplo, a determinação da quantidade de líquidos, gases e sólidos que passa por um local específico na unidade de tempo; podem também ser incluídos os instrumentos que indicam a quantidade total movimentada, num 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). A vazão instantânea é dada por uma dessas unidades, dividida por uma unidade de tempo (litros/min, m³/hora, galões/min). No caso de gases e vapores, a vazão instantânea pode ser expressa em kg/h ou em m³/h.

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 Nm³/h (metros cúbicos normais por hora, à temperatura de 0°C e à pressão atmosférica) ou em SCFM (pés cúbicos *standard* por minuto: temperatura 60°F e 14,696 PSIA de pressão atmosférica).



ATENÇÃO PARA ESTAS CONVERSÕES

$$1 \text{ m}^3 = 1.000 \text{ litros}$$

$$1 \text{ galão (americano)} = 3,785 \text{ litros}$$

$$1 \text{ pé cúbico} = 0,0283168\text{m}^3$$

$$1 \text{ libra} = 0,4536\text{kg}$$

Tipos de medidores de vazão

Existem dois tipos de medidores de vazão: os de quantidade e os volumétricos.

Medidores de quantidade

São aqueles que, a qualquer instante, permitem saber a quantidade de fluxo que passou, mas não a vazão do fluxo que está passando, como por exemplo as bombas de gasolina, os hidrômetros, as balanças industriais etc.

■ Medidores de quantidade por pesagem

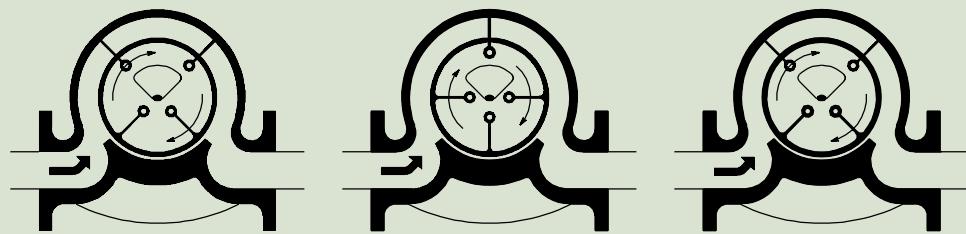
São as balanças industriais, utilizadas para medição de sólidos.

■ Medidores de quantidade volumétrica

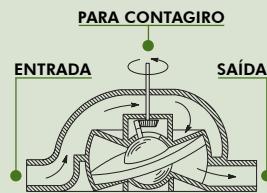
São aqueles que o fluido, ao passar em quantidades sucessivas pelo mecanismo de medição, aciona o mecanismo de indicação.

Estes medidores são utilizados como elementos primários das bombas de gasolina e dos hidrômetros, como por exemplo os da Figura 51: disco nutante, tipo pistão rotativo, tipo pás giratórias, tipo engrenagem etc.

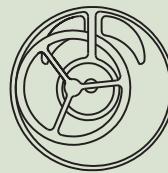
FIGURA 51 TIPOS DE MEDIDORES DE VAZÃO



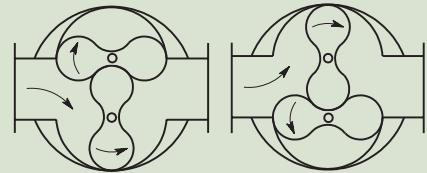
Tipo Pás Giratórias



Disco Nutante



Tipo Pistão Rotativo



Tipo de Engrenagem

Medidores volumétricos

São aqueles que exprimem a vazão por unidade de tempo.

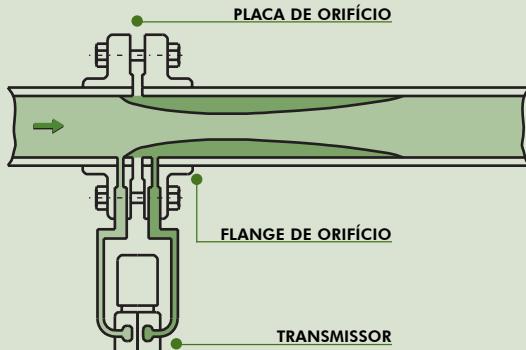
■ Medição de vazão por pressão diferencial

A pressão diferencial é produzida por vários tipos de elementos primários, colocados nas tubulações de forma tal que o fluido passe através deles. A sua função é aumentar a velocidade do fluido, diminuindo a área da seção em um pequeno comprimento para haver uma queda de pressão. A vazão pode então ser medida a partir desta queda. Esse tipo de medição pode ser observado na Figura 52.

Uma vantagem primordial dos medidores de vazão por pressão diferencial é que eles podem ser aplicados a uma grande variedade de medições, envolvendo a maioria dos gases e líquidos, inclusive fluidos com sólidos em suspensão, bem como fluidos viscosos, em uma faixa de temperatura e pressão bastante ampla. Um inconveniente deste tipo de medidor é a perda de carga que ele causa ao processo, sendo a placa de orifício o dispositivo que provoca a maior perda de carga irrecuperável.

FIGURA 52 MEDIÇÃO DE VAZÃO

Por pressão diferencial



■ Rotâmetros

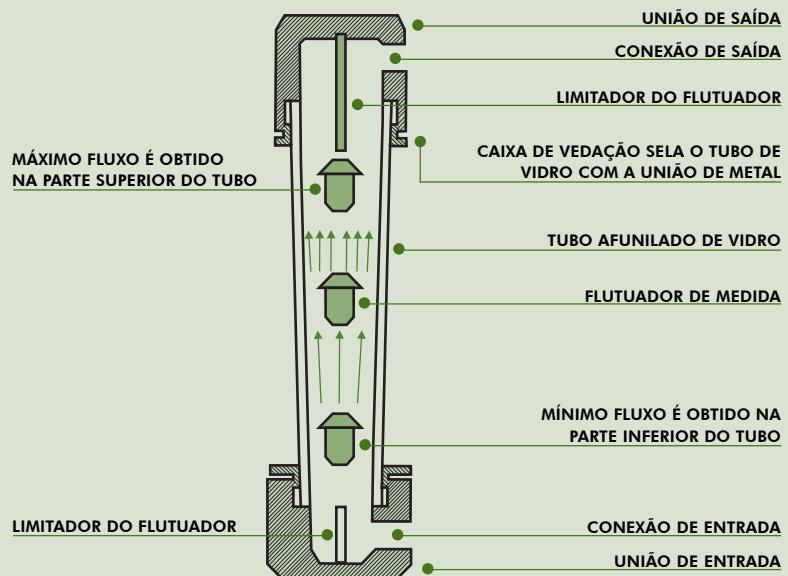
São medidores de vazão por área variável, nos quais um flutuador varia sua posição dentro de um tubo cônico, proporcionalmente à vazão do fluido. Na Figura 53, na página a seguir, pode-se observar um rotâmetro.



O ROTÂMETRO É FORMADO POR DUAS PARTES

- ✓ Um tubo de vidro de formato cônico, o qual é colocado verticalmente na tubulação em que passará o fluido a ser medido.
A extremidade maior do tubo cônico fica voltada para cima
- ✓ No interior do tubo cônico, um flutuador que se moverá verticalmente em função da vazão medida

FIGURA 53 ROTÂMETRO



PRINCÍPIO BÁSICO DE FUNCIONAMENTO DOS ROTÂMETROS

O fluido passa através do tubo da base para o topo. Quando não há vazão, o flutuador permanece na base do tubo, e seu diâmetro maior é em geral selecionado de tal maneira que bloquee a pequena extremidade do tubo, quase que completamente. Quando a vazão começa e o fluido atinge o flutuador, o empuxo torna o flutuador mais leve; porém, como o flutuador tem uma densidade maior que a do fluido, o empuxo não é suficiente para levantar o flutuador.

A área de passagem oferece resistência à vazão, e a queda de pressão do fluido começa a aumentar. Quando a pressão diferencial, somada ao efeito de empuxo do líquido, excede a pressão devido ao peso do flutuador, então ele sobe e flutua na corrente. Com o movimento ascendente do flutuador em direção à parte mais larga do tubo, a área anular entre a parede do tubo de vidro e a periferia do flutuador aumenta. Como a área aumenta, o diferencial de pressão devido ao flutuador decresce.

O flutuador ficará em equilíbrio dinâmico quando a pressão diferencial através do flutuador, somada ao efeito do empuxo, contrabalançar o seu peso. Qualquer aumento na vazão movimenta o flutuador para a parte superior do tubo de vidro, e a diminuição causa uma queda a um nível

mais baixo. Cada posição do flutuador corresponde a um valor determinado de vazão, e somente um. É necessário colocar uma escala calibrada na parte externa do tubo, e a vazão poderá ser determinada pela observação direta da posição do flutuador.

Dispositivos dos medidores volumétricos

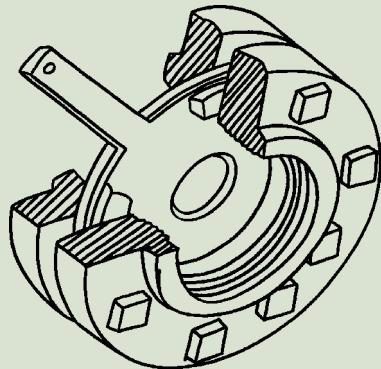
■ Placa de orifício

Dos muitos dispositivos inseridos numa tubulação para se criar uma pressão diferencial, o mais simples e mais comumente empregado é o da placa de orifício, conforme mostra a Figura 54.

Consiste em uma placa precisamente perfurada, a qual é instalada perpendicularmente ao eixo da tubulação.

É essencial que as bordas do orifício estejam sempre perfeitas, porque se ficarem imprecisas ou corroídas pelo fluido, a precisão da medição será comprometida. Costumeiramente, essas bordas são fabricadas com aço inox, monel, latão etc., dependendo do fluido.

FIGURA 54 PLACA DE ORIFÍCIO



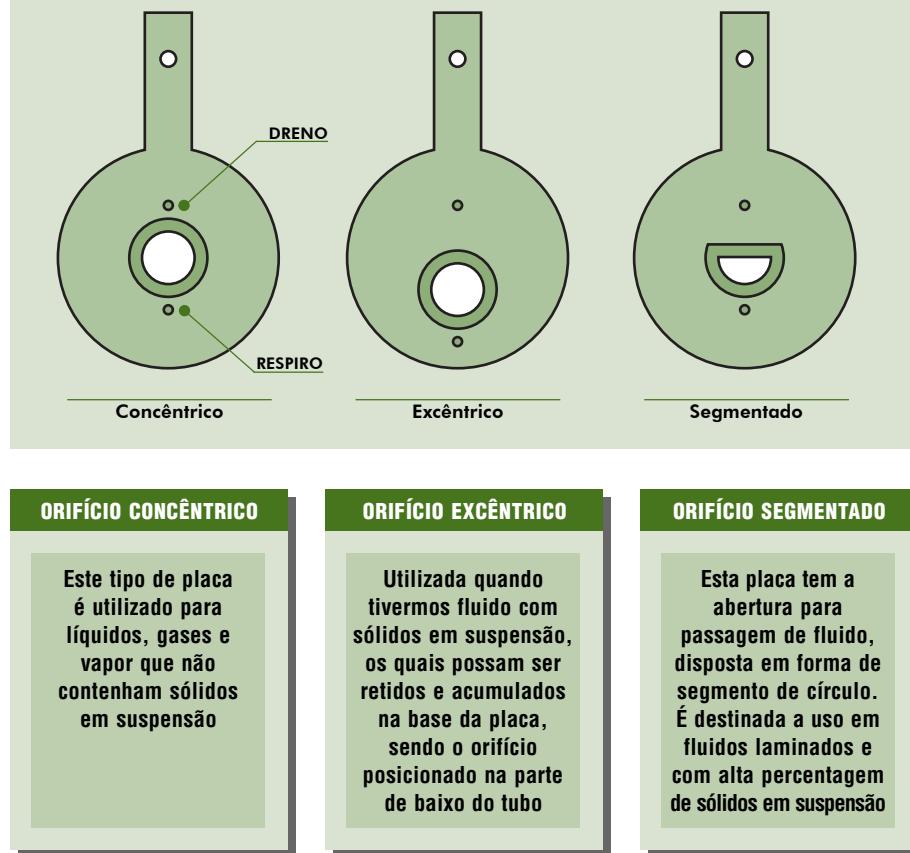
PLACAS DE ORIFÍCIO MAIS VANTAGENS QUE DESVANTAGENS



VANTAGENS	DESVANTAGENS
Instalação fácil	Alta perda de carga
Economia	Baixa rangeabilidade
Construção simples	
Manutenção e troca simples	

Na Figura 55, na página a seguir, pode-se ver alguns tipos de orifícios que serão descritos.

FIGURA 55 TIPOS DE ORIFÍCIO

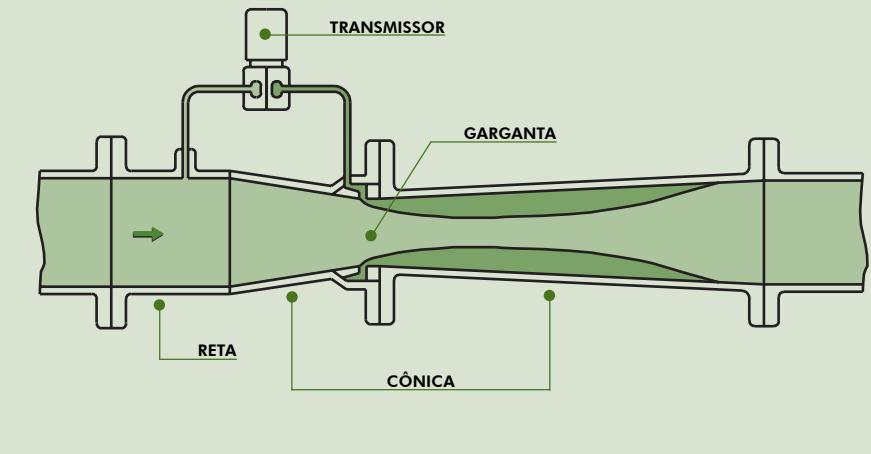


■ Tubo venturi

A Figura 56 apresenta o tubo venturi, que combina, dentro de uma unidade simples, uma curta garganta estreitada entre duas seções cônicas. É usualmente instalado entre dois flanges, numa tubulação, sendo seu propósito acelerar o fluido e temporariamente baixar sua pressão estática.

A recuperação de pressão em um tubo venturi é bastante eficiente, como podemos ver na Figura 56. Seu uso é recomendado quando se deseja um maior restabelecimento de pressão e quando o fluido medido carrega sólidos em suspensão. O venturi produz um diferencial menor que uma placa de orifício para uma mesma vazão e diâmetro igual à sua garganta.

FIGURA 56 TUBO VENTURI

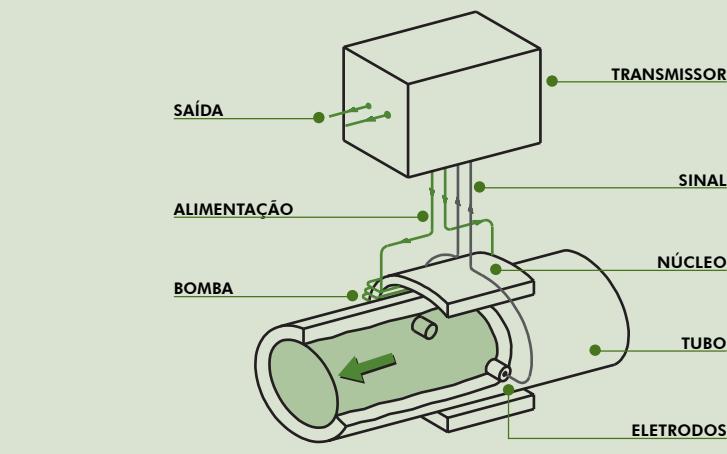


Medidores especiais de vazão

Medidor eletromagnético de vazão

O medidor magnético de vazão é seguramente um dos mais flexíveis e universais dentre os métodos de medição de vazão (Figura 57). Sua perda de carga é equivalente à de um trecho reto de tubulação, já que não possui qualquer obstrução. É virtualmente insensível à densidade e à viscosidade do fluido de medição. Os medidores magnéticos são ideais para

FIGURA 57 MEDIDOR MAGNÉTICO DE VAZÃO



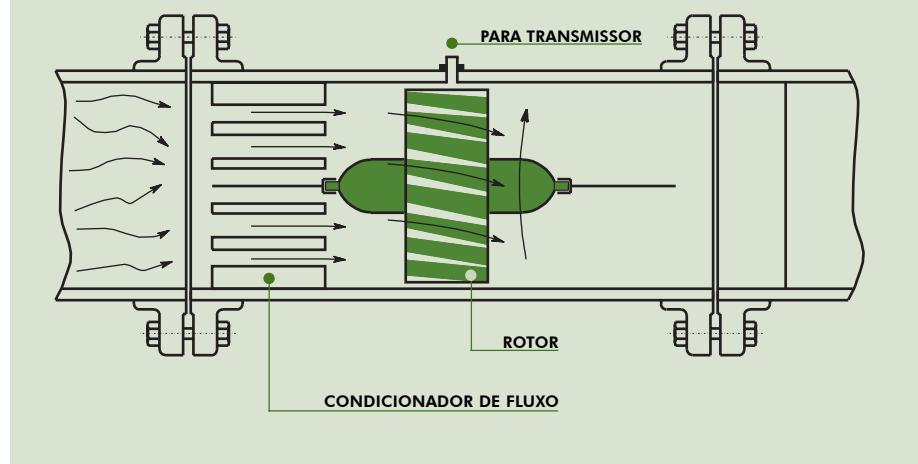
medições de produtos químicos altamente corrosivos, fluidos com sólidos em suspensão, lama, água e polpa de papel. Sua aplicação estende-se desde saneamento até indústrias químicas, papel e celulose, mineração e indústrias alimentícias. A única restrição, em princípio, é que o fluido tem que ser eletricamente condutivo. Apresenta ainda como limitação o fato de fluidos com propriedades magnéticas adicionarem um certo erro de medição.

Medidor tipo turbina

Na Figura 58 apresentamos esse medidor, que é constituído por um rotor montado axialmente na tubulação. O rotor é provido de aletas que o fazem girar quando passa um fluido na tubulação do processo. Uma bobina captadora com um ímã permanente é montada externamente à trajetória do fluido. Quando este se movimenta através do tubo, o rotor gira a uma velocidade determinada pela velocidade do fluido e pelo ângulo das lâminas do rotor. À medida que cada lâmina passa diante da bobina e do ímã, ocorre uma variação da *relutância* do circuito magnético e no fluxo magnético total a que está submetida a bobina. Verifica-se então a indução de um ciclo de tensão alternada.

A freqüência dos pulsos gerados desta maneira é proporcional à velocidade do fluido, podendo a vazão ser determinada pela medição/totalização de pulsos.

FIGURA 58 MEDIDOR TIPO TURBINA



Unidade 4

Elementos finais de controle

Elementos finais de controle são aqueles, dentro de uma malha de controle, responsáveis pela atuação direta sobre os processos, recebendo sinal de comando do controlador para corrigir o desvio do valor desejado (*set point*). Na maioria dos casos este elemento final é uma válvula, podendo ser também uma bomba, uma solenóide, um pistão, um motor elétrico etc. Na Figura 59 apresenta-se uma válvula de controle.

FIGURA 59 VÁLVULA DE CONTROLE



Válvulas de controle

São dispositivos manuais ou automáticos que consistem em uma restrição variável à passagem do fluxo e se classificam conforme o tipo de deslocamento.

Tipos de deslocamento

Essas peças podem possuir deslocamento linear e rotativo.

FIGURA 60 VÁLVULA GLOBO



LINEAR

A peça móvel (haste e *plug*) descreve um movimento retilíneo, como por exemplo a válvula globo e o diafragma

FIGURA 61 VÁLVULA BORBOLETA



ROTATIVA

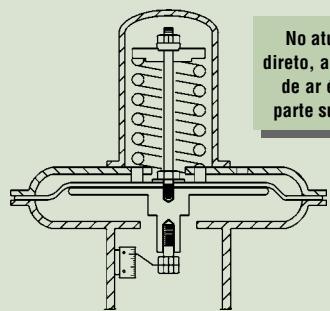
A peça móvel (haste e *plug*) descreve um movimento de rotação, como nas válvulas esfera e borboleta

Partes das válvulas de controle

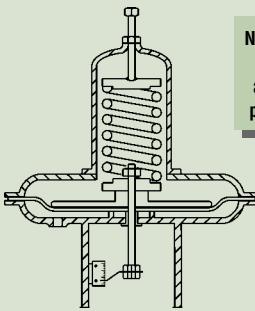
As válvulas de controle se compõem de três partes básicas: atuador, castelo e corpo.

■ Atuador

Dá a força necessária para movimentar o obturador em relação à sede da válvula. O atuador de uma válvula de controle é classificado de acordo com seu deslocamento em relação à entrada de ar de sinal. Pode ser direto ou indireto.

FIGURA 62 ATUADOR DIRETO

No atuador direto, a entrada de ar é pela parte superior

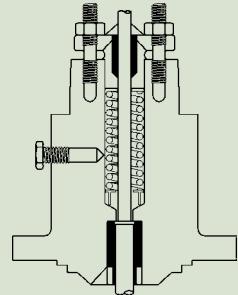
FIGURA 63 ATUADOR INDIRETO

No atuador indireto ou reverso, a entrada de ar é pela parte inferior

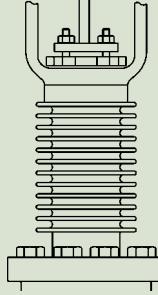
Castelo

Permite a conexão do atuador ao corpo e serve de guia da haste do obturador, acomodando a caixa de engaxetamento.

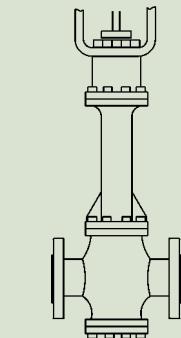
O castelo de uma válvula de controle pode ser do tipo: normal, aletado, alongado ou com foles de vedação, como mostram as Figuras 64 a 67.

FIGURA 64 CASTELO NORMAL

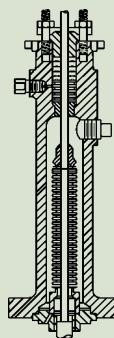
Uso geral para produtos abaixo de 180°C

FIGURA 65 CASTELO ALETADO

Utilizado para produtos acima de 180°C

FIGURA 66 CASTELO ALONGADO

Utilizado para produtos abaixo de 5°C

FIGURA 67 CASTELO COM FOLES

De vedação

Utilizado para produtos tóxicos e radioativos

Corpo

É a parte da válvula que entra em contato com o fluido, acomoda as sedes e permite o acoplamento da válvula à linha de processo. O corpo de uma válvula pode ser classificado como de sede simples ou sede dupla, como mostram as Figuras 68 e 69.

FIGURA 68 SEDE SIMPLES

O corpo é dotado de um orifício de passagem e um elemento vedante simples

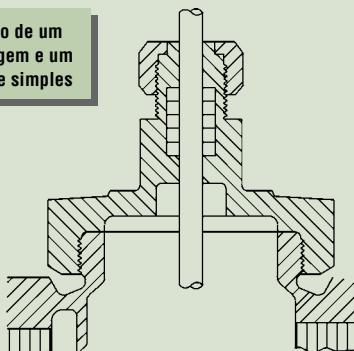
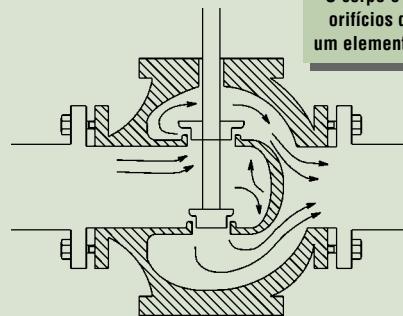


FIGURA 69 SEDE DUPLA

O corpo é dotado de dois orifícios de passagem e um elemento vedante duplo



PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS

- ✓ Baixo custo
- ✓ Fácil manutenção e operação
- ✓ Boa vedação
- ✓ Mais força de atuação devido à pressão que o produto na linha impõe sobre o atuador
- ✓ Instalação de forma que a pressão do produto na linha tende a abri-la

PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS

- ✓ Maior custo, porém mais utilizada
- ✓ Menor esforço do atuador
- ✓ Escoamento do fluido por duas passagens distintas
- ✓ Guias de haste no topo e na base
- ✓ Vedação não perfeita (+0,2% a +0,5% de vazamento máximo tolerável)

Válvula de controle: ação

Após ter sido verificado em quantas partes se divide uma válvula de controle, suas funções e como se classifica cada uma delas, estudaremos a partir de agora a válvula de controle como um equipamento (instrumento) e a sua ação dentro de uma malha de controle, considerando-se inicialmente qual será o seu posicionamento (aberta ou fechada) em caso de pane em seu sistema de alimentação pneumática ou eletrônica.

De acordo com o posicionamento que deverá assumir em relação ao processo, no caso de pane do sistema de alimentação, a válvula poderá ser de ação direta (Ar p/ Fechar ou Falha Abre), ou de ação reversa (Ar p/ Abrir ou Falha Fecha).

VÁLVULA DE AÇÃO DIRETA

AR PARA FECHAR (A.F.) OU FALHA ABRE (F.A.)

Como funciona a válvula de ação direta



- 1 Com o aumento da pressão de ar na cabeça da válvula, a haste do atuador desloca-se de cima para baixo até provocar o assentamento do obturador na sede, fechando a válvula
- 2 Com a diminuição da pressão do ar, a haste se deslocará de baixo para cima, abrindo a válvula



VÁLVULA DE AÇÃO REVERSA

AR PARA ABRIR (A.A.) OU FALHA FECHA (F.F.)

Como funciona a válvula de ação reversa



- 1 Com o aumento da pressão de ar na cabeça da válvula, a haste do atuador desloca-se de baixo para cima, provocando a abertura da válvula
- 2 Com a diminuição da pressão do ar, a haste se deslocará de cima para baixo até provocar o assentamento do obturador na sede, fechando a válvula



Posicionador

O posicionador (veja Figura 70) é considerado o principal acessório de uma válvula de controle.

Consiste em um dispositivo que transmite a pressão de carga ao atuador, permitindo posicionar a haste da válvula no local exato determinado pelo sinal de controle.

FIGURA 70 POSICIONADOR





ATENÇÃO

Como usar o posicionador



- 1 Aumentar força de assentamento em válvulas de sede simples
- 2 Compensar força gerada pelo atrito do conjunto atuador
- 3 Aumentar velocidade de resposta
- 4 Permitir operação em faixa dividida
- 5 Inverter ação da válvula
- 6 Modificar as características de vazão da válvula

Características de vazão de uma válvula

O desempenho de uma válvula depende da forma e do tipo de obturador utilizado e como o mesmo reduz a área do orifício (sede) através do qual passa o fluido. A característica de vazão de uma válvula demonstra a proporcionalidade da variação da vazão do fluido em relação à variação do deslocamento da haste. Existem três características de vazão: a linear, a de abertura rápida e a de igual percentagem.

LINEAR

Uma válvula de característica de vazão linear, ou seja, com obturador linear, produz uma variação de vazão proporcional à variação de sua abertura

IGUAL PERCENTAGEM

Para um deslocamento unitário da haste da válvula, a vazão varia à mesma percentagem. Assim, por exemplo, se a haste da válvula mover-se 5mm de sua posição inicial, a vazão variará 20% do seu valor inicial. Quando a haste da válvula mover outros 5mm, a vazão variará mais 20% em cima do valor de vazão deixado pela primeira variação de 5mm da haste. Podemos concluir, portanto, que esta característica resultará em uma exponencial

ABERTURA RÁPIDA

Uma válvula de característica de vazão de abertura rápida, ou seja, com obturador de abertura rápida, produz uma grande variação na taxa de vazão, para uma pequena variação na posição da haste. Este tipo de válvula é freqüentemente utilizado em controles on-off (liga-desliga)

Unidade 4

Controle e automação industrial

As funções básicas do controle são a medição, a comparação e a correção.

MEDIÇÃO	COMPARAÇÃO	CORREÇÃO
O transmissor, cujo elemento primário está em contato com a variável, transforma o valor lido em sinal padrão e envia-o para o controlador	O controlador, ao receber o sinal, compara-o com o valor desejado (<i>set-point</i>)	Caso exista desvio, o controlador emite um sinal de correção para o elemento final de controle

Atrasos de tempo do processo

Os processos têm características que atrasam as mudanças nos valores das variáveis, o que, consequentemente, dificulta a ação de controle.

CAPACITÂNCIA	RESISTÊNCIA	TEMPO MORTO
É a capacidade que partes do processo têm de armazenar energia ou material	São as partes do processo que resistem a uma transferência de energia ou material, entre capacitâncias	É o tempo verificado entre a ocorrência de uma alteração no processo e a sua percepção pelo elemento sensor (transmissor)

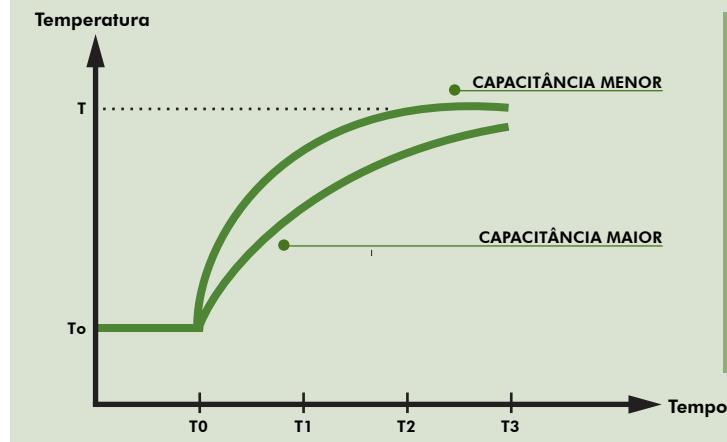
Atrasos na malha de controle

São os atrasos inerentes à associação de instrumentos, como por exemplo atrasos na medição, na transmissão, dos controladores e do elemento final de controle.

Processo monocapacitivo (processo de 1^a ordem)

A Figura 71 mostra um processo de 1^a ordem.

FIGURA 71 CURVA DE REAÇÃO



PROCESSO 1

Capacitância menor

PROCESSO 2

Capacitância maior

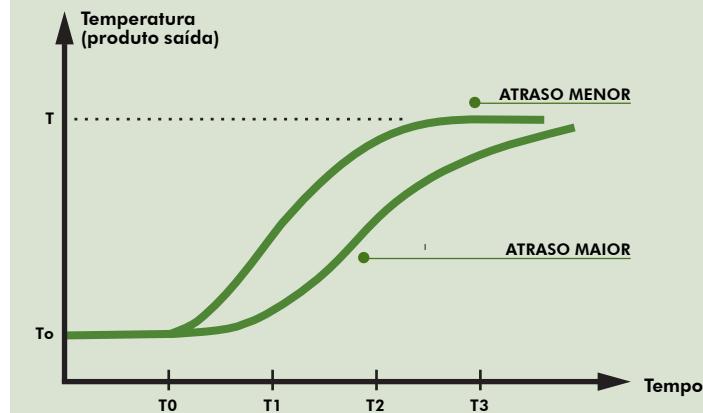
OBSERVAÇÃO

Ambas as curvas indicam que a variável começa a aumentar exatamente ao mesmo tempo em que o distúrbio é provocado

Processo bicapacitivo (processo de 2^a ordem)

A Figura 72 mostra um processo de 2^a ordem.

FIGURA 72 CURVA DE REAÇÃO



PROCESSO 1

Atraso menor

PROCESSO 2

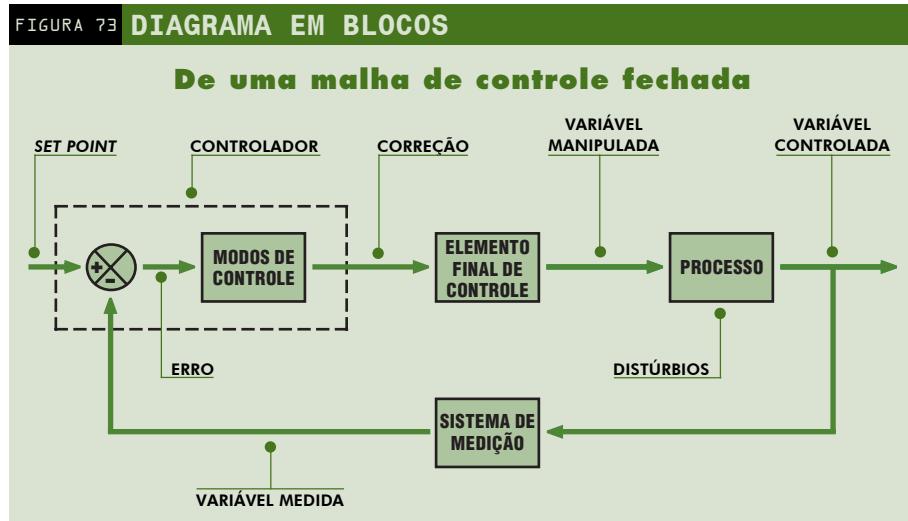
Atraso maior

OBSERVAÇÃO

Note que a variável, em vez de mudar imediatamente, começa a subir de forma lenta. Por este motivo, as correções só são aplicadas após um determinado tempo. A resposta deste processo apresenta sempre um atraso em relação à resposta do monocapacitivo

Processo multicapacitivo

Possui mais de duas capacitâncias, porém seu comportamento é similar ao processo bicapacitivo, como podemos notar na Figura 73.



Ações de um controlador

Controlador de ação direta

Sabe-se que o erro é:

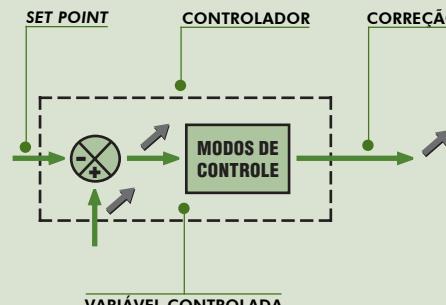
$$E = VC - SP$$

Quando $VC = SP$, o erro é zero
(situação de regime ideal)

Supondo *set point* constante, se a variável controlada tende a subir, o sinal de entrada da caixa "Modo de Controle" tenderá também a subir, e a correção idem, como mostra a Figura 74.

Um controlador é dito de ação direta (AD) quando um aumento de sinal da variável medida (variável controlada) provoca um aumento do seu sinal de saída.

CONTROLADOR DE AÇÃO DIRETA



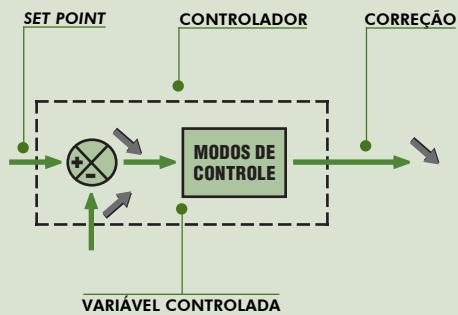
Controlador de ação inversa (reversa)

Sabe-se que o erro é:

$$E = SP - VC$$

Quando $VC = SP$, o erro é zero (situação de regime ideal)

FIGURA 75 CONTROLADOR DE AÇÃO INVERSA

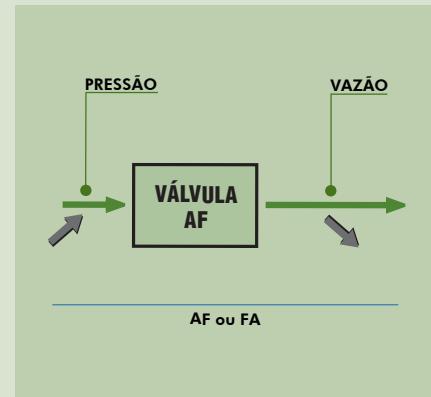
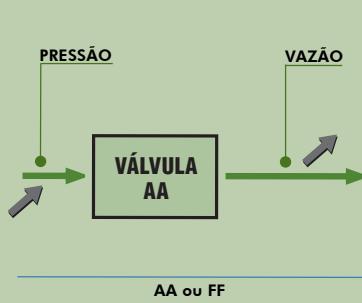


Supondo *set point* constante, se a variável controlada tende a subir, o sinal de entrada da caixa "Modo de Controle" tenderá a descer, e a correção idem, como mostra a Figura 75. Um controlador é dito de ação inversa (AI) quando um aumento de sinal da variável medida (variável controlada) provoca uma diminuição do seu sinal de saída.

Ações de uma válvula de controle

Observe a Figura 76. Devemos pesquisar o melhor conjunto de associação para que se consiga alcançar o controle pretendido. Deve ser considerada a situação de segurança para a qual o sistema tem de evoluir no caso de falta de energia. Por exemplo: na ausência de ar, a válvula AA fechará, enquanto a válvula AF, na mesma situação, abrirá.

FIGURA 76 AÇÕES DE UMA VÁLVULA DE CONTROLE



Modos de controle

É a maneira pela qual um controlador faz a correção em resposta a um desvio da variável controlada.

Os modos de controle são quatro:

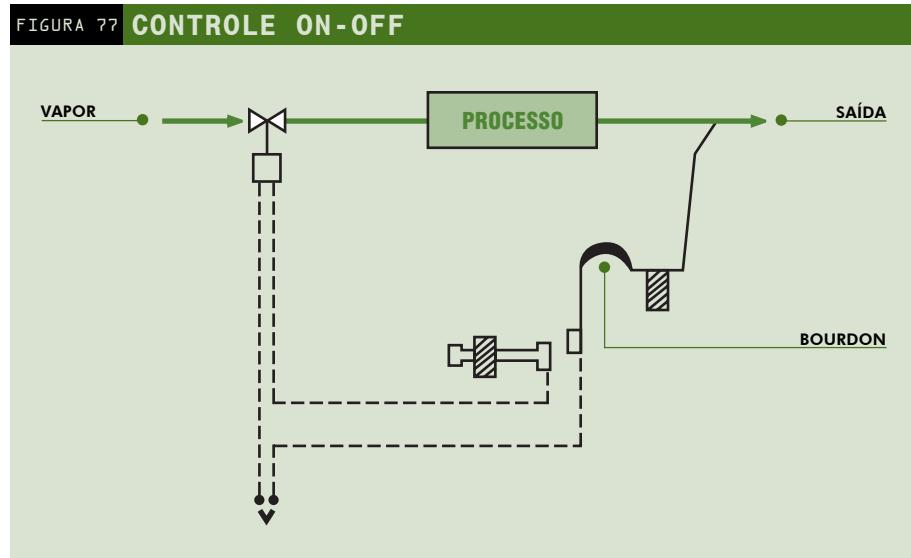
- Duas posições (*on-off*)
- Proporcional
- Integral (*reset*)
- Derivativo (*rate ou pre-act*)

Industrialmente os controladores convencionais são construídos com os seguintes modos:

- Duas posições (*on-off*)
- Proporcional
- Proporcional + Integral (P + I)
- Proporcional + Derivativo (P + D)
- Proporcional + Integral + Derivativo (P + I + D)

Controle on-off

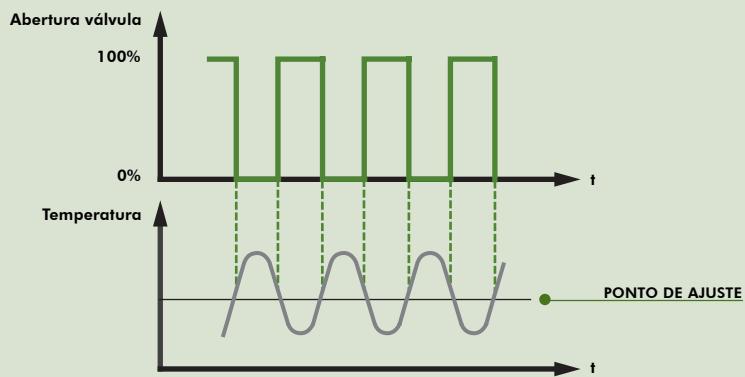
É o mais simples e mais barato. Este modo de controle só permite duas posições do elemento final: aberto/fechado ou ligado/desligado.



Seu uso fica restrito a processos que apresentam grande capacidade ou a processo em que a oscilação não seja prejudicial. É um controle muito utilizado em sistemas de segurança.

FIGURA 78 POSIÇÃO DA VÁLVULA X VARIÁVEL CONTROLADA

No controle on-off

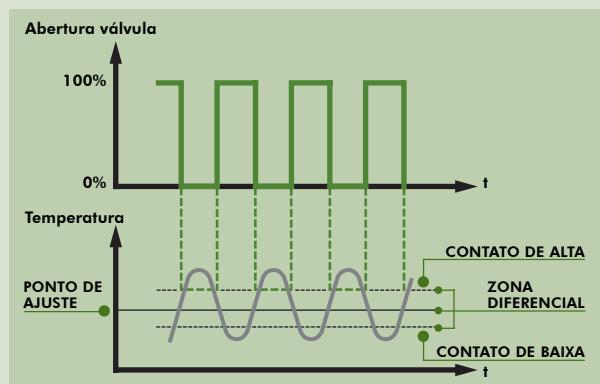
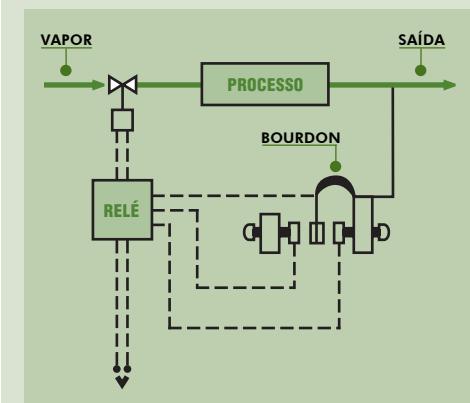


Controle on-off com zona diferencial

Um refrigerador, por exemplo, com set em 5°C pode ligar quando a temperatura chegar a 7°C, e desligar quando cai a 3°C. Existe aí um diferencial ou zona morta de 4°C. Esta zona diferencial pode ser ajustada de acordo com a necessidade.

FIGURA 79 POSIÇÃO DA VÁLVULA X VARIÁVEL CONTROLADA

No controle on-off com zona diferencial



Controle proporcional

Neste controle, a amplitude de correção é proporcional à amplitude do desvio. O elemento final se move para uma determinada posição, para cada valor de desvio.

A informação de variação do processo chega ao controlador, onde é constatado o desvio do valor desejado. Neste momento o controlador começa a dar uma correção proporcional a este erro, mandando abrir ou fechar a válvula, para que a variável possa retornar ao valor desejado. Como neste modo de controle a correção é proporcional ao tamanho do erro, a válvula reagirá para determinada posição, que causará uma nova situação de equilíbrio ao processo, diferente da anterior.

Após este equilíbrio, verifica-se a presença de um erro final chamado de *off-set* ou erro de regime. Este erro torna-se limitante para o uso do controlador puramente proporcional. Vale ressaltar que este erro pode ser minimizado e não eliminado automaticamente, o que pode ser feito através de um ajuste do controlador proporcional.

■ A redução do *off-set* se faz possível através da alteração dos ajustes do controlador proporcional, que são ganho ou faixa proporcional. Cabe ressaltar que, através deste ajuste, poderemos minimizar o *off-set* e não eliminá-lo

■ A eliminação do *off-set* só é possível, em um controlador puramente proporcional, através de um ajuste manual da saída do controlador. Para isso se faz necessário que passemos a malha de controle de automático para manual e alteremos os valores de saída do controlador de forma a eliminar o desvio deixado pela correção proporcional



**LEMBRE-SE
DISSO**

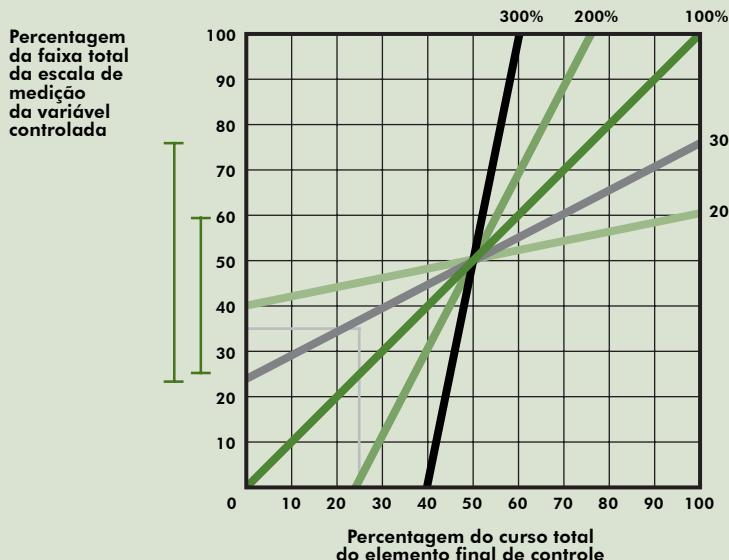
Ajustes de um controlador proporcional

Faixa proporcional (ou banda proporcional)

Faixa proporcional pode ser definida como a percentagem do *range* do instrumento que corresponde ao curso completo do elemento final de controle.

A faixa proporcional é normalmente expressa em percentagem. Por exemplo: se a banda proporcional (BP) é 20%, significa que uma variação de 20% no erro produzirá uma variação de 100% na saída, ou seja, a válvula se moverá de totalmente aberta para totalmente fechada ou vice-versa. Se a BP for maior que 100%, não promoverá o curso completo da válvula. Veja a Figura 80.

FIGURA 80 FAIXA PROPORCIONAL



Ganho ou sensibilidade

É um outro conceito para expressar a proporcionalidade. Ganho é a relação entre a variação de saída do controlador para válvula e a variação da entrada do controlador (variável).



$$K_c = \frac{\Delta s}{\Delta e}$$

Quanto maior for o ganho, maior será a variação da saída do instrumento, para uma mesma variação da variável. O instrumento reagirá mais fortemente quanto maior for o seu ganho. Matematicamente, temos:

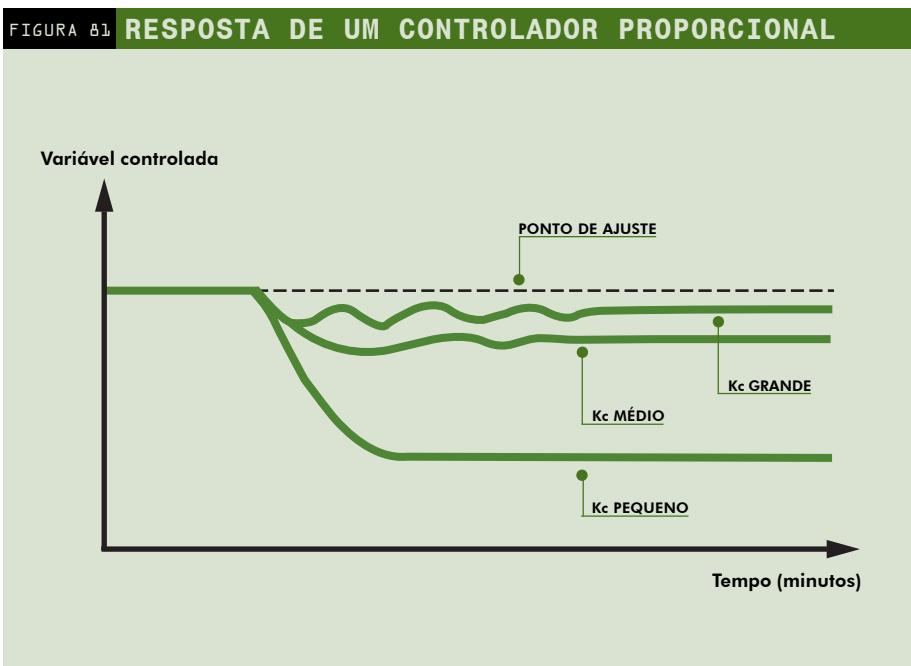
$$K_c = \frac{1}{BP} \quad \text{ou} \quad K_c = \frac{100\%}{BP}$$

Quando a BP for em percentual

NOTA

Quanto maior for a BP ajustada, menor será o ganho do instrumento e vice-versa. Ver Figura 81, na página ao lado

FIGURA 81 RESPOSTA DE UM CONTROLADOR PROPORCIONAL



Influência do ajuste da faixa proporcional (ou do ganho)

Um ajuste indevido no controlador pode provocar oscilações violentas ou respostas lentas demais.

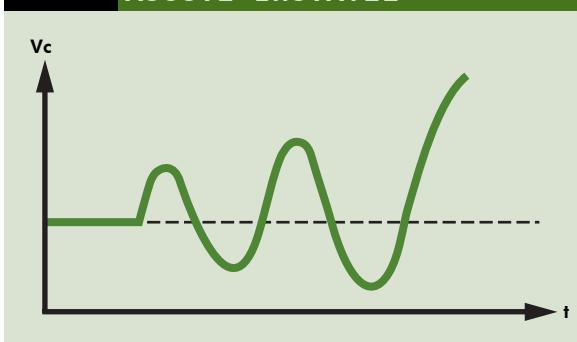
Características do ajuste

Quanto maior for o ajuste do ganho, menor será o off-set deixado pela correção, porém maior será a instabilidade (oscilação).

Quanto menor for o ajuste do ganho, menor será a instabilidade (oscilação), porém maior será o off-set deixado pela correção.

Nota-se que o erro aumenta, apesar de o controlador agir corretamente. Significa que o controlador está agindo em demasia, levando o processo a uma "instabilidade" (Figura 82).

FIGURA 82 AJUSTE INSTÁVEL



Isto representa um ajuste inadequado da BP, ou seja, uma BP muito pequena (ou ganho, muito alto). Nota-se que o sistema está “criticamente estável”. Esta resposta representa que houve um aumento da BP (diminuição do ganho) em relação à resposta (instável) (Figura 83).

Nota-se que o controlador levará o processo a uma estabilidade. Quando o sistema parar de oscilar, restará o *off-set* característico do controlador proporcional. Esta resposta representa que houve um aumento da BP (diminuição do ganho) em relação à resposta de oscilação contínua (Figura 84).

FIGURA 83 OSCILAÇÃO CONTÍNUA

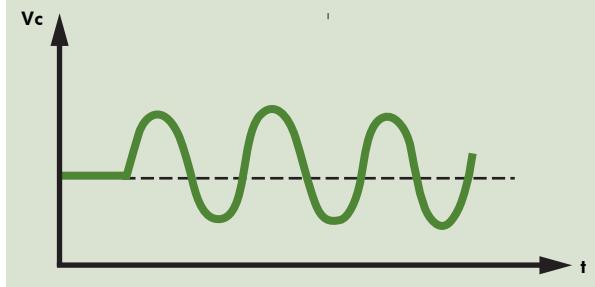
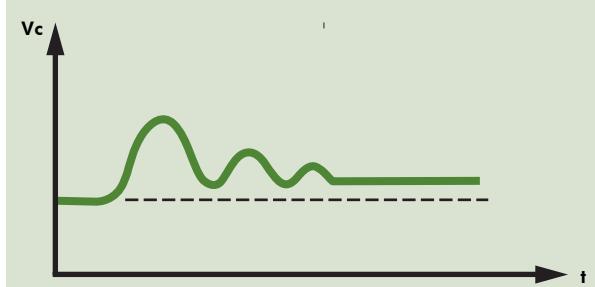


FIGURA 84 AJUSTE ESTÁVEL



CONCLUSÃO

O controlador puramente proporcional pode ser empregado em quase todo tipo de processo, bastando que este processo seja tolerante ao *off-set*

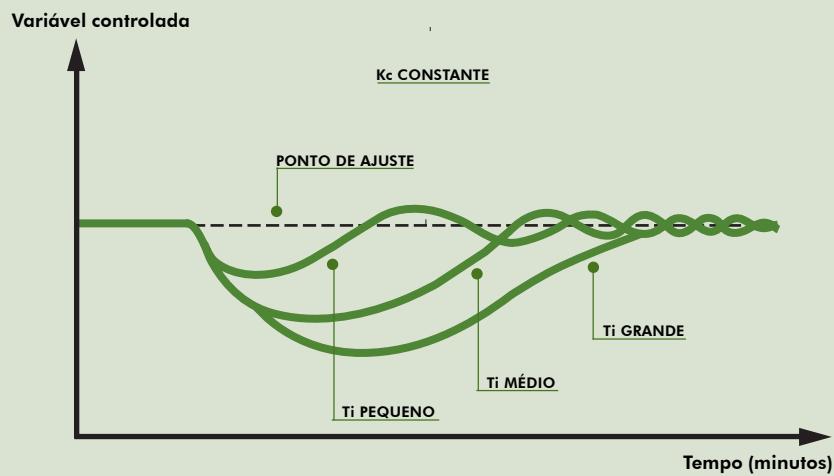
Controle proporcional + integral

Tem-se aí o melhor dos dois modos de controle. O modo proporcional, que corrige os erros instantaneamente, e o integral, que se encarrega de eliminar, ao longo do tempo, o *off-set* característico do modo proporcional.

Neste controlador, o modo integral executa automaticamente o reajuste manual que o operador faria para eliminar o *off-set*.

A ação integral ocasiona uma correção tal que a velocidade de correção é proporcional à amplitude do desvio. O modo de correção integral não é utilizado sozinho, pois corrige muito lentamente (Figura 85).

FIGURA 85 CONTROLADORES PROPORCIONAL + INTEGRAL



Ajuste de um controlador integral

■ Taxa de reset ou tempo integral

O ajuste do controlador integral é descrito pelo tempo integral (*reset time* ou T_i) em minutos, podendo ser ajustado através do botão existente no controlador. Define-se como sendo o tempo necessário para que a ação integral repita uma vez o efeito da ação proporcional. A taxa de reset (*reset rate* ou R) é uma outra maneira de definir o tempo integral e expressa-se como sendo o número de vezes que a ação integral repete o efeito da ação proporcional no tempo de 1 minuto. Matematicamente, temos:

$$R = \frac{1}{T_i}$$

Onde:

R = Taxa de *reset*: em repetições por minuto (rpm)

T_i = Tempo integral: em minuto por repetições (mpr)

Características do ajuste:

- Quanto maior "R", mais rápida será a correção, devido à ação integral
- Quanto menor o "Ti", mais rápida será a correção, devido à ação integral
- Quando se altera o valor do ganho em um controlador P + I, alteram-se simultaneamente as correções do modo proporcional e integral
- Quando se altera "R" ou "Ti", altera-se somente a correção do modo integral
- Para se eliminar a ação integral, leva-se o "Ti" para o valor máximo

■ O controlador P + I possui dois parâmetros de ajuste:
o *ganho* (ou faixa proporcional) e a *t taxa de reset*
(ou tempo integral). Ambos ajustáveis por botões
existentes no instrumento

■ Da mesma maneira que no caso da ação proporcional,
existe o perigo de oscilações, quando a ação integral é
exagerada

■ A ação integral aumenta o tempo de estabilização. Por
isso, ela deve ser corretamente ajustada para que se possa
obter um controle preciso com o menor tempo de estabilização

■ O controlador P + I, em geral, pode ser utilizado para
controlar a maioria das grandezas físicas (variáveis)
normalmente encontradas em processos industriais



**LEMBRE-SE
DISSO**

Controle proporcional + derivativo

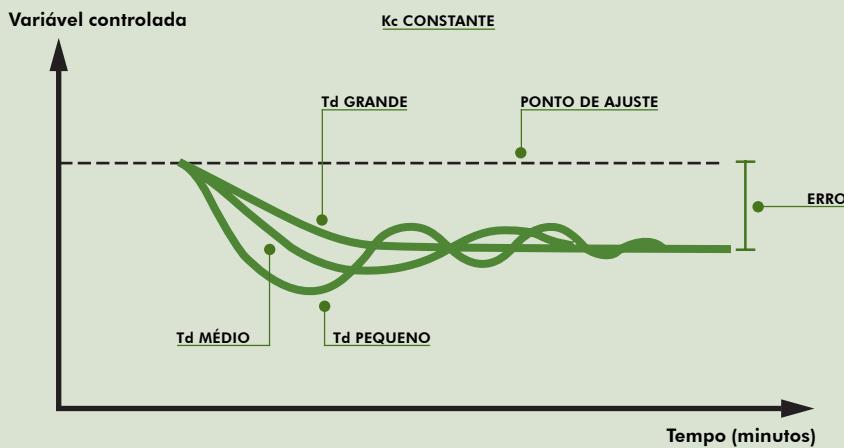
Resulta da associação entre o controlador proporcional e o derivativo. O modo derivativo acarreta uma correção proporcional à velocidade do desvio .

Quando a variável se afasta do *set-point*, o modo derivativo faz com que a saída varie mais do que ocorreria somente com o modo proporcional. Como consequência, a variável tende a se aproximar mais rapidamente do *set-point*. Quando a variável está retornando ao *set-point*, o modo derivativo exerce uma ação contrária, reduzindo as eventuais oscilações e diminuindo o tempo de estabilização, diferente do que se houvesse somente a correção proporcional.

O efeito estabilizante do modo derivativo permite que se utilize uma faixa proporcional menor, ocasionando um *off-set* menor.

Note-se, entretanto, que o modo derivativo não é capaz de eliminar o *off-set*, visto que não exerce qualquer ação quando se tem um desvio permanente (Figura 86).

FIGURA 86 CONTROLADORES PROPORCIONAL + DERIVATIVO



Ajuste de um controlador derivativo

■ Tempo derivativo

É definido como o tempo em minutos em que o modo derivativo adianta o efeito do modo proporcional. Quanto maior o tempo derivativo (T_d), mais forte é a ação derivativa. Este tempo é expresso em minutos.

Características do ajuste:

- Quando o T_d tende a zero, vai-se inibindo a ação derivativa
- A ação derivativa pode ser considerada como um amortecimento para a resposta da variável controlada
- Quando se altera o valor do ganho em um controlador P + D, alteram-se simultaneamente as correções do modo proporcional e derivativo
- Para se eliminar a ação derivativa, leva-se T_d para zero

- O controlador P + D possui dois parâmetros de ajuste: o ganho (ou faixa proporcional) e o tempo derivativo, ambos ajustáveis por botões existentes no instrumento
- Tem uso limitado na prática industrial, visto que, embora o modo derivativo tenha efeito estabilizante devido à sua característica de se opor às variações, o off-set não é eliminado
- O controlador P + D é mais utilizado em processos de variações lentas. Sua aplicação resulta em respostas mais rápidas



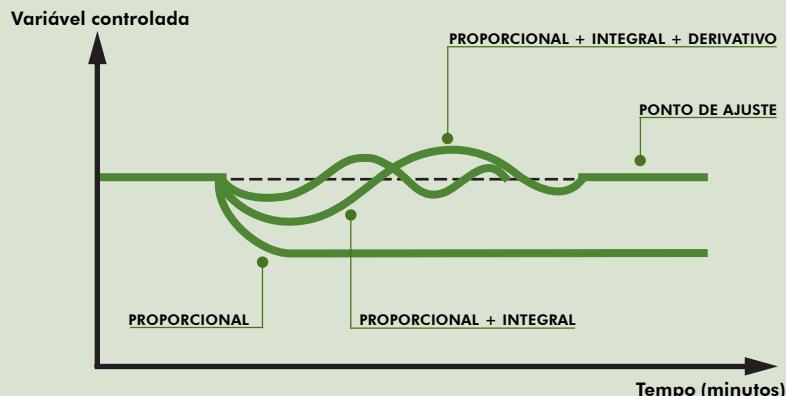
**LEMBRE-SE
DISSO**

Controle proporcional + integral + derivativo

Resulta da associação dos três tipos de controle. Combinam-se dessa maneira as vantagens de cada um dos modos de controle. A vantagem de se incluir a ação derivativa no controlador P + I pode ser vista na Figura 87.

FIGURA 87 COMPARAÇÃO DOS CONTROLADORES

Proporcional, proporcional + integral, e proporcional + integral + derivativo



NOTA

Note que, com o P + I + D, o processo se estabiliza mais rapidamente e temos um desvio máximo reduzido

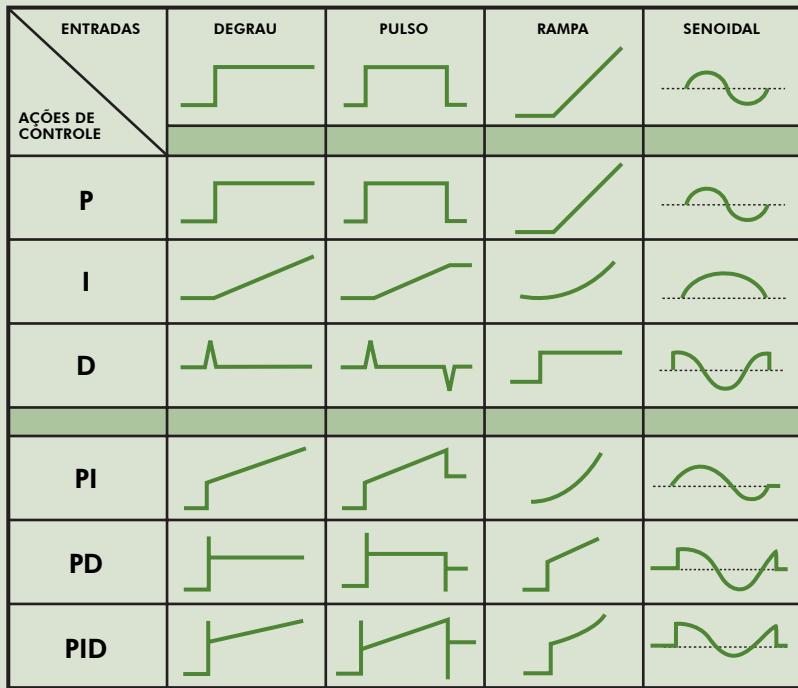
- O controlador P + I + D tem três parâmetros de ajuste:
 - Ganho ou faixa proporcional
 - Taxa de *reset* ou tempo integral
 - Tempo derivativo
- Utilizado quando se deseja uma grande rapidez de correção, ausência de *off-set*, aliados a um desvio máximo reduzido
- Em geral, não há necessidade de ação derivativa no controle de nível e pressão
- No caso de vazão, utilizam-se os modos proporcional e integral. A adição do modo derivativo em vazão se torna contraproducente
- O modo derivativo é adicionado normalmente no controle de temperatura por ser considerado uma variável de reação lenta



**LEMBRE-SE
DISSO**

Observe a Figura 88, de correção dos modos de controle.

FIGURA 88 CORREÇÃO DOS MODOS DE CONTROLE



MONITORAMENTO E CONTROLE DE PROCESSOS

Ficha Técnica

PETROBRAS

MAURÍCIO LIMA

Coordenador de Formação, Capacitação e Certificação no Abastecimento

LUIS CLAUDIO MICHEL

Coordenador de Certificação para o Segmento Operação

SENAI-RJ

Produzido pela Diretoria de Educação

REGINA MARIA DE FÁTIMA TORRES

Diretora de Educação

LUIS ROBERTO ARRUDA

Gerente de Educação Profissional

Gerência de Educação Profissional

ROSILENE FERREIRA MENEZES

ANA PAULA DE BARROS LEITE

Analistas de Projetos Educacionais

ACERVO PETROBRAS

Fotografias

GERÊNCIA DE PRODUTO PETRÓLEO E GÁS

Apoio Técnico

RITA GODOY

Revisão gramatical e editorial

IN-FÓLIO – PRODUÇÃO EDITORIAL, GRÁFICA E PROGRAMAÇÃO VISUAL

Edição, projeto gráfico e produção editorial

JOSÉ CARLOS MARTINS

Produção editorial

ANA PAULA MOURA

Arte-final digital

SILVIO DIAS

Capa