

UNIVERSIDADE FEDERAL DO TRIÂNGULO MINEIRO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS E EXATAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
Disciplina: Controle de Processos Químicos I



Capítulo 1

Instrumentação Industrial

Prof. Davi Leonardo de Souza
davi.souza@uftm.edu.com

Conteúdo da aula

1.0 - Terminologia

2.0 - Tipos de instrumentos

3.0 – Instrumentação de equipamentos e unidades

4.0 - Medição das principais variáveis de processo

5.0 - Elementos finais de controle

1.0 - Terminologia

Os instrumentos de controle empregados na indústria de processo (química, siderurgia, papel, etc.) **tem sua própria terminologia**.

Os termos utilizados definem as características próprias de medidas 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, quem intervêm direta ou indiretamente no campo da instrumentação industrial.

1.1 - 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 externos.

Exemplo: 100 a 500°C; 0 a 20 psi;

1.2 - Alcance (Span): é a diferença algébrica entre o valor superior e inferior das faixas de medidas dos instrumentos.

Exemplo: 100 a 250°C, possui span = 150°C

1.3 - Erro: É a diferença entre o valor lido ou transmitido pelo instrumento em relação ao valor real da variável medida. Se o processo estiver em **regime permanente**, chamaremos de **erro estático**. Se o processo estiver em **regime transiente**, a diferença entre o erro real e o valor medido é chamado de **erro dinâmico**.

1.4 - Exatidão: é 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 medido 100°C, determine o intervalo provável do valor real para as seguintes condições:

- Exatidão 1 % do FE:
➤ 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:
➤ Valor real = $100^{\circ}\text{C} \pm (0,01 \times 200) = 100^{\circ}\text{C} \pm 2,0^{\circ}\text{C}$
- Exatidão de 1% do VL:
➤ Valor real = $100^{\circ}\text{C} \pm (0,01 \times 100) = 100^{\circ}\text{C} \pm 1,0^{\circ}\text{C}$

1.5 - Rangeabilidade (Largura da 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 300 g/min com exatidão de 1% do span e rangeabilidade 10:1, a exatidão será respeitada entre 30 g/min e 300 g/min.

1.6 - Zona morta: É a máxima variação que a variável pode ter sem que provoque alteração na indicação ou sinal de saída de um instrumento, como engrenagens.

Exemplo: Um instrumento com range de 0 a 200°C possui uma zona morta de $\pm 0,1\%$ do span.

$$\pm 0,1\% = (0,1/100) \times 200 = \pm 0,2^{\circ}\text{C}$$

Portanto se a variável alterar em 0,2°C, o instrumento não apresentará resposta nenhuma.

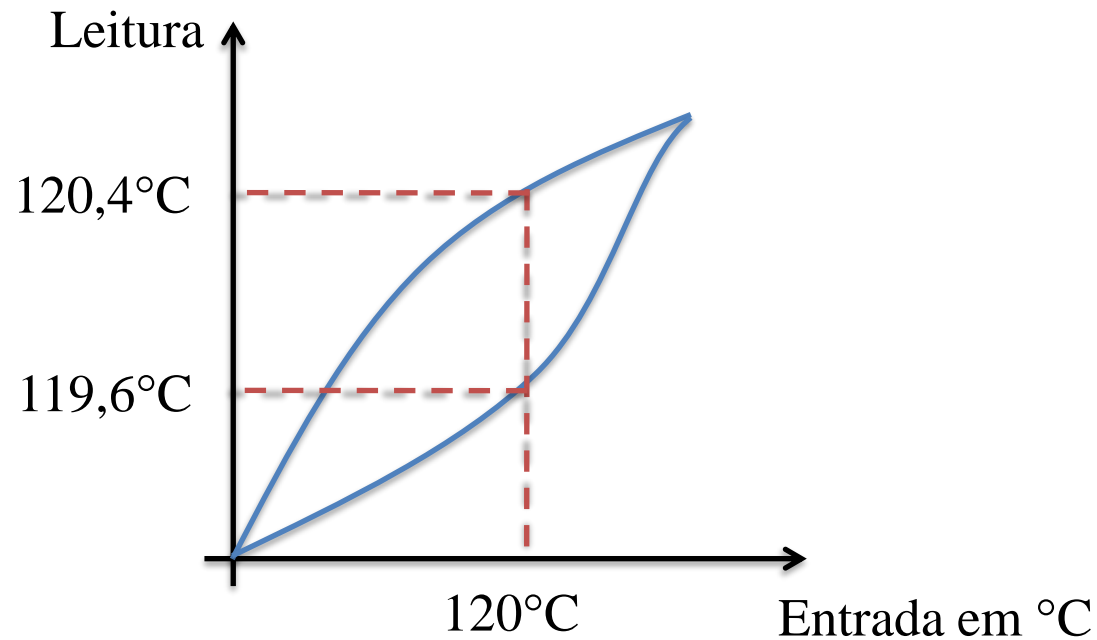
1.7 - Sensibilidade: É a máxima variação que a variável pode ter, provocando alteração na indicação ou sinal de saída de um instrumento.

Exemplo: Um termômetro de vidro com range de 0 a 500°C, possui uma escala de leitura de 50 cm.

$$\text{Sensibilidade} = (50\text{cm}/500^{\circ}\text{C}) = 0,1\text{cm}/^{\circ}\text{C}$$

1.8 - 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 ascendentes e descendentes**. 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 0 a 200°C mostrado na figura abaixo, a histerese é de 0,2%.



$$\begin{aligned}\text{Histerese} &= 120 \pm (0,2/100) \times 200 \\ &= 120^{\circ}\text{C} \pm 0,4^{\circ}\text{C}\end{aligned}$$

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

2.0 - Tipos de instrumentos

2.1 - Medidores / Sensores: Instrumento utilizado para obter uma grandeza, como por exemplo: Vazão, Temperatura, Pressão, Nível, Condutividade, Resistividade, Concentração, etc.



2.2 - Indicadores: 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.



2.3 - Transmissores: É um instrumento que transmite o valor de uma grandeza a distância para um instrumento receptor, indicador, registrador, controlador ou a uma combinação destes. Existem vários tipos de sinais de transmissão: pneumáticos, elétricos, hidráulicos e eletrônicos.



Transmissor de pressão a prova de explosão



Transmissor de pressão diferencial

2.4 - Registradores: Instrumento que registra a variável através de um traço contínuo ou pontos em um gráfico.



Registrador gráfico com papel



Registrador gráfico sem papel



Registrador gráfico digital

2.5 - Transdutores: É um instrumento que transforma uma forma de sinal em outra, isto é, recebe informações na forma de uma ou mais quantidades físicas, modifica 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.



2.6 - Analisadores: São sistemas de instrumentos de medição industriais. São constituídos de equipamentos eletromecânicos computadorizados, dotados de câmaras de amostra, sensores e unidades eletrônicas. Os analisadores mais comuns medem: pH; condutividade elétrica; turbidez; densidade, viscosidade, concentração de gases e particulados e outros.



2.7 - Controladores: É 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.



2.8 - Elemento Final 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 solenoide, um pistão, um motor elétrico etc.



Deslocamento
linear ou
rotativo



Válvula Globo



Válvula Borboleta









3.0 – Instrumentação de equipamentos e unidades


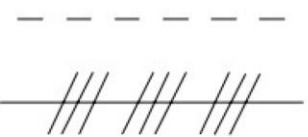



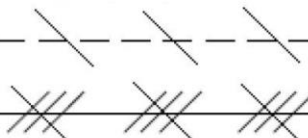
O Engenheiro Químico deve pelo menos saber interpretar uma planta com instrumentação, e também ter a capacidade de participar na decisão de como realizar a instrumentação.

Passos para realizar a instrumentação:

- 1)- Conhecer e entender os objetivos do controle ou aquisição de dados operacionais;
- 2)- Decidir as variáveis medidas e controladas;
- 3)- Conhecer os equipamentos disponíveis e decidir os que devem ser adquiridos;
- 4)- Conhecer a norma ANSI/ISA-S5 para a instrumentação;
- 5)- Realizar o projeto de instrumentação.

→ Sinais utilizados em fluxogramas de processo (Norma ANSI/ISA-S5)

	SUPRIMENTO OU IMPULSO *
	SINAL PNEUMÁTICO **
	SINAL HIDRÁULICO
	SINAL ELETROMAGNÉTICO OU SÔNICO (TRANSMISSÃO GUIADA) ***
	LIGAÇÃO CONFIGURADA INTERNAMENTE AO SISTEMA (LIGAÇÃO POR SOFTWARE)
	SINAL BINÁRIO PNEUMÁTICO

	SINAL NÃO DEFINIDO
	SINAL ELÉTRICO
	TUBO CAPILAR
	SINAL ELETROMAGNÉTICO OU SÔNICO (TRANSMISSÃO NÃO GUIADA) ***
	LIGAÇÃO MECÂNICA
	SINAL BINÁRIO ELÉTRICO

*Indicado para um tipo de alimentação;

** Aplicado para qualquer gás de médio sinal. Outro tipo de gás, o mesmo pode ser identificado por uma nota no símbolo do sinal, ou de outra maneira;

*** Fenômeno eletromagnético e inclui aquecimento, ondas de rádio, radiação nuclear e luz.

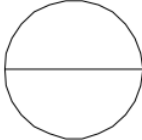
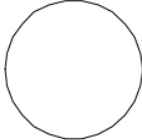
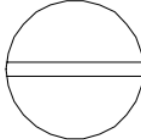
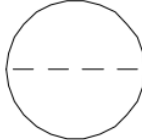
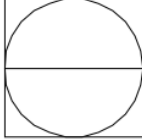
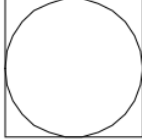
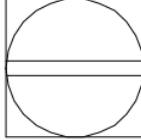
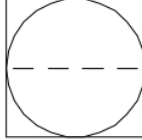
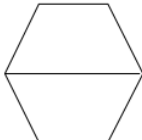
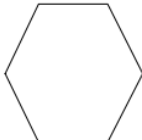
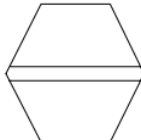
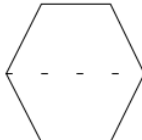
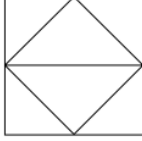
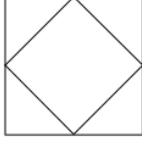
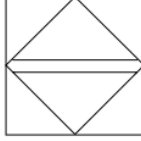
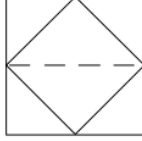
Código de Identificação de Instrumentos: cada instrumento é identificado com um sistema de letras que o classifica funcionalmente. Como exemplo, uma identificação representativa é a seguinte:

T	RC	210	2	A
VARIÁVEL	FUNÇÃO	ÁREA DE ATIVIDADES	NO SEQUENCIAL DA MALHA	S U F I X O
IDENTIFICAÇÃO FUNCIONAL		IDENTIFICAÇÃO DA MALHA		
IDENTIFICAÇÃO DOS INSTRUMENTOS				

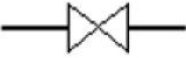




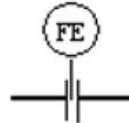
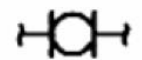

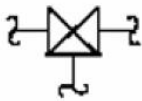
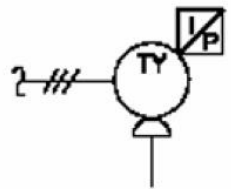
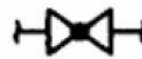
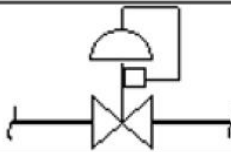
	Primeira Letra		Letras subsequentes		
	Variável medida ou inicial	Modificadora	Função de informação ou Passiva	Função Final	Modificadora
A	Analisador	--	Alarme		
B	Chama de queimador	--	Indefinida	Indefinida	Indefinida
C	Condutividade elétrica	--	--	Controlador (12)	--
D	Densidade ou massa específica (Density)	Diferencial	--	--	--
E	Tensão elétrica	--	Elemento primário	--	--
F	Vazão (Flow)	Razão (fração)	--	--	--
G	Medida dimensional	--	Visor	--	--
H	Comando Manual (Hand)	--	--	--	--
I	Corrente Elétrica		Indicador	--	--
J	Potência	Varredura ou seletor		--	--
L	Nível (Level)	--	Lâmpada piloto	--	--
M	Umidade (Moisture)	--	--	--	--
N	Indefinida	--	Indefinida	Indefinida	Indefinida

	Primeira Letra		Letras subsequentes		
	Variável medida ou inicial	Modificadora	Função de informação ou Passiva	Função Final	Modificadora
O	Indefinida	--	Orifício de restrição	--	--
P	Pressão ou Vácuo		Ponto de teste	--	
Q	Quantidade ou Evento	Integrador ou totalizador	--		--
R	Radioatividade		Registrador ou Impressor	--	--
S	Velocidade ou frequência (Speed)	Segurança	--	Chave	--
T	Temperatura	--	--	Transmissor	--
U	Multivariável	--	Multifunção	Multifunção	Multifunção
V	Viscosidade	--	--	Válvula	--
W	Peso ou Força (weigh)	--	Poço	--	--
X	Não classificada	--	Não classificada	Não classificada	Não classificada
Y	Indefinida	--	Relé ou cálculo computacional	--	--
Z	Posição	--	--	Elemento final de controle não Classifi.	--

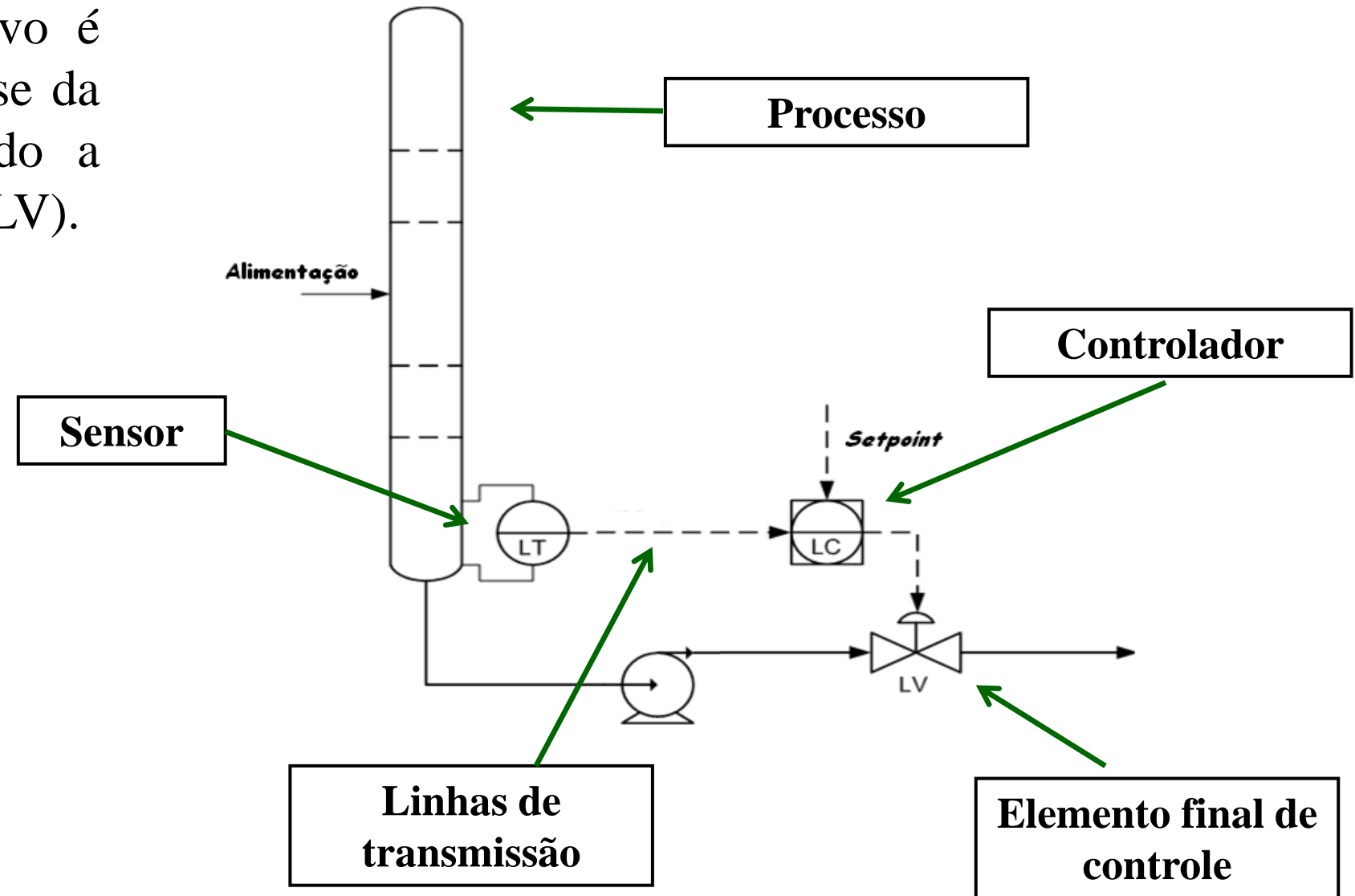
Utilizados nos fluxogramas de processo:

LOCALIZAÇÃO TIPO	LOCAÇÃO PRINCIPAL NORMALMENTE ACESSÍVEL AO OPERADOR	MONTADO NO CAMPO	LOCAÇÃO AUXILIAR NORMALMENTE ACESSÍVEL AO OPERADOR	LOCAÇÃO AUXILIAR NORMALMENTE NÃO ACESSÍVEL AO OPERADOR
INSTRUMENTOS DISCRETOS				
INSTRUMENTOS COMPARTILHADOS				
COMPUTADOR DE PROCESSO				
CONTROLADOR PROGRAMÁVEL				

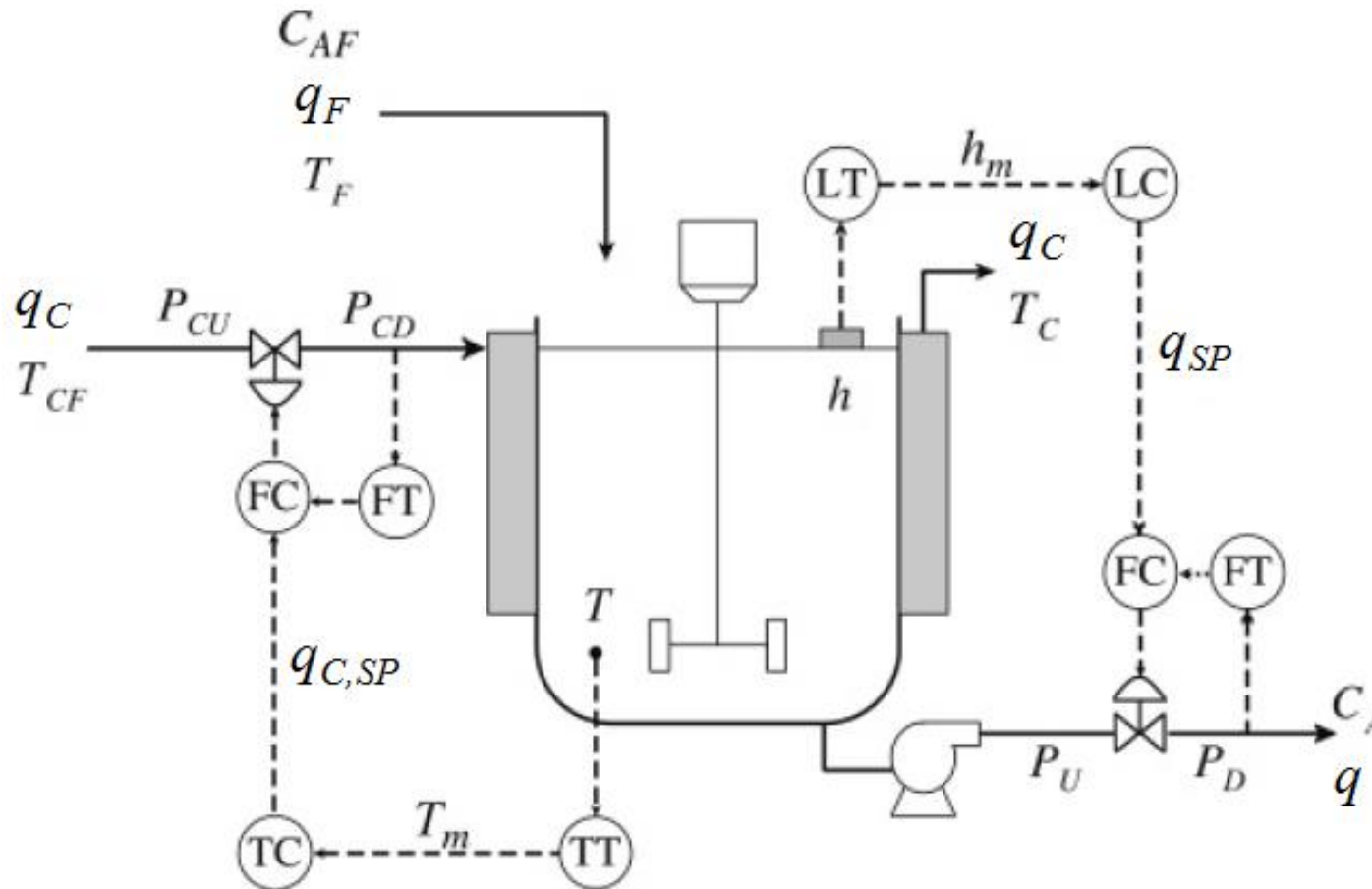
Símbolos de válvulas mais encontrados em fluxogramas:

	Símbolo geral de válvula		Diafragma, retorno por mola ou atuador não especificado – com ou sem posicionador ou outro piloto
	Válvula ângulo (angular)		Válvula de controle com atuador pneumático
	Válvula borboleta		Placa de orifício com flange na linha de processo
	Válvula rotativa (esfera)		Atuador manual
	Válvula de três vias		Atuador com conversor eletro-pneumático
	Válvula globo		Válvula com atuador a diafragma e posicionador

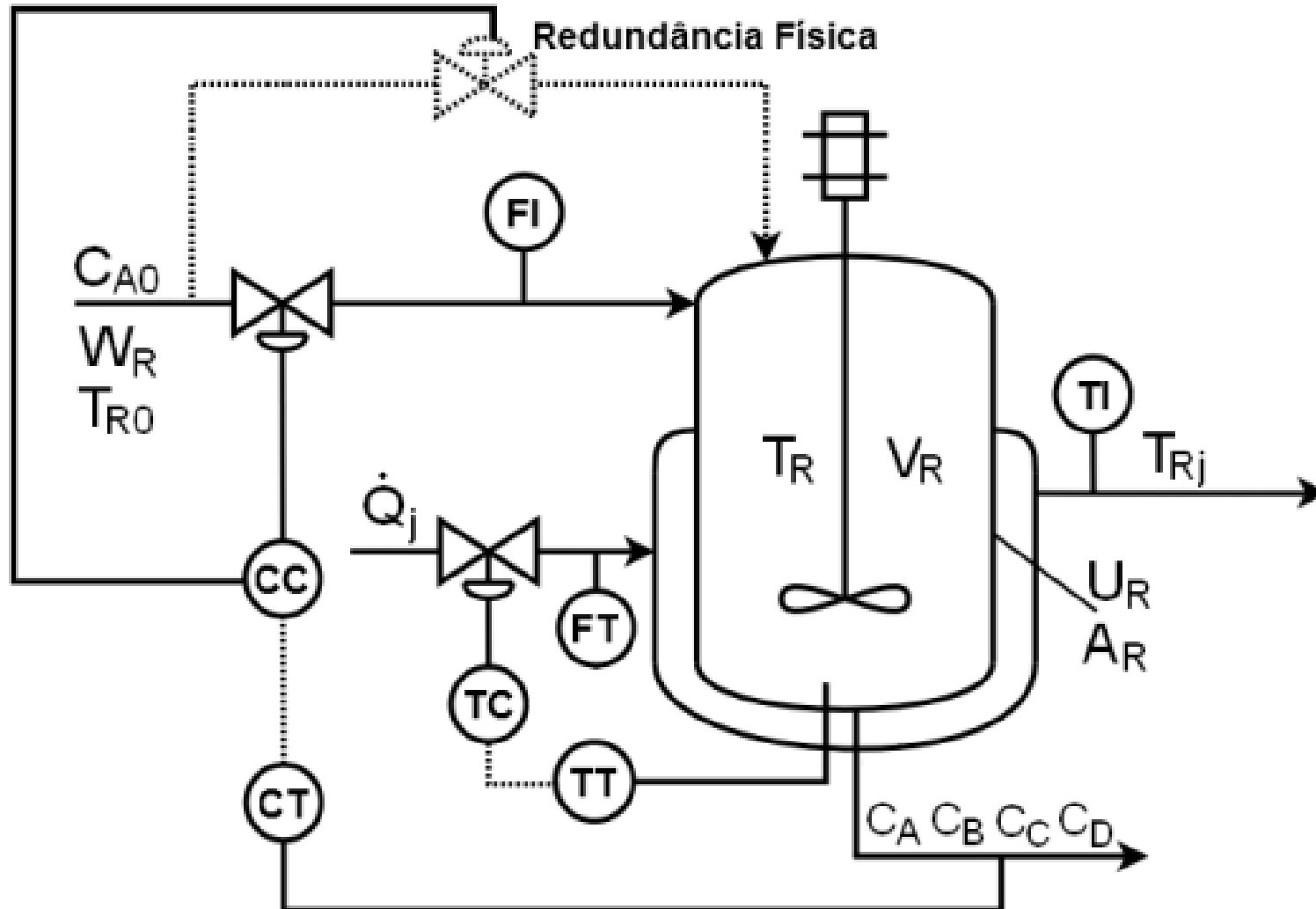
Exemplo 3.1: O objetivo é controlar o nível da base da coluna (L), manipulando a vazão de saída (válvula LV).



Exemplo 3.2: O objetivo é Controlar o nível do reator (L), manipulando a vazão de saída (válvula), e Controlar a temperatura (T), manipulando a vazão de fluido na jaqueta. A instrumentação é montada em campo.



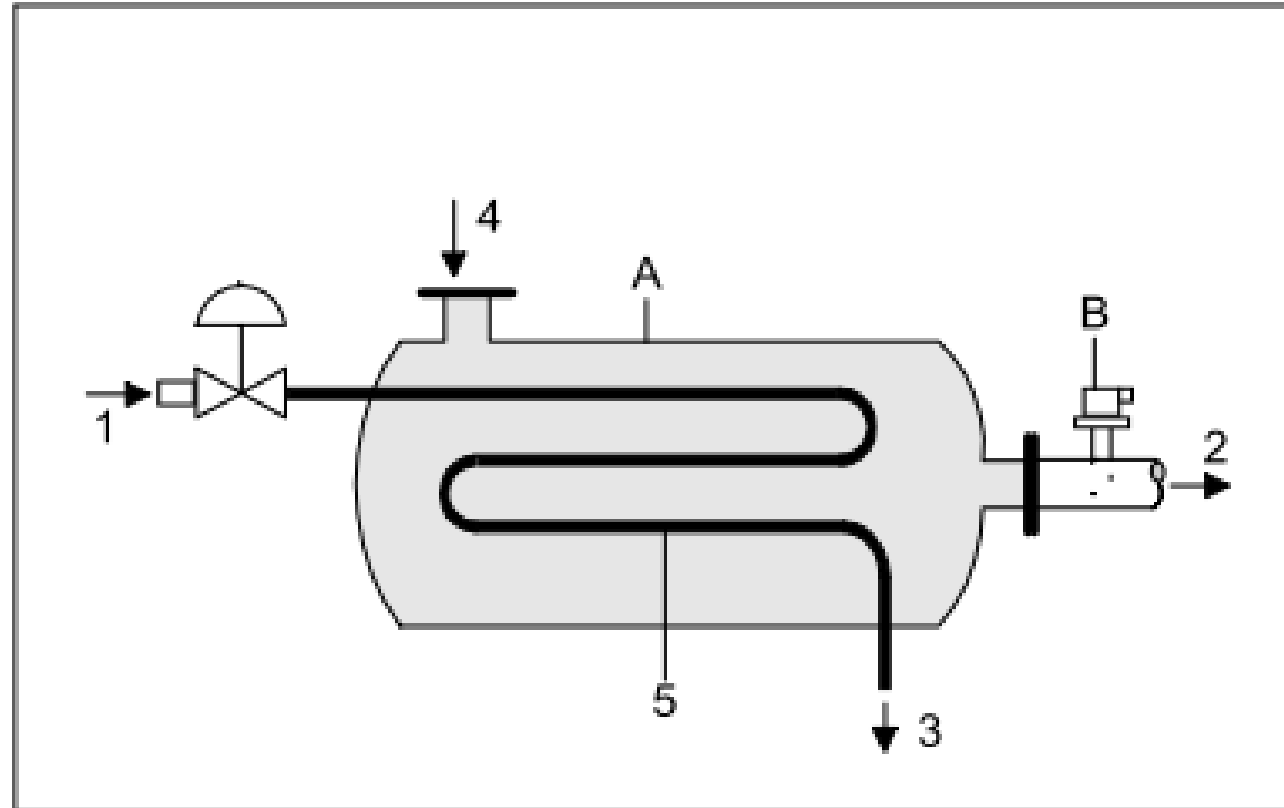
Exemplo 3.3: Completar ...

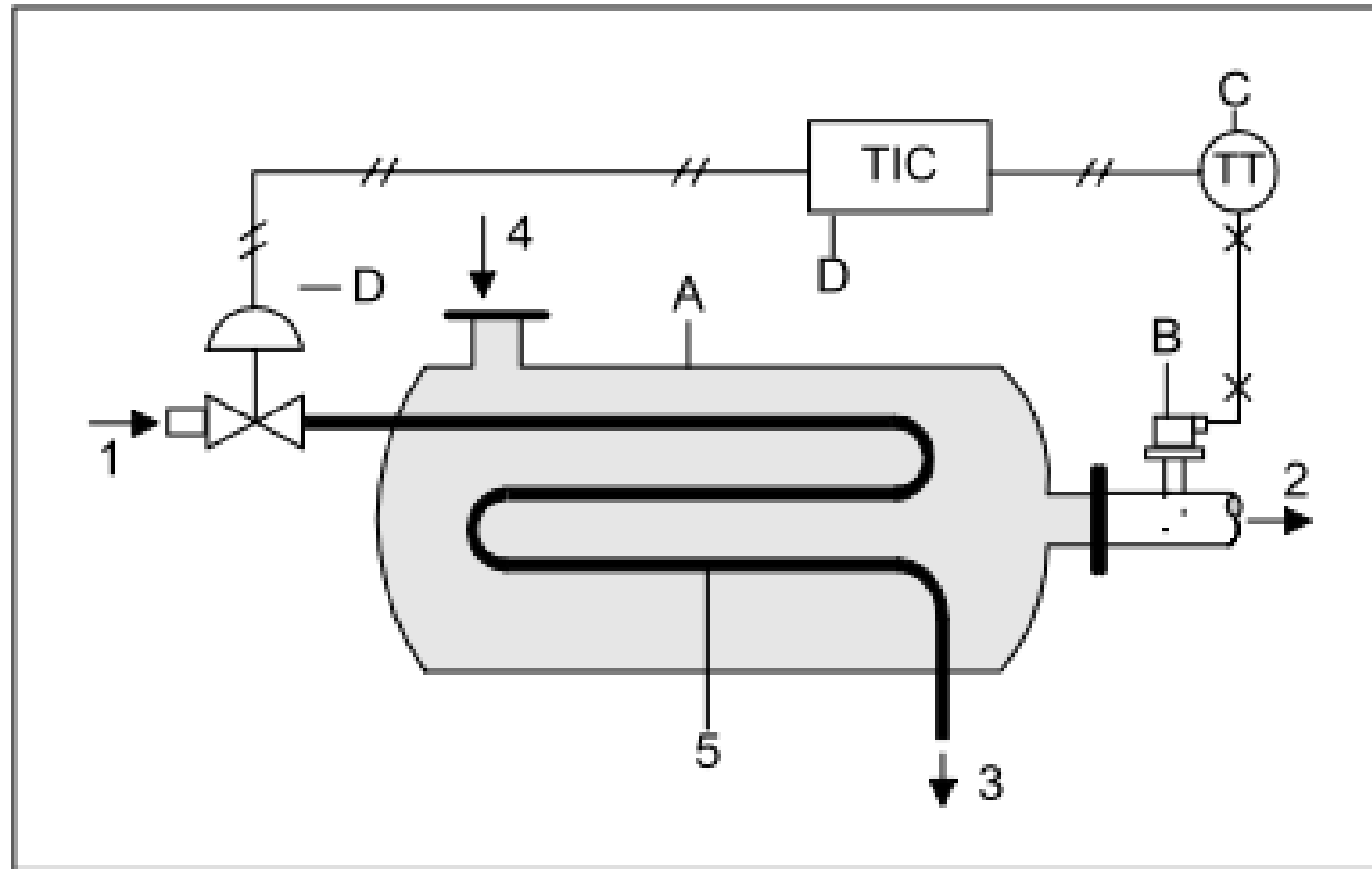


1)- Controlar ...
Manipulando ...

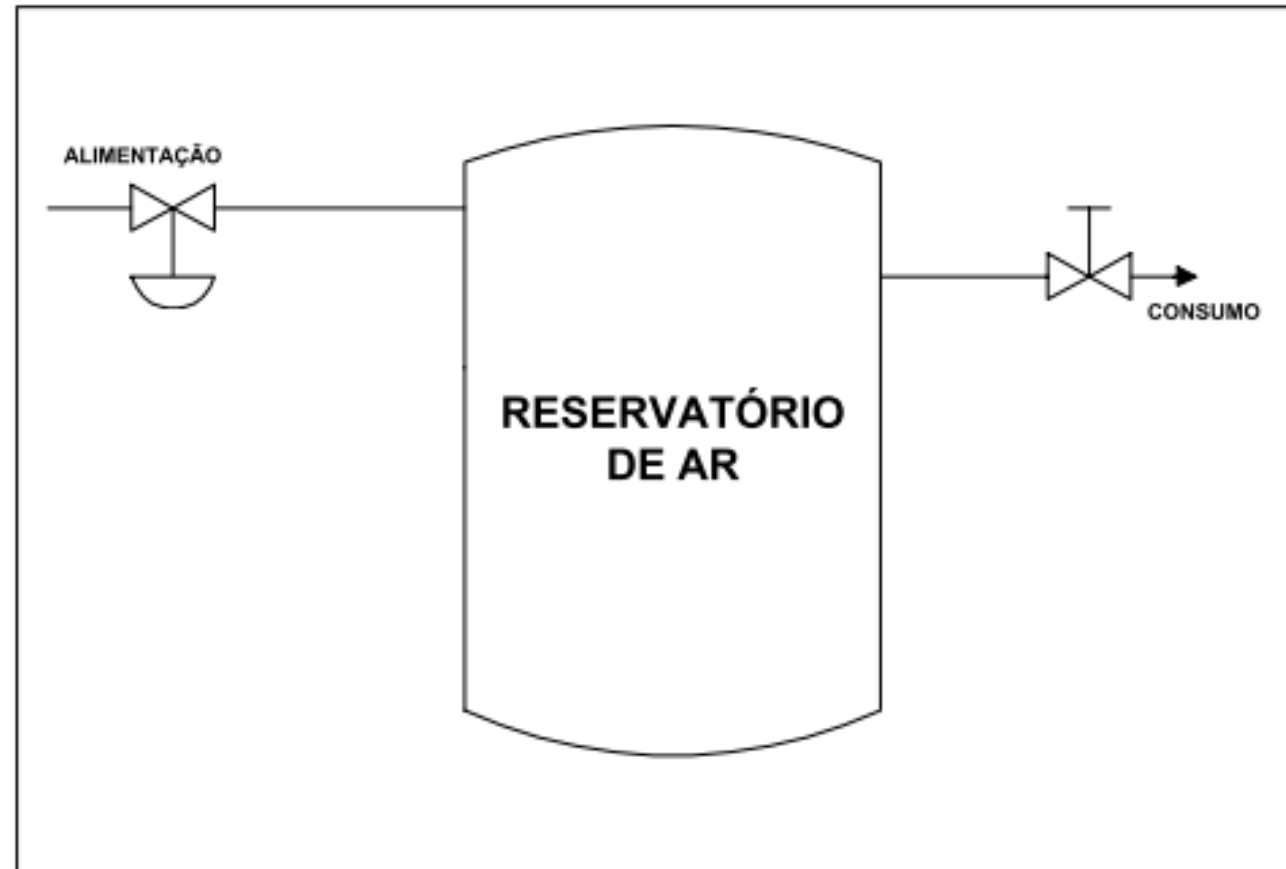
2)- Controlar ...
Manipulando ...

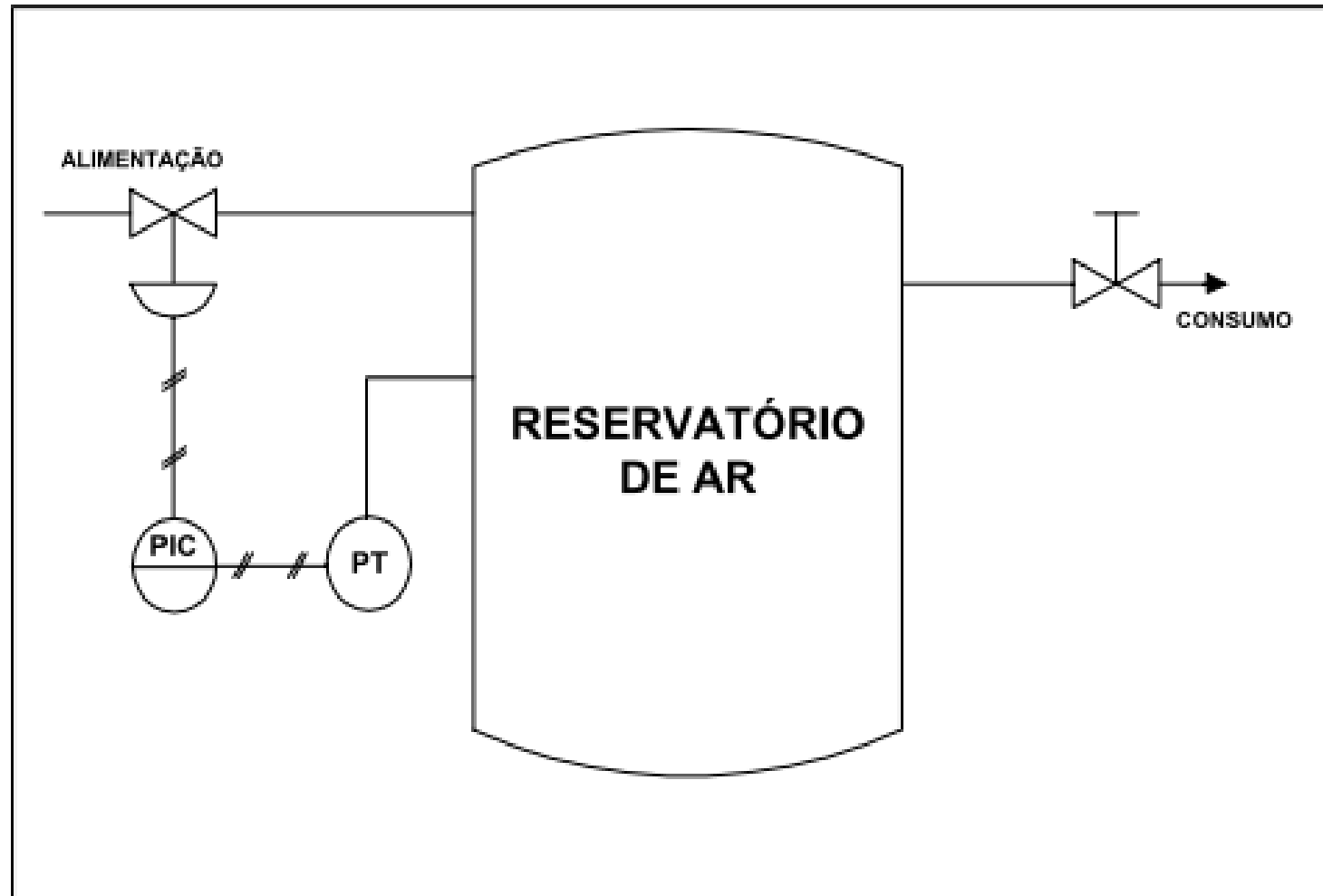
Exemplo 3.4: O objetivo é controlar e indicar a temperatura do trocador de calor “A”, manipulando a vazão do fluido que entra em “1”. Para isto, a tomada de temperatura é realizada por meio de um capilar em “B”, e após o transmissor da temperatura o sinal é emitido ao controlador de forma pneumática.





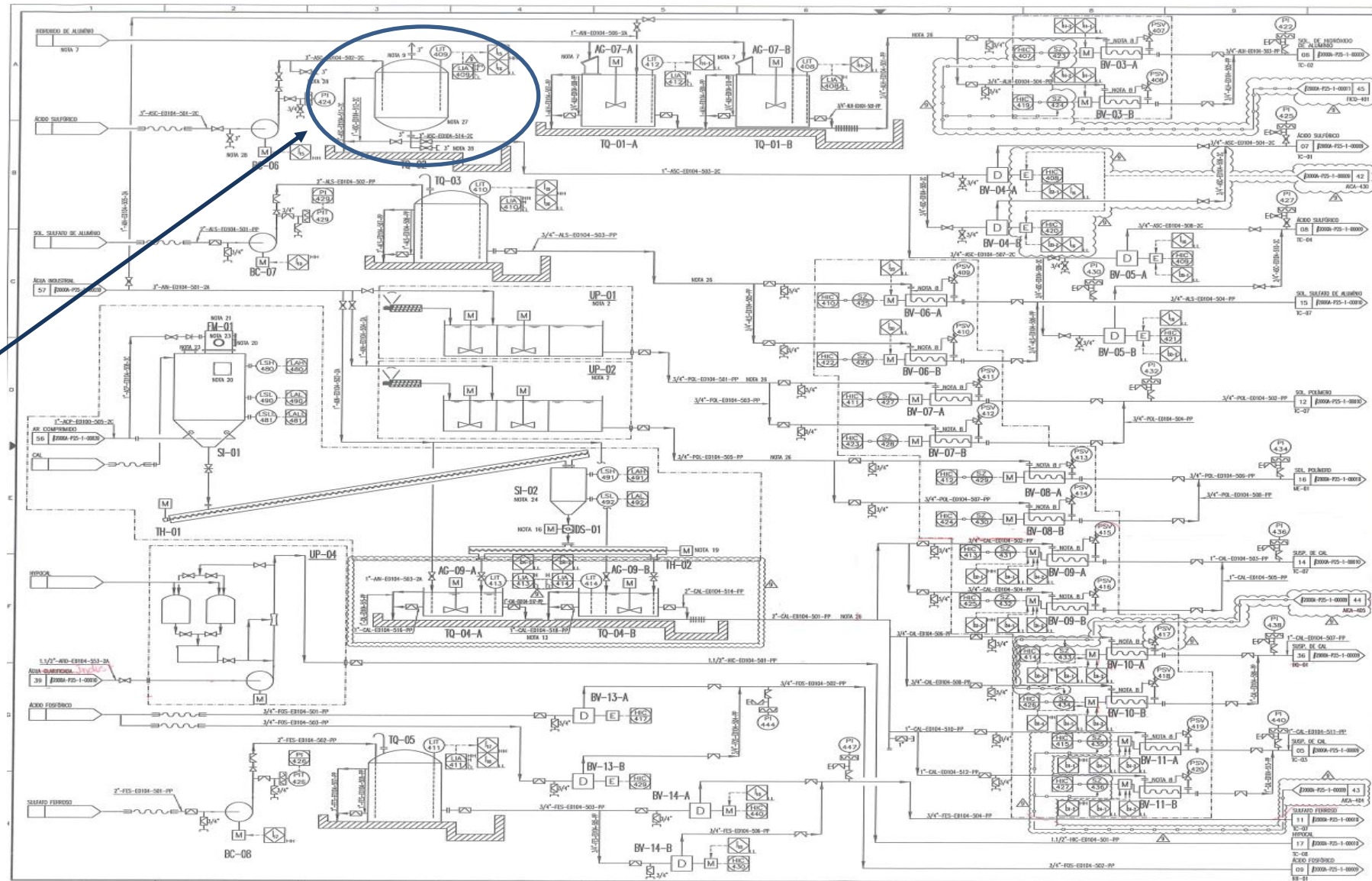
Exemplo 3.5: O objetivo é controlar e indicar a pressão do reservatório de ar, manipulando a vazão de alimentação de ar. Os sinais são da forma pneumática. O transmissor é montado em campo, e o controlador está no painel principal acessível ao operador.

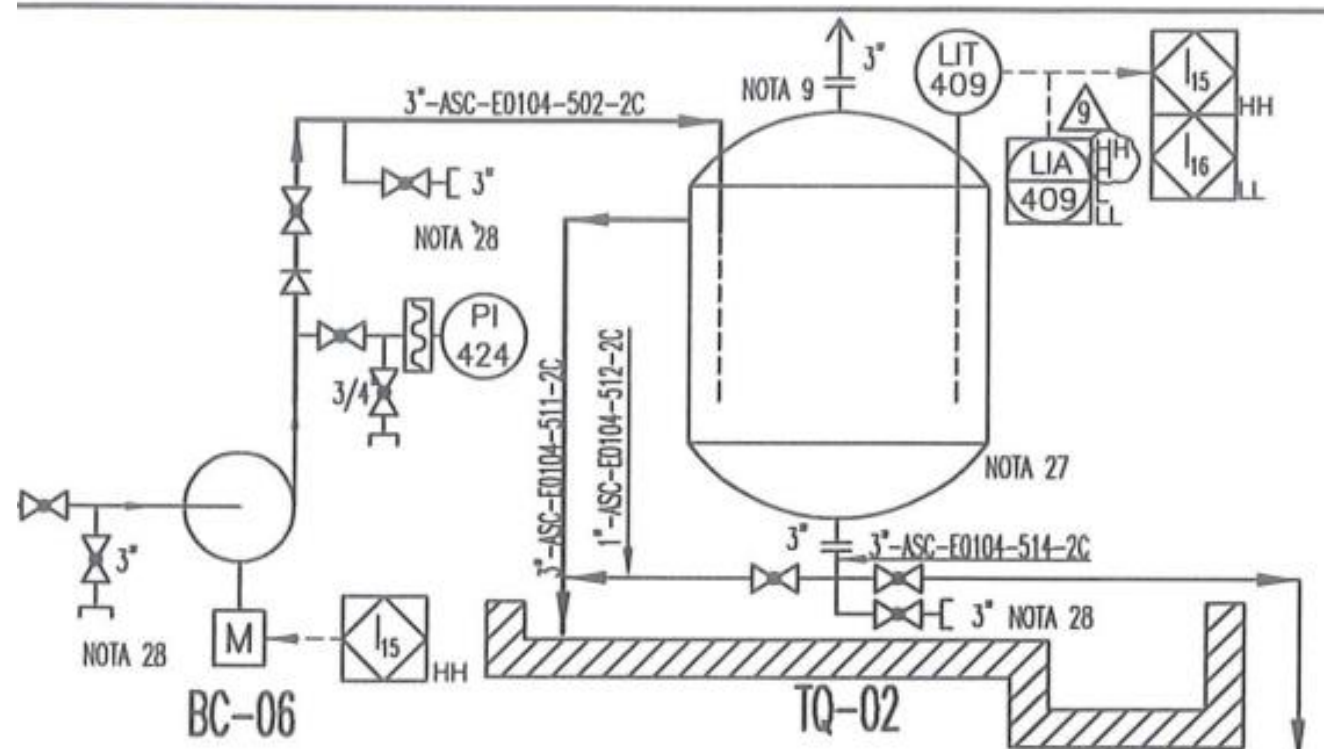




Fluxogramas completos

Vamos
observar





4.0 - Medição das principais variáveis de processo

4.1 - Medição de Pressão

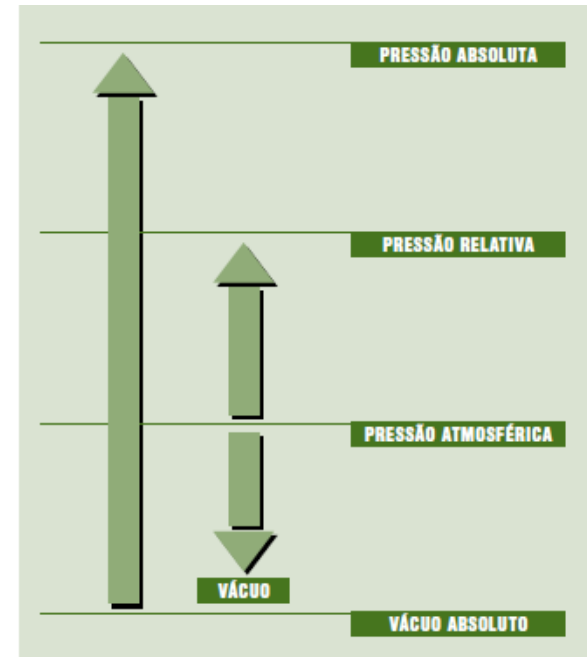
→ É o mais importante padrão de medida, pois através dela, podemos medir vazão; nível, etc.

→ Pressão é definida como: $P = \frac{F}{A}$; P - pressão; F - força; A - área:

Pressão atmosférica: é a pressão exercida pela atmosfera terrestre;

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.



Por que é necessário medir a pressão?

- ✓ Proteção de pessoal;
- ✓ Proteção de equipamento;
- ✓ Medição de outra variável;
- ✓ Obtenção do produto dentro das especificações exigidas.



Dispositivos para medição de Pressão

➤ **Tubo de Bourdon**

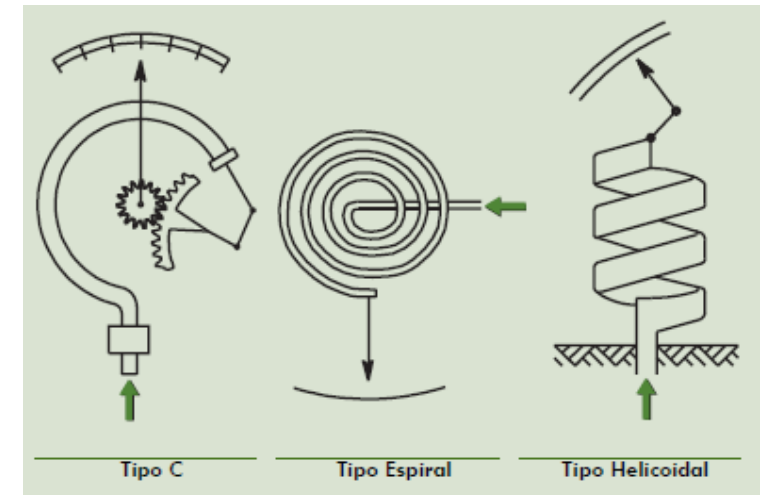
Princípio de funcionamento: deformação elástica proporcional à pressão.

Vantagens (tipo espiral e helicoidal):

- ✓ Obter movimento de maior amplitude;
- ✓ Resposta mais rápida;
- ✓ Maior precisão.

Desvantagens:

- ✓ Elasticidade do material é limitada (devem ser usados dentro das faixas de medição);
- ✓ Não é adequado para baixas pressões, vácuo ou medições compostas (pressões negativa e positiva).

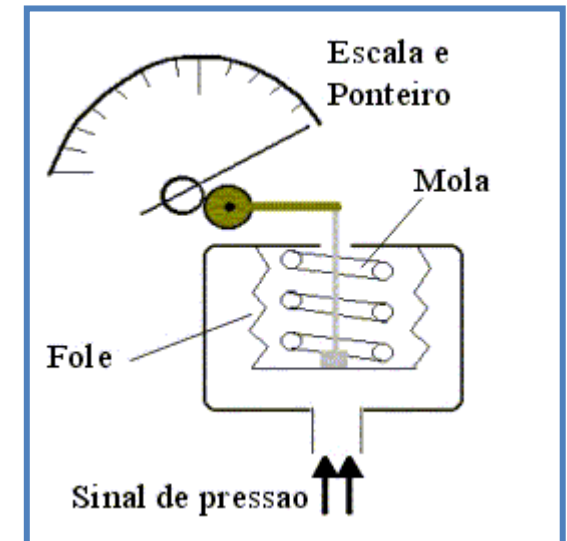


➤ Fole

Princípio de funcionamento: deformação elástica proporcional à pressão aplicada.

Características:

- ✓ Cápsula de um material elástico;
- ✓ Quando a pressão é aumentada o fole se expande (ou contrai);
- ✓ Deslocamento provocado pela expansão ou contração é proporcional à pressão aplicada;
- ✓ Usado para medir baixas e médias pressões (faixa de medição: 0 a 3 kg/cm²).

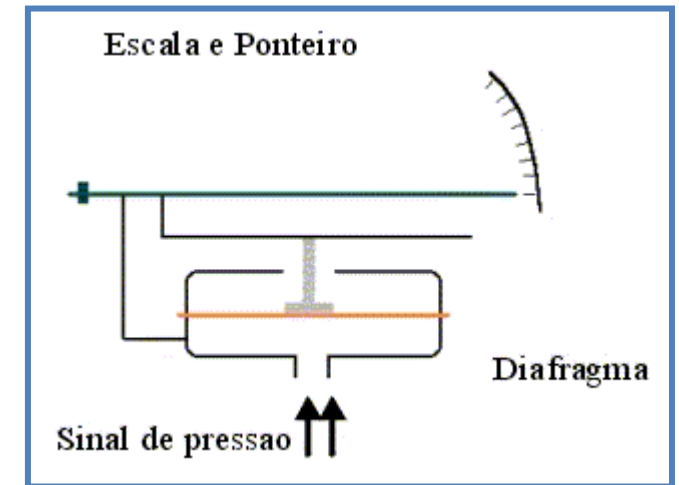


➤ Diafragma

Princípio de funcionamento: deformação elástica (deflexão do diafragma) proporcional à pressão aplicada.

Características:

- ✓ Flexível, liso ou com corrugações concêntricas;
- ✓ Feito de uma lâmina metálica com dimensões exatas;
- ✓ Usado para medir baixas pressões;
- ✓ Podem ser usados dois diafragmas soldados juntos (cápsula);
- ✓ Sensibilidade - aumenta proporcional ao seu diâmetro.



➤ Coluna líquida

Princípio de funcionamento: quando se aplica a pressão na coluna, o líquido é deslocado, sendo este deslocamento proporcional à pressão aplicada. Os fluidos normalmente usados possuem faixas de densidade entre 0,8 g/ml (álcool) e 13,6 g/ml (mercúrio).

Características:

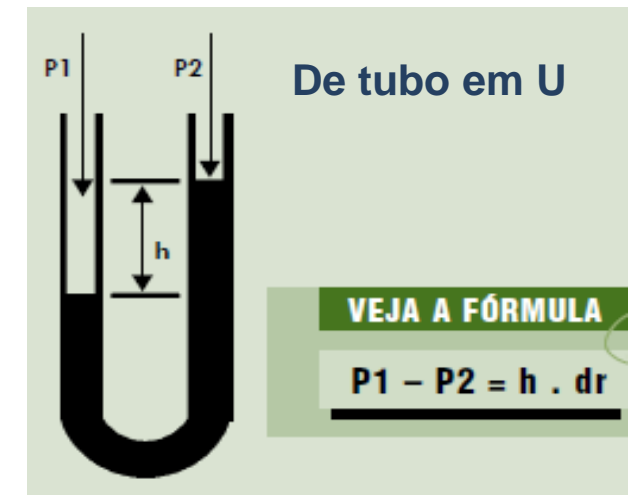
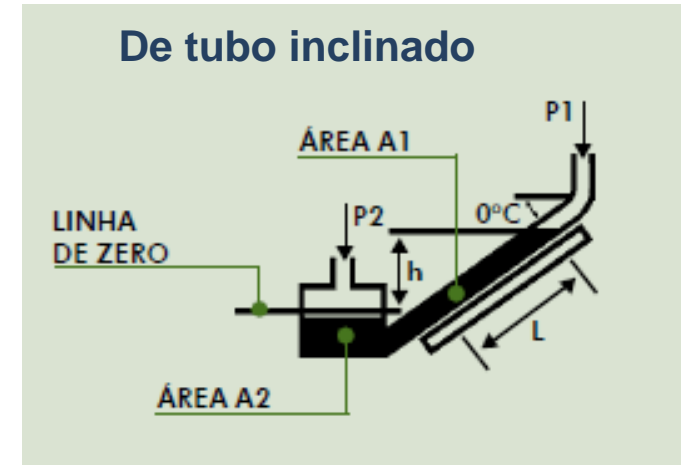
- ✓ Ser fisicamente estável e não volátil sobre as condições de trabalho;
- ✓ Não congelar a baixas temperaturas;
- ✓ Ter densidade constante com a temperatura e pressão.

Vantagens:

- ✓ Medem pressões baixas;
- ✓ Boa precisão;
- ✓ Custo baixo;
- ✓ Simples construção e fácil manutenção.

Desvantagens:

- ✓ Exigem tubos calibrados;
- ✓ Não permite vibrações.



Aplicação Geral:

Medidores	Limites de aplicação
Tubo de Bourdon tipo C	Acima de 100 MPa
Tubo de Bourdon espiral	Acima de 100 MPa
Tubo de Bourdon helicoidal	Acima de 100 MPa
Fole	Tipicamente vácuo a 500kPa
Diafragma	Acima de 60 kPa

Observações:

- A variável pressão submete os equipamentos a esforços de deformação, por isso deve estar sempre abaixo dos limites de segurança para que não ocorra a ruptura e, conseqüentemente, acidentes;
- A medição e o controle da pressão é de extrema importância para evitar eventos danosos e, além disso, influencia diretamente na obtenção de produtos de alta qualidade, com melhores rendimentos, a custos compatíveis com a necessidade do mercado consumidor.

5.2 - Medição de Temperatura

Aspectos básicos

Temperatura é o grau de agitação das moléculas, quanto maior seu valor, maior é a energia cinética média dos átomos do corpo em questão.

Escalas de temperatura

Celsius: é definida com valor zero no ponto de fusão do gelo e 100 no ponto de ebulição da água. O intervalo entre os dois pontos é dividido em 100 partes iguais;

Fahrenheit: é definida 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;

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

Rakine: possui o mesmo zero da escala Kelvin, porém sua divisão é idêntica à escala Fahrenheit.

Escalas de temperatura:

ESCALAS DE TEMPERATURA		PONTO DE EBULIÇÃO DA ÁGUA	PONTO DE FUSÃO DA ÁGUA	ZERO ABSOLUTO
ESCALAS ABOLUTAS				
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

Dispositivos para medição de Temperatura

➤ **Termômetro de vidro**

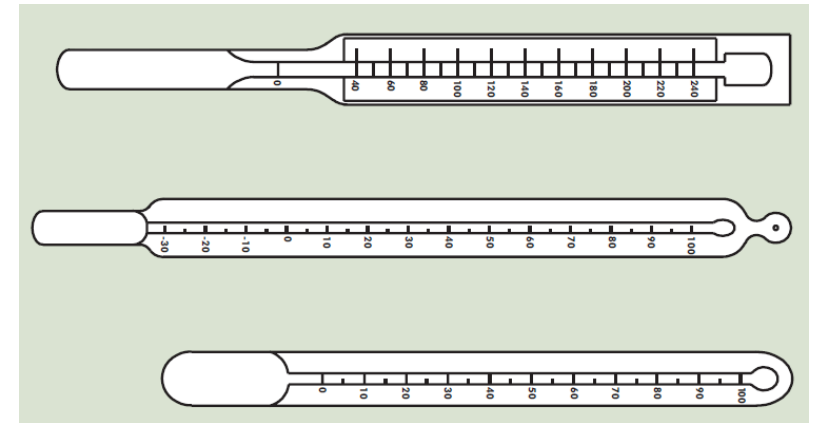
Princípio de funcionamento: a variação volumétrica resultante da expansão termal do fluido é interpretada como temperatura. Fluidos normalmente usados são o mercúrio, tolueno, álcool e cetona.

Vantagens:

- ✓ Simples;
- ✓ Baixo custo.

Desvantagens:

- ✓ Leitura difícil, e conseqüentemente, baixa precisão;
- ✓ Confinado ao local de medição, ou seja não adaptável para transmissão, registro ou controle remoto.



➤ Bimetal

Princípio de funcionamento: baseia-se na dilatação linear dos metais com a temperatura.

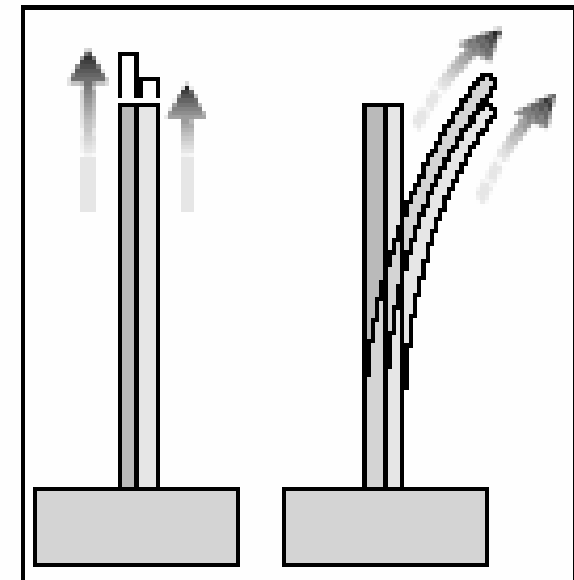
Características: consiste em duas lâminas de metais com coeficientes de dilatação diferentes sobrepostas formando uma só peça. Variando-se a temperatura, observa-se um encurvamento que é proporcional à temperatura. Faixa de medição: aproximadamente -50°C à 800°C .

Vantagens:

- ✓ Simples;
- ✓ Baixo custo;
- ✓ Fáceis de serem instalados;
- ✓ Podem ser usados como mecanismo de transmissão.

Desvantagens:

- ✓ Baixa precisão;
- ✓ Presença de peças móveis podem levar ao desgaste.



➤ Enchimento termal

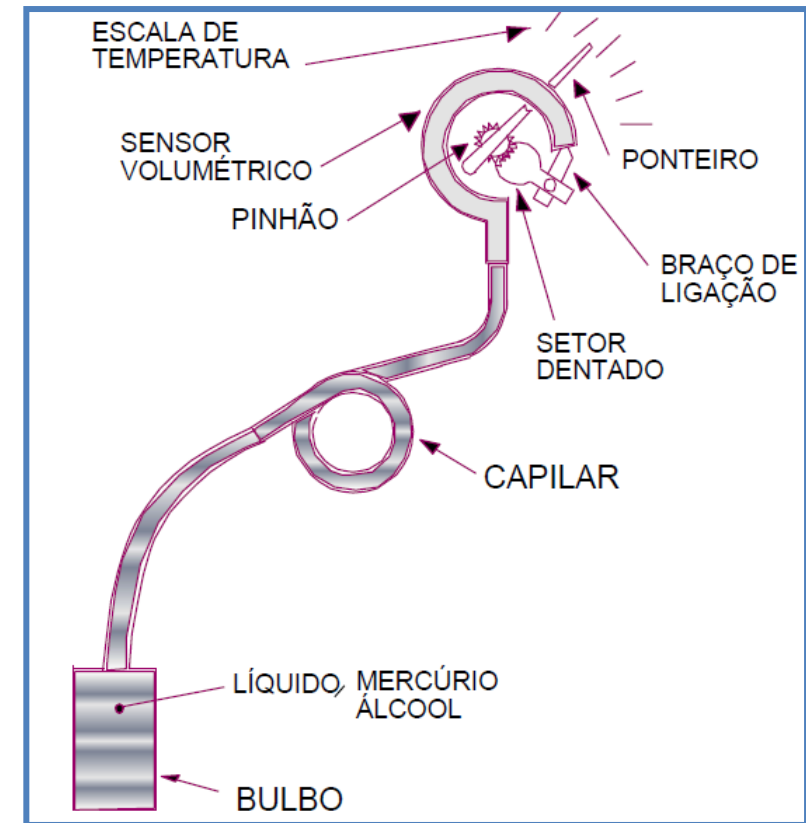
Princípio de funcionamento: o fluido de medição preenche todo o instrumento e com o aumento da temperatura dilata-se deformando elasticamente o elemento sensor;

Vantagens:

- ✓ Simples e de uso comprovado;
- ✓ Construção robusta;
- ✓ Insensível às vibrações e choques mecânicos
- ✓ Seguro em qualquer atmosfera perigosa.

Desvantagens:

- ✓ Resposta lenta;
- ✓ Alto custo.



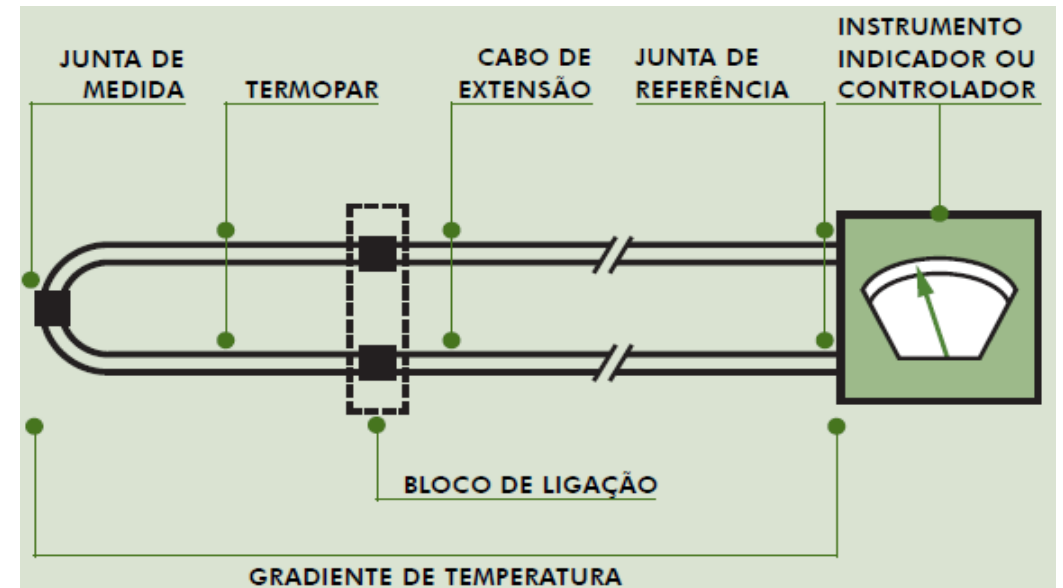
➤ Termopar

Princípio de funcionamento: o aquecimento da junção de dois metais gera uma força eletromotriz (FEM). Este princípio, conhecido como efeito Seebeck, propiciou a utilização dos termopares para a medição de temperatura (converte calor em eletricidade).

Sensores de temperatura mais usados pois:

- ✓ São simples;
- ✓ Baixo custo;
- ✓ Robustos;
- ✓ Utilizados em uma ampla faixa operacional.

Devido a grande variedade podem ser usados em diversas áreas como metalúrgica, petroquímica, química, indústrias de refrigeração etc.



Tipos de termopares:

Termopar	Composição
Tipo E	Cromel-Constantan*
Tipo J	Ferro-Constantan*
Tipo K	Cromel-Alume 1
Tipo T	Cobre-Constantan*
Tipo S	Platina (90%)-Ródio (10%)
Tipo R	Platina (87%)-Ródio (13%)

* Liga metálica:
53 ~ 57 % Cobre
43 ~ 45 % Níquel
0,5 ~ 1,2 % Manganês
< 0,5 % Ferro (restante)

Vantagens quando comparado aos sensores mecânicos:

- ✓ Resposta rápida;
- ✓ Mais precisos;
- ✓ Utilizado para medição a longas distâncias;
- ✓ Maior flexibilidade para alterar as faixas de medição;

Desvantagens:

- ✓ Podem capturar ruídos na linha de transmissão;
- ✓ Medição de temperaturas elevadas está sujeito a corrosão

➤ Termorresistência

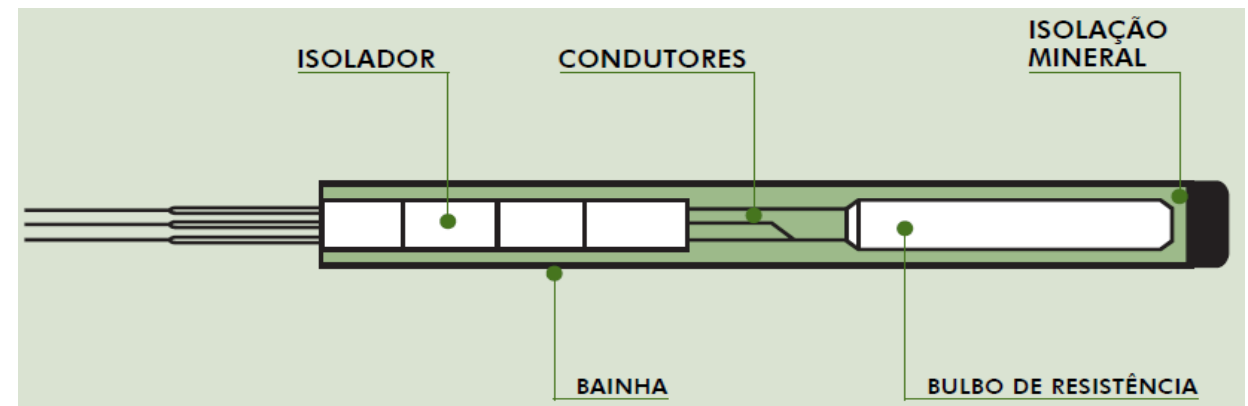
Princípio de funcionamento: permite conhecer a temperatura do meio recorrendo à relação entre resistência elétrica do material e sua temperatura. A maior parte é feita de platina, cobre ou níquel. Faixa de medição: aproximadamente -200°C à 600°C .

Vantagens:

- ✓ Alta precisão;
- ✓ Com instalação adequada não existe limitação para distâncias de medição;
- ✓ Melhor estabilidade que a dos termopares.

Desvantagens:

- ✓ Mais caros que o sensores utilizados na mesma faixa;
- ✓ Extremamente sensíveis à baixa isolação.



Escolha do medidor:

Medidores	Limites de aplicação
Termopar tipo E	-100°C à 1000°C
Termopar tipo J	0°C à 750°C
Termopar tipo K	0°C à 1250°C
Termopar tipo T	-160°C à 400°C
Termopar tipo S	Até 1500°C
Termopar tipo R	Até 1500°C
Termorresistência	-200°C à 600°C
Bimetal	-50°C à 800°C
Enchimento termal	-200°C à 800°C

Observações:

- A temperatura é uma variável que tem grande influência no processo, por isso precisa ser constantemente monitorada e controlada;
- Devido a existência de diferentes tipos de medidores de temperatura é necessário levar em conta critérios para a escolha como:
 - ✓ Econômicos: custo do equipamento, de instalação e de manutenção;
 - ✓ Dados do processo: local de instalação, tipo de fluido a ser medido, faixas de medição, condições do processo e segurança.

4.3 - Medição de Vazão

Aspectos básicos

A medição de vazão inclui a determinação da quantidade de líquido, gases e sólidos que passam por um local específico na unidade de tempo.

Importância de se medir a vazão:

- ✓ Balanço de material na entrada e na saída do processo;
- ✓ Geralmente é a variável manipulada no controle de processos.

Dispositivos para medição de Vazão

➤ Placa de orifício

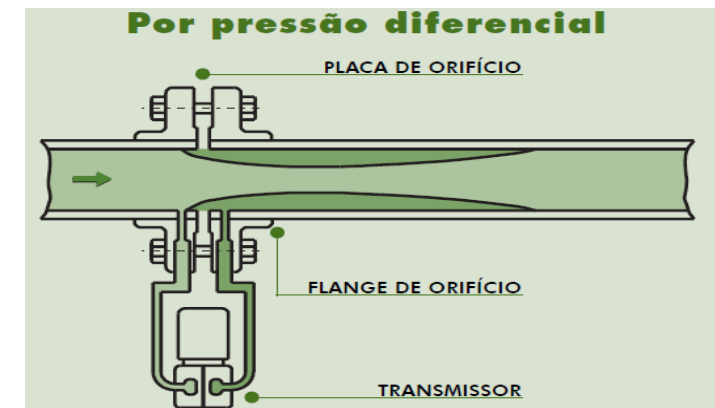
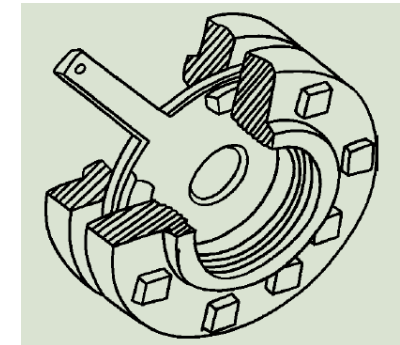
Princípio de funcionamento: consiste em uma placa precisamente perfurada instalada perpendicularmente ao eixo da tubulação, com o objetivo de gerar uma pressão diferencial;

Vantagens: é o elemento primário mais usado por ser:

- ✓ Simples;
- ✓ De fácil instalação e manutenção;
- ✓ Baixo custo;
- ✓ Usada em uma ampla faixa operacional.

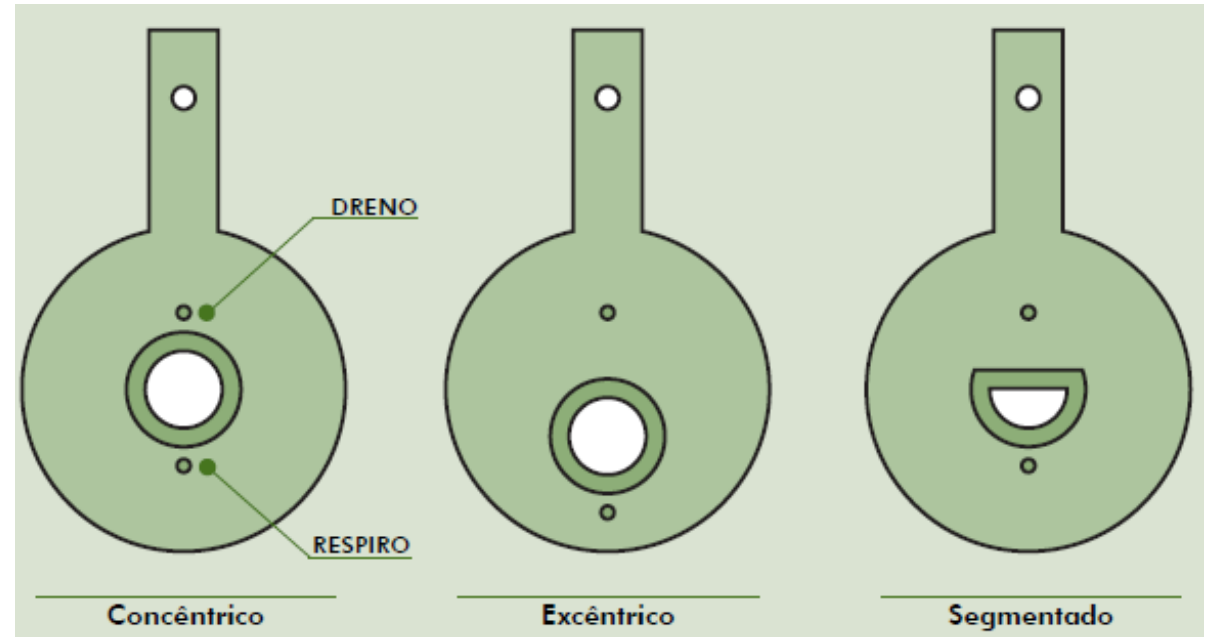
Desvantagens:

- ✓ Não pode ser usada em escoamentos por gravidade (baixa Δp);
- ✓ Não é muito usada para medir vazões de fluidos sujos, com sólidos suspensos e corrosivos;
- ✓ Sujeita ao desgaste do canto vivo.



Tipos de orifício:

- Orifício concêntrico: este tipo de placa é utilizado para líquidos, gases e vapor que não contenham sólidos em suspensão;
- Orifício excêntrico: utilizado para fluidos com sólidos em suspensão, os quais possam ser retidos e acumulados na base da placa, sendo o orifício posicionado na parte de baixo do tubo;
- Orifício segmentado: esta placa tem a abertura para passagem de fluido disposta em forma de segmento de círculo. É destinada a uso em fluidos laminados com alta percentagem de sólidos em suspensão.



➤ Tubo de Venturi

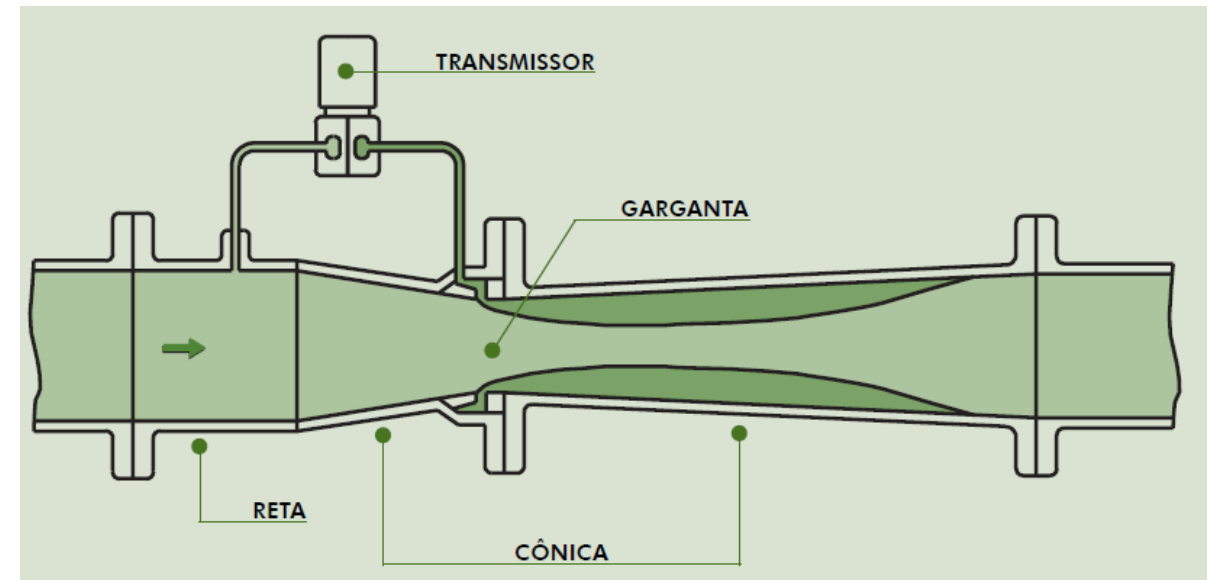
Princípio de funcionamento: mesmo princípio da placa de orifício, a diferença é que a restrição à vazão é mais suave.

Vantagens - por possuir uma restrição mais suave:

- ✓ Medição de vazões 60% superiores à placa de orifício;
- ✓ Medição de vazão de fluidos sujos e com sólidos suspensos;
- ✓ Medição de vazão de fluidos corrosivos (devidamente revestida).

Desvantagens:

- ✓ Custo elevado;
- ✓ Construção difícil;
- ✓ Disponível apenas em tamanhos grandes.



➤ Turbina

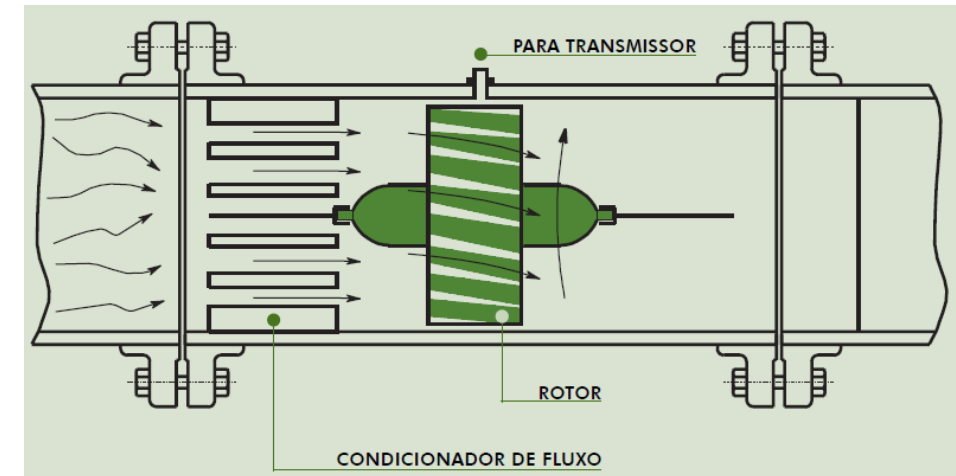
Princípio de funcionamento: o fluído passa pela turbina fazendo girar um rotor com velocidade angular proporcional à velocidade do fluido, portanto linearmente proporcional à vazão;

Vantagens:

- ✓ Altíssima precisão e confiabilidade;
- ✓ Pequena e de fácil construção, geralmente entre flanges.

Desvantagens:

- ✓ Sujeita à desgastes, devido à presença de peças móveis;
- ✓ Custo elevado;
- ✓ Não usada para medição de vazão de fluidos sujos, abrasivos e corrosivos;
- ✓ Para vazões acima da máxima pode ser danificada.

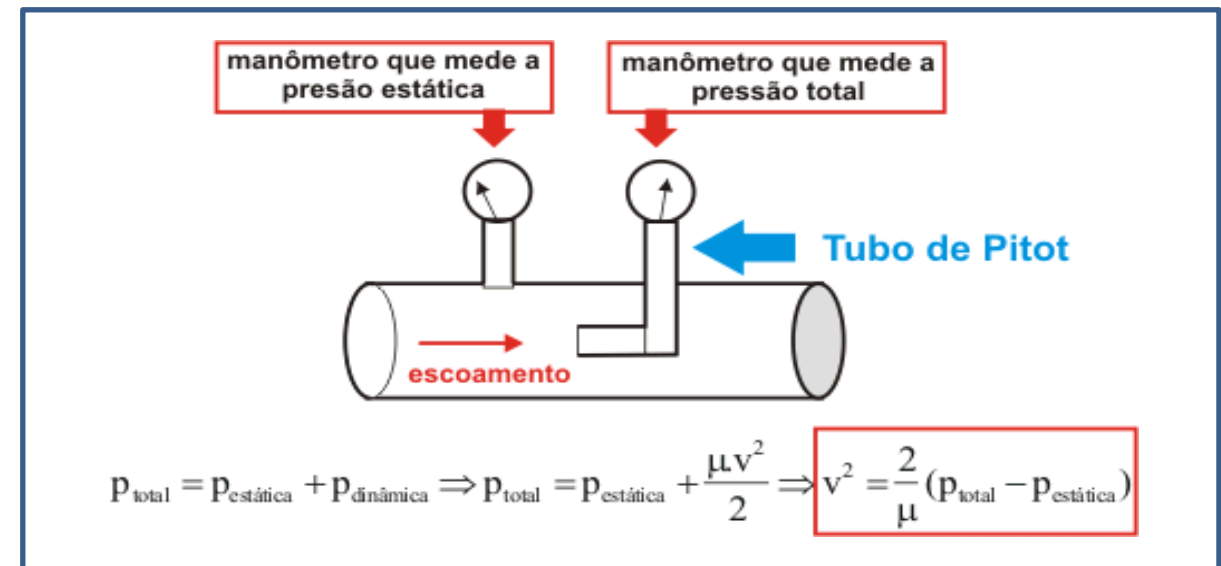


➤ Tubo de Pitot

Princípio de funcionamento: mede diretamente a diferença entre a pressão dinâmica e a pressão estática do fluido.

Características:

- ✓ Mede apenas a velocidade no ponto de impacto e não a velocidade média do fluido (necessidade de colocá-lo no ponto de velocidade média do fluxo);
- ✓ Usado para grandes vazões de fluidos sem sólidos em suspensão, em que a precisão de medida não é exigida;
- ✓ Não encontra grande aplicação industrial;
- ✓ Usado como velocímetro de avião, navio e túnel aerodinâmico .



Observação

- ✓ A vazão geralmente é usada como a variável manipulada do controle de processos químicos, devido a isso precisa ser constantemente monitorada para que o controle seja eficiente.

4.4 - Medição de Nível

Aspectos básicos

O nível pode ser considerado a altura da coluna de líquido ou de sólido no interior de um tanque ou vaso.

Pela 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 em acumulação temporária, reações, mistura etc;
- ✓ Manter segurança e controle de alguns processos em que o nível do produto não pode ser ultrapassar determinados limites.

Temos dois tipos de medições: A Direta e a Indireta.

MEDIÇÃO DE NÍVEL DIRETA

É a medição para a qual é tomado como referência a posição do plano superior da substância medida. Neste tipo de medição pode ser utilizado réguas, visores de nível, boia ou flutuador.

Dispositivos para medição de Nível (Direta)

➤ Visores de nível

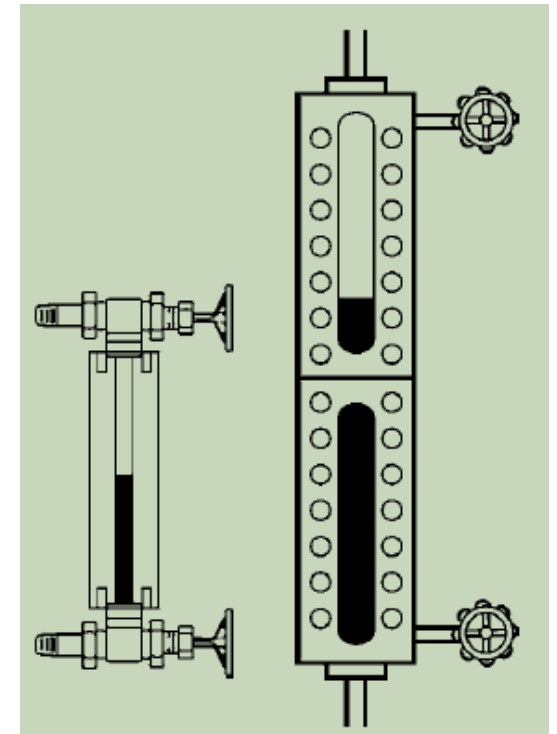
Princípio de funcionamento: usa o princípio dos vasos comunicantes. O nível é observado por um visor de vidro especial, podendo haver escala graduada acompanhando o visor.

Vantagens:

- ✓ Simplicidade;
- ✓ Baixo custo;
- ✓ Indicação direta.

Desvantagens:

- ✓ Indicação local de fluidos não transparentes;
- ✓ Dependendo da geometria do sistema, os visores podem ter tamanhos muito grandes;
- ✓ Pouco práticos para o manuseio.



➤ Boia ou flutuador

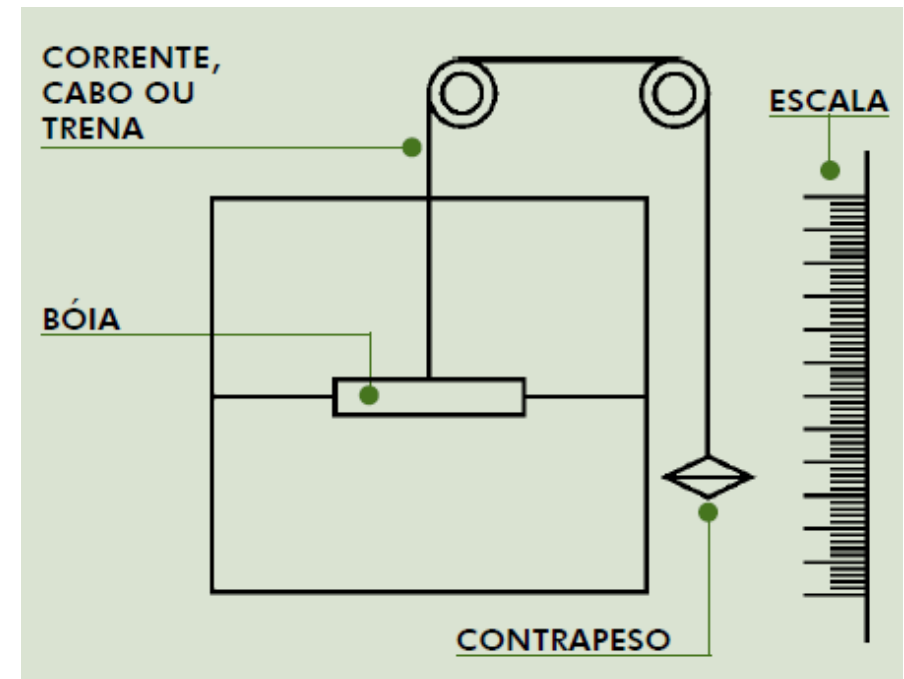
Princípio de funcionamento: a boia ou flutuador está em contato direto com o líquido do processo e presa por um cabo a um contrapeso que está fixo a um ponteiro que indicará diretamente o nível em escala. É usada em tanque aberto para a atmosfera.

Vantagens:

- ✓ Simplicidade;
- ✓ Praticamente isenta do efeito da variação de densidade do líquido;
- ✓ Adequada para medir grandes variações de nível (até 30m).

Desvantagem:

- ✓ Muito sensível à agitação do líquido.



MEDIÇÃO DE NÍVEL INDIRETA

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

Dispositivos para medição de Nível (Indireta)

➤ **Medição de nível por pressão hidrostática (pressão diferencial)**

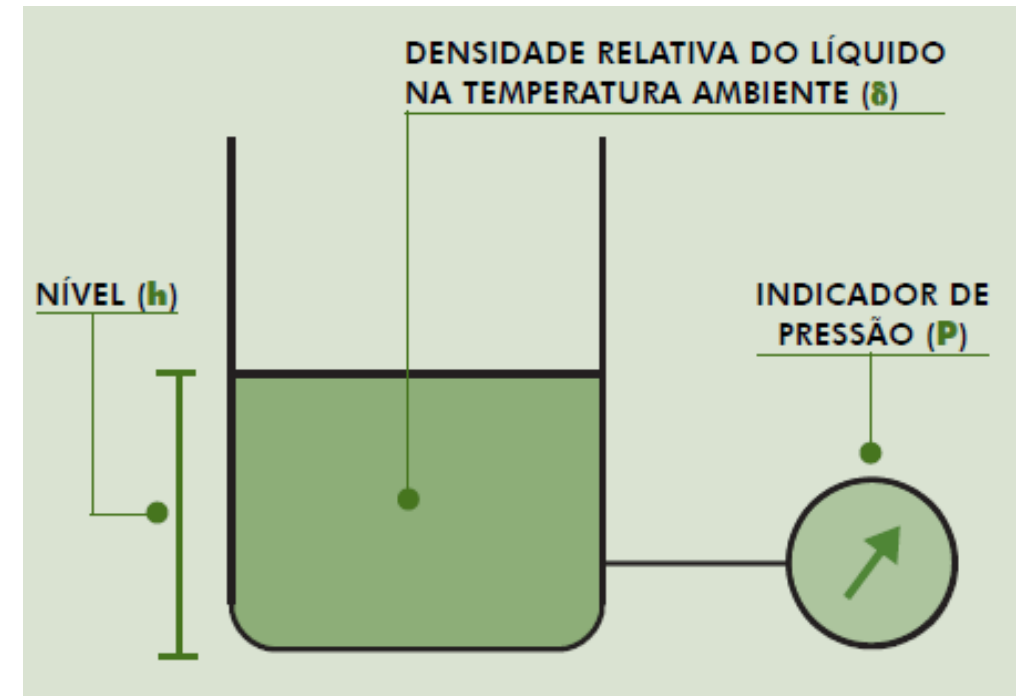
Princípio de funcionamento: a medição é feita pela pressão exercida pela altura da coluna líquida $\rightarrow P = \delta h$;

Vantagens:

- ✓ A medição é feita independente do formato do tanque (aberto ou pressurizado);
- ✓ Pode ser usada para indicação, registro ou controle remoto;
- ✓ Usado para medição de nível de fluidos corrosivos.

Desvantagens:

- ✓ Variações na densidade e na temperatura podem causar erros de medição.



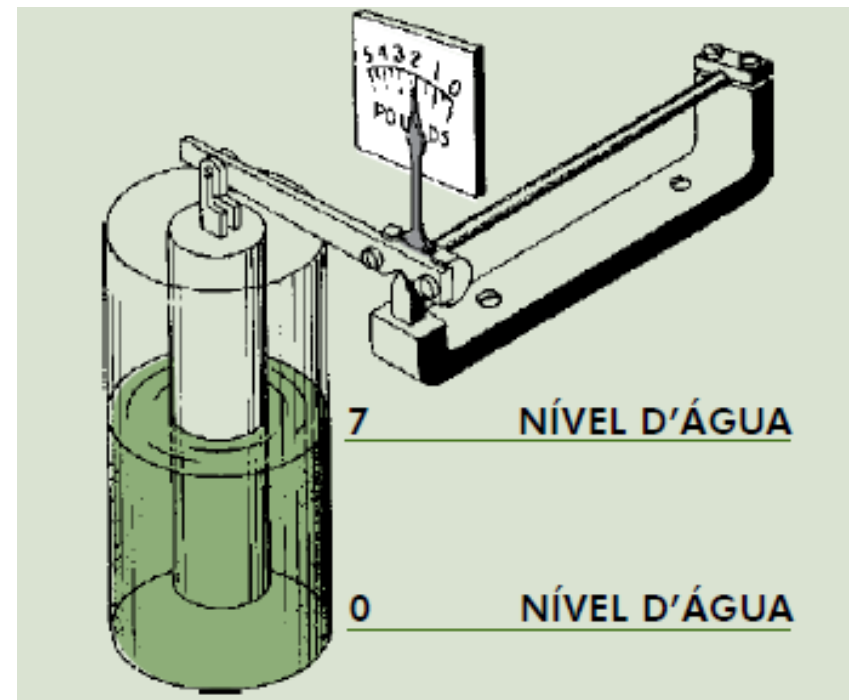
➤ Medição de nível por empuxo

Princípio de funcionamento: fundamenta-se no princípio de Arquimedes. O nível é medido pela variação do peso de um deslocador, ou seja, nível mínimo = peso máximo (deslocador acima do nível) e nível máximo = peso mínimo (deslocador totalmente submerso);

Utilizado para medição de nível de líquidos, interface de líquido vapor e interface entre dois líquidos;

Desvantagens

- ✓ Aplicação apenas para líquidos limpos, pois não pode ter deposição ou incrustação de material no deslocador (alterando seu peso);
- ✓ Custo é elevado.



➤ Medição de nível por ultrassom

Princípio de funcionamento: o transmissor de nível ultrassônico opera gerando um pulso e medindo o tempo que o eco leva para voltar.

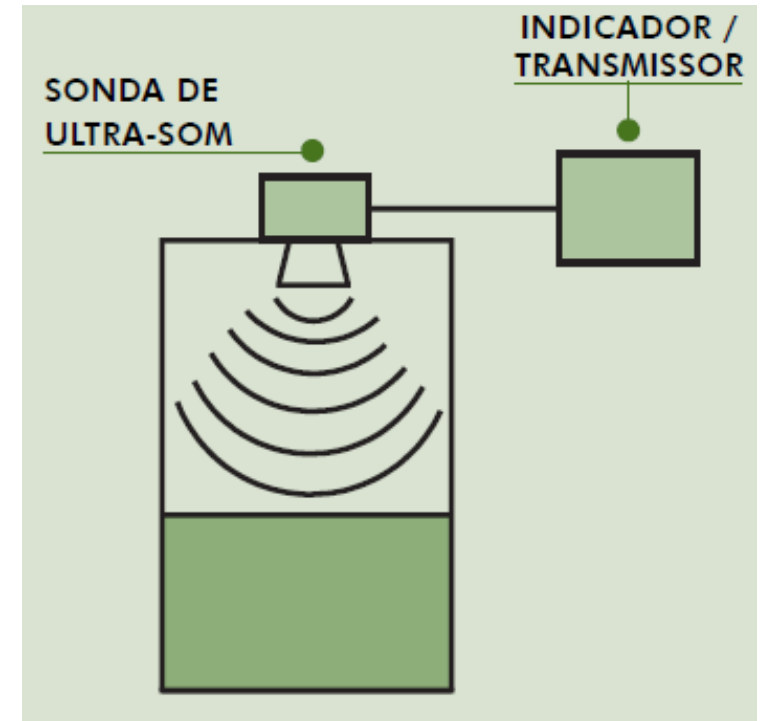
Líquidos e sólidos com partículas grandes e duras são bons refletores, já material fofo ou sujeira solta não, pois tendem a absorver o pulso sônico;

Vantagens:

- ✓ Habilidade de medir o nível sem contato com o processo;
- ✓ A precisão não é afetada por variações na composição, densidade, umidade, condutividade elétrica e outras propriedades do processo.

Desvantagens:

- ✓ Ruído nas medições.



Escolha do medidor:

Medidores	Limites de aplicação
Boia ou flutuador	Acima de 1 m
Medição de nível por pressão hidrostática	Essencialmente nenhum limite superior
Medição de nível por empuxo	0,3 m à 3 m

Observações:

- Para a seleção do medidor de nível deve-se considerar:
 - ✓ Movimento (onda) do nível;
 - ✓ Possibilidade de entupimento;
 - ✓ Influência de deposição e revestimento do sensor;
 - ✓ Necessidade de purga;
 - ✓ Confiabilidade e precisão;
 - ✓ Exigência da legislação.
- Além disso, deve ser levado em conta outros fatores como a influência das variações de temperatura, densidade e composição do fluido.

5.0 - 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.

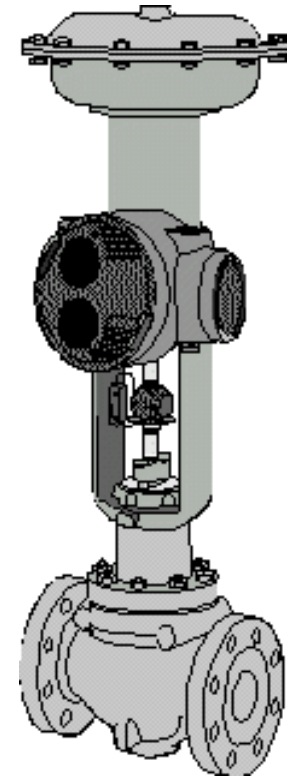
5.1 - Válvulas de controle

Válvulas de controle são dispositivos manuais ou automáticos que consistem em uma restrição variável à passagem do fluxo. O elemento final de controle mais utilizado na indústria química é a válvula de controle. Basicamente, a válvula de controle é uma válvula capaz de variar a restrição ao escoamento de um fluido em resposta a um comando recebido na forma de um sinal padrão.



Em geral, o movimento da haste da válvula é obtido pelo balanço entre duas forças: a tensão de uma mola ligada à haste (função da posição da haste), e a força exercida sobre um diafragma na cabeça da válvula (função da pressão de ar na cabeça da válvula). O comando da válvula é feito pela variação da pressão de ar fornecido à válvula.

Atualmente, é comum encontrar válvulas com posicionadores eletropneumáticos, que permitem que o sistema de controle envie um sinal de 4 a 20 mA diretamente para a válvula. Em outros sistemas, o sinal eletrônico deve ser convertido em um sinal pneumático por meio de um conversor I/P.



5.2 - Tipos de deslocamento

Podem possuir deslocamento linear ou rotativo.

Esfera



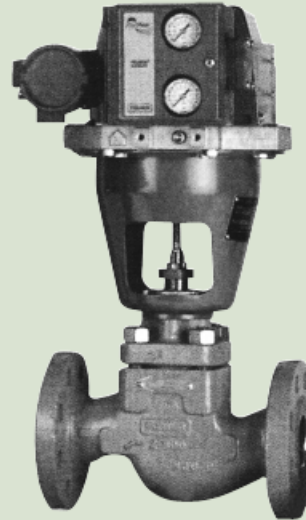
Borboleta



Globo



VÁLVULA GLOBO



LINEAR

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

VÁLVULA BORBOLETA



ROTATIVA

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

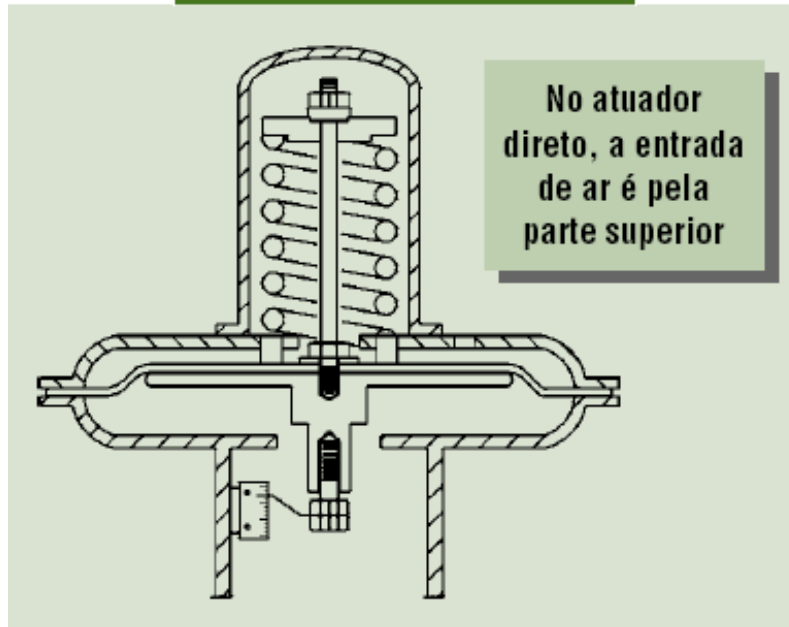
5.3 - Partes das válvulas de controle

As válvulas de controle são compostas de três partes básicas: atuador, castelo e corpo.

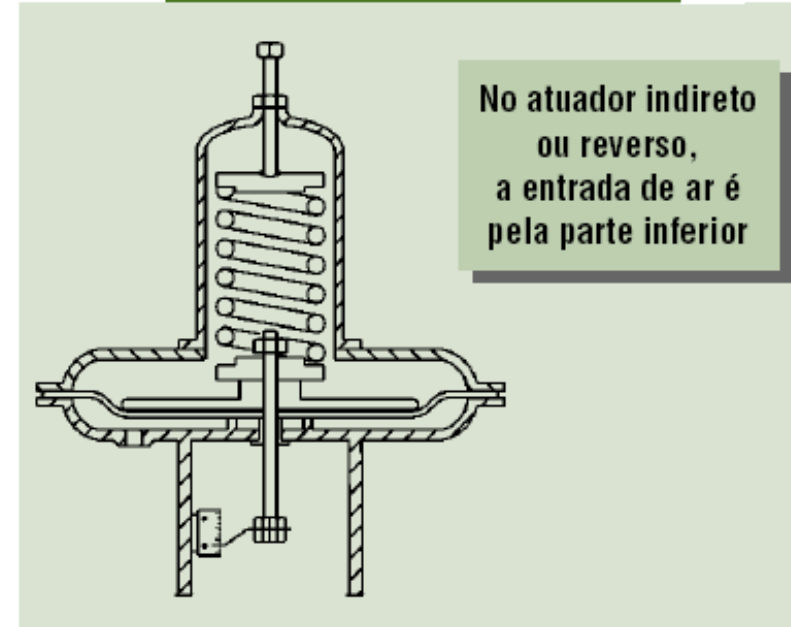


Atuador: dá a força necessária para movimentar o obturador em relação à sede da válvula. O atuador de uma válvula de controle é classificado de acordo com seu deslocamento em relação à entrada de ar de sinal. Pode ser direto ou indireto.

ATUADOR DIRETO

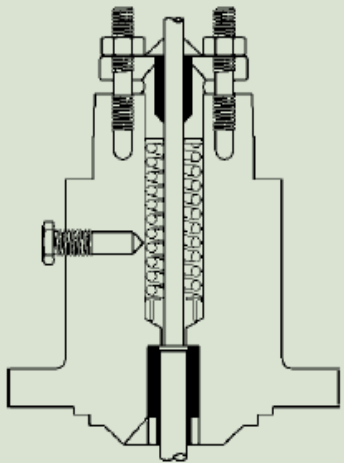


ATUADOR INDIRETO



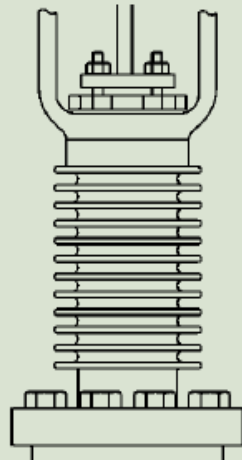
Castelo: permite a conexão do atuador ao corpo e serve de guia da haste do obturador, acomodando a caixa de engaxetamento. O castelo de uma válvula de controle pode ser do tipo: normal, aletado, alongado ou com foles de vedação.

CASTELO NORMAL



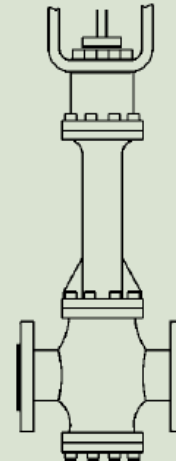
Uso geral
para produtos
abaixo de 180°C

CASTELO ALETADO



Utilizado para
produtos acima
de 180°C

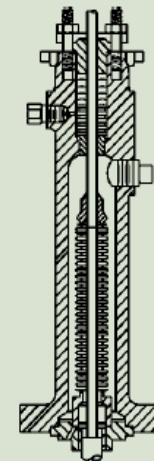
CASTELO LONGADO



Utilizado para
produtos
abaixo de 5°C

CASTELO COM FOLE

De vedação

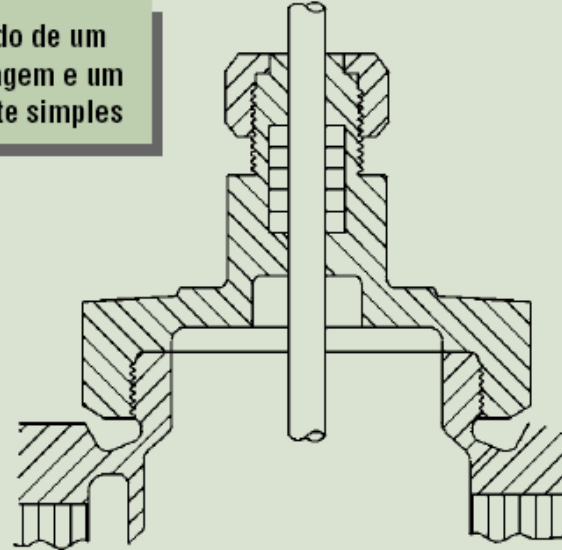


Utilizado para
produtos tóxicos
e radioativos

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.

SEDE SIMPLES

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

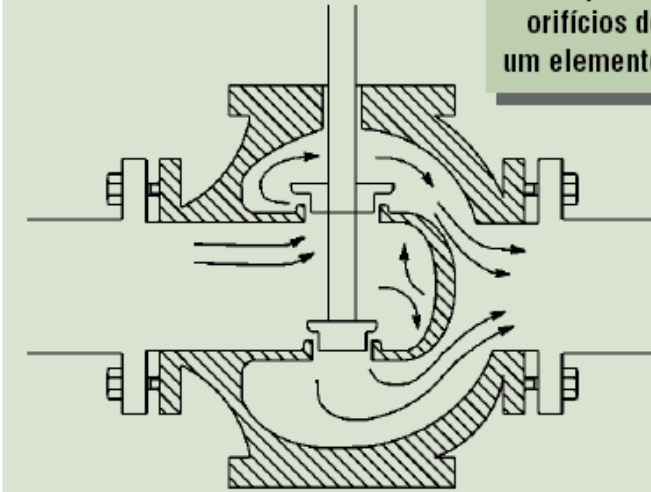


PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS

- ✓ 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

SEDE DUPLA

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



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)

5.4 - Ação da Válvula de Controle

Estudaremos a partir de agora a válvula de controle como um 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. A válvula poderá ser de ação direta (Ar p/ Fechar ou Falha Abre), ou de ação reversa (Ar p/ Abrir ou Falha Fecha).

Um dos aspectos importantes na especificação de uma válvula de controle é a sua posição de falha, ou seja, sua posição na ausência do sinal de controle externo. Esta especificação é geralmente ditada pela segurança do processo. Em algumas aplicações, como no suprimento de vapor para um aquecedor, é desejável que a válvula feche na falta de um sinal de comando: esta válvula é chamada de falha-fecha, ou ar-para-abrir. Em outras situações, a segurança do processo exige a abertura da válvula em caso de falha do sistema: falha-abre, ou ar-para-fechar.

Temos as duas situações:

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

5.5 - Posicionador da Válvula de Controle

O posicionador 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.



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

5.6 - Dimensionamento de uma Válvula de Controle

O tamanho da válvula é normalmente dado por um coeficiente de tamanho, C_v . Este coeficiente é determinado experimentalmente pela passagem de fluido pela válvula. Para líquidos sem flasheamento, por exemplo, a vazão através da válvula é dada por:

$$q \propto \sqrt{\frac{\Delta P_v}{\rho_r}} \quad (1) \quad \text{ou ainda} \quad q = C_v f(\ell) \sqrt{\frac{\Delta P_v}{\rho_r}} \quad (2)$$

onde “q” é a vazão; “ ℓ ” é a posição (normalizada) da haste da válvula expressa em percentagem da abertura; $f(\ell)$ representa a fração de abertura da válvula, que é função da posição da haste da válvula; “ ΔP_v ” é a queda de pressão através da válvula; “ C_v ” é o coeficiente da válvula (associado ao tamanho da mesma) e “ ρ_r ” é densidade relativa do fluido escoando através da mesma (relativa à água a 4°C onde a densidade é 1 g/cm³)

A função $f(\ell)$ representa uma propriedade importante da válvula, a sua característica inerente. A característica da válvula é determinada por diversos fatores, especialmente formato do obturador e do assento.

5.5.1 - Características de uma Válvula de Controle

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.

- ✓ **Linear:** produz uma variação de vazão proporcional à variação de sua abertura;
- ✓ **Abertura rápida:** produz uma grande variação na taxa de vazão, para uma pequena variação na posição da haste. Este tipo de válvula é frequentemente utilizado em controles *on-off* (liga-desliga);
- ✓ **Igual percentagem:** para um deslocamento unitário da haste da válvula, a vazão varia à mesma percentagem, 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. Esta característica resultará em uma exponencial.

1 - Válvula linear:

$$f = \ell$$

f : fração de abertura da válvula ($0 \leq f \leq 1$)

ℓ : posição normalizada do atuador ($0 \leq \ell \leq 1$)

2 - Abertura rápida (válvula de raiz quadrada):

$$f = \sqrt{\ell}$$

f : fração de abertura da válvula ($0 \leq f \leq 1$)

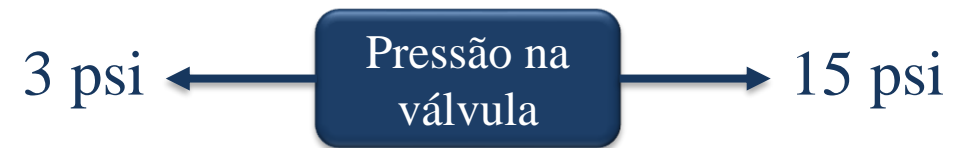
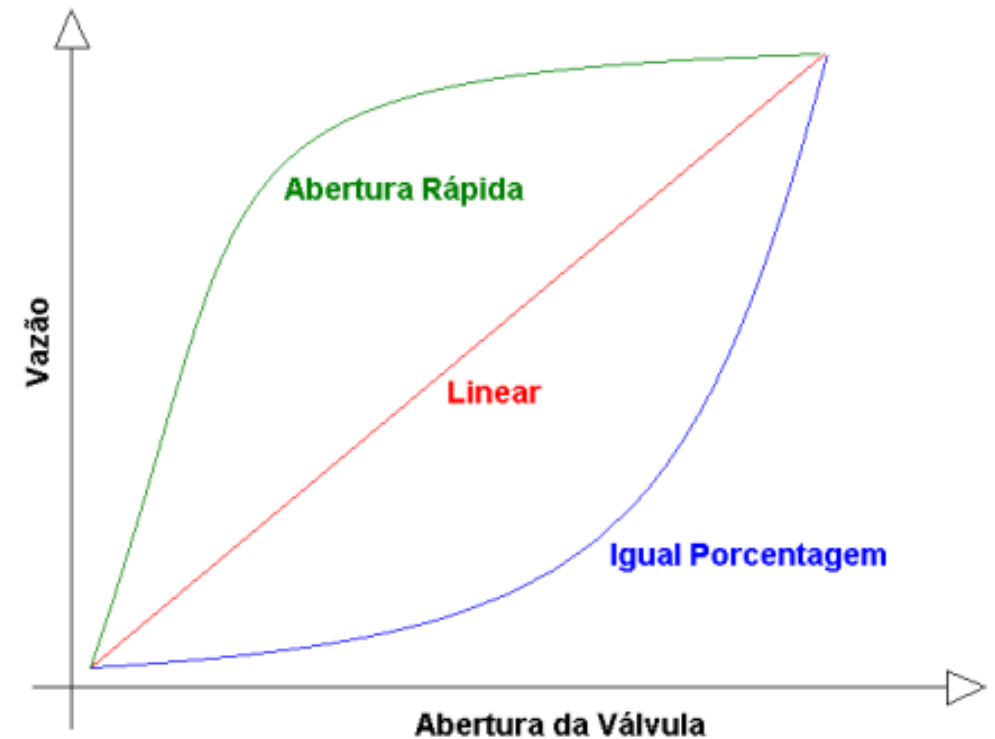
ℓ : posição normalizada do atuador ($0 \leq \ell \leq 1$)

3 - Válvula de igual percentagem (exponencial):

$$f = \alpha^{\ell-1} \quad \text{onde} \quad \alpha \approx 20 \text{ a } 50$$

f : fração de abertura da válvula ($0 \leq f \leq 1$)

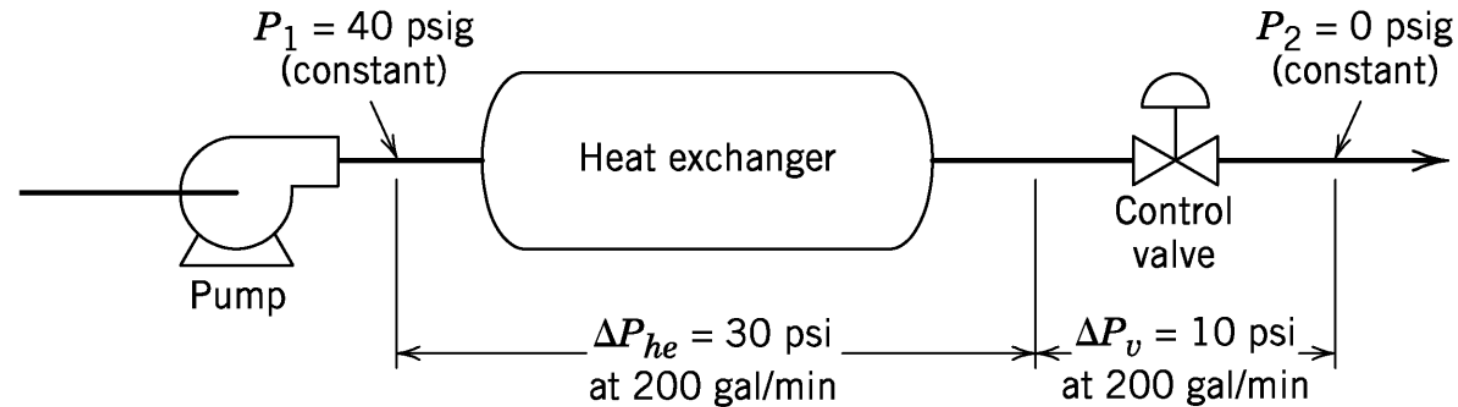
ℓ : posição normalizada do atuador ($0 \leq \ell \leq 1$)



Observações:

- ✓ Como o projeto de válvulas de controle depende da vazão e queda de pressão através da válvula, seu dimensionamento dependerá dos outros equipamentos instalados na linha, tais como bombas, trocadores de calor, filtros, etc. que estão em série com a válvula;
- ✓ A equação que relaciona q versus ΔP_v revela que é necessário ter alta queda de pressão na válvula para a vazão possa ser variada entre amplos limites, isto é, ter boa rangeabilidade. Além do mais este critério conduz a válvulas de dimensões mais reduzidas (pequenas);
- ✓ Contudo, do ponto de vista operacional, é importante ter baixa queda de pressão na linha para que se tenha baixo custo de bombeamento nesta linha;
- ✓ O projeto de uma válvula de controle é, portanto, um compromisso entre rangeabilidade e queda de pressão permissível;
- ✓ Uma regra heurística usada é projetar a válvula de controle para tomar de 1/4 a 1/3 da queda de pressão total na linha.

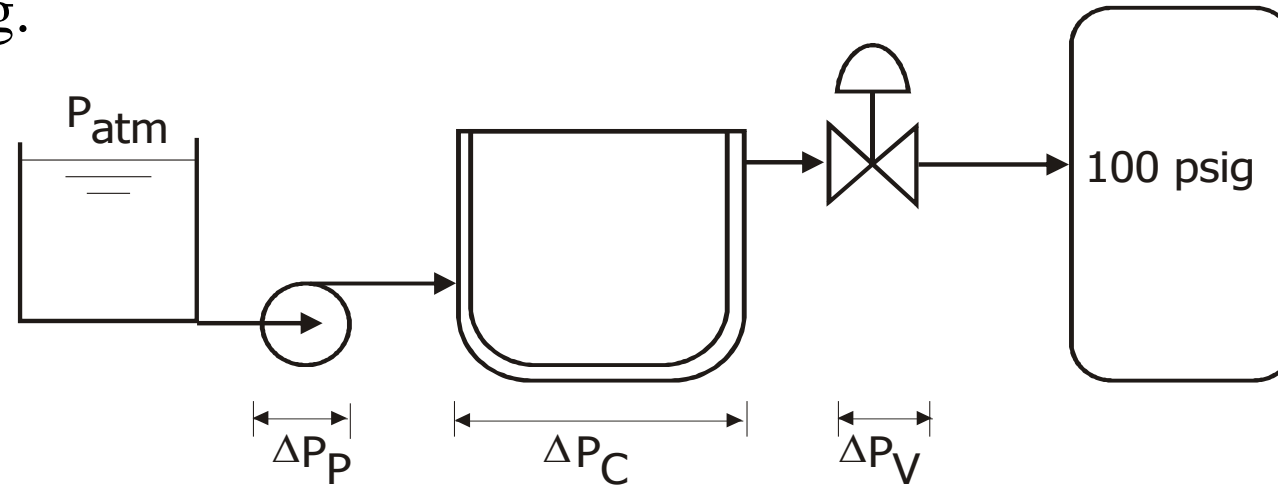
Exemplo 5.1: Uma válvula de controle de característica linear é instalada em série com um trocador de calor e uma bomba centrífuga, esta com uma pressão de descarga constante de 40 psig (embora sua vazão de descarga varie). Se o trocador de calor foi projetado para ter uma $\Delta P_{he} = 30$ psi para uma vazão de 200 gal/min (líquido com densidade relativa 1), selecione uma válvula de controle para esta tarefa?



Solução: $\Delta P_v = 40 - 30 = 10$ psi

$$C_v = \frac{q}{f(\ell) \sqrt{\frac{\Delta P_v}{\rho}}} = \frac{200}{0,5 \sqrt{\frac{10}{1}}} = 127 \text{ gal / psi}^{1/2} \text{ (válvula de 4 in)}$$

Exemplo 5.2: Água líquida é bombeada de um tanque a pressão atmosférica através da camisa de um reator e de uma válvula de controle para dentro de um tanque que opera a pressão constante de 100 psig.



O sistema foi projetado para uma vazão máxima de 400 gpm. Nesta vazão a queda de pressão através camisa de um reator é de 50 psi. A bomba centrífuga usada tem a seguinte curva característica:

$$\Delta P_p = 198,33 - 1,458 \cdot 10^{-4} q^2$$

em que ΔP_p (psi) é o ganho de pressão que o líquido recebe ao passar pela bomba e “q” (gpm) é a vazão bombeada. A válvula de controle é de característica linear.

Pede-se:

- a)- Calcular o C_v da válvula.
- b)- Calcular a fração de abertura da mesma, $f(\ell)$, quando a vazão bombeada através do sistema é de 200 gpm.
- c)- Qual é a rangeabilidade da válvula quando a vazão mínima (q_{\min}) é obtida para uma abertura da válvula, $f(\ell)$, de 10%?

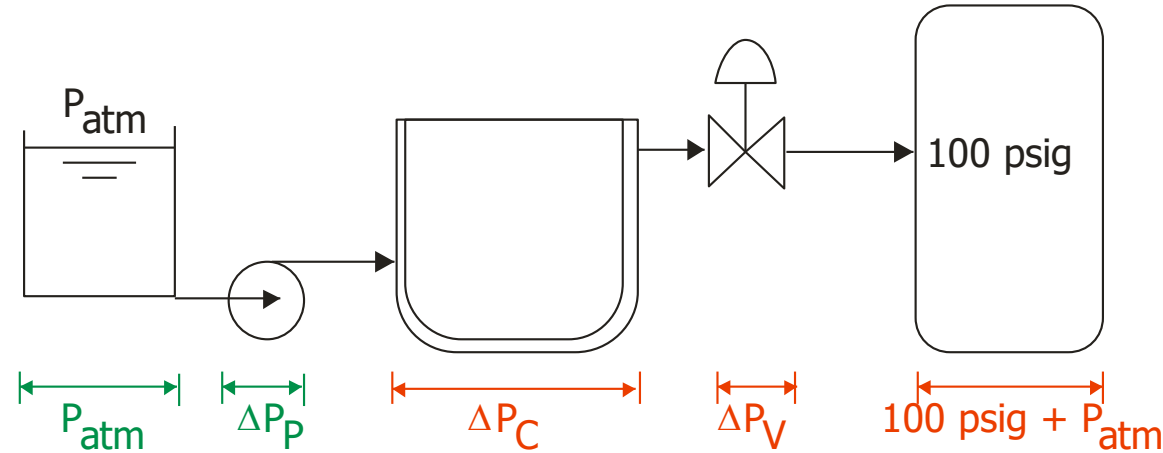
Solução:

- a)- A vazão e o C_v da válvula estão relacionados pela equação da válvula, $q = C_v f(\ell) \sqrt{\frac{\Delta P_v}{\rho_r}}$

O C_v pode, então, ser calculado como: $C_v = \frac{q}{f(\ell) \sqrt{\frac{\Delta P_v}{\rho_r}}}$

Como o C_v é constante, basta que conheçamos a $f(\ell)$ e o ΔP_v para uma dada vazão para se calcular o C_v . É dado do problema que para a vazão máxima de 400 gpm, onde podemos considerar a $f(\ell) = 1$, a queda de pressão (perda de carga) na camisa do reator é de 50 psi.

Com esses dados precisamos, então, calcular a perda de carga na válvula (ΔP_v). Para isso, basta fazer um balanço de cargas no sistema:



$$P_{atm} + \Delta P_p = \Delta P_c + \Delta P_v + 100 + P_{atm}$$

$$198,33 - 1,458 \cdot 10^{-4} \times 400^2 = 50 + \Delta P_v + 100$$

$$\Delta P_v = 25 \text{ psi}$$

Substituindo ΔP_v na equação da válvula, encontramos o C_v :

$$C_v = \frac{400}{1 \sqrt{\frac{25}{1}}} = 80 \text{ gpm} / \text{psi}^{1/2}$$

b)- Para se calcular a fração de abertura da válvula, $f(\ell)$, quando a vazão for de 200 gpm, podemos usar o C_v calculado no item a, uma vez que o C_v é constante. Contudo, como a vazão mudou para 200 gpm, a perda de carga na camisa e pressão de descarga na bomba também deverão mudar. Então, temos que atualizar estes cálculos para a vazão de 200 gpm e depois calcular a queda de pressão na válvula pelo balanço de cargas:

$$\text{Bomba: } \Delta P_p = 198,33 - 1,458 \cdot 10^{-4} \times 200^2 \rightarrow \Delta P_p = 192,50 \text{ psi}$$

$$\text{Camisa: } \Delta P_c \propto q^2 \rightarrow \Delta P_c = kq^2 \rightarrow \frac{(\Delta P_c)_2}{(\Delta P_c)_1} = \left(\frac{q_2}{q_1} \right)^2 \rightarrow \frac{\Delta P_c}{50} = \left(\frac{200}{400} \right)^2 \rightarrow \Delta P_c = 12,50 \text{ psi}$$

Pelo balanço de cargas:

$$P_{\text{atm}} + \Delta P_p = \Delta P_c + \Delta P_v + 100 + P_{\text{atm}} \rightarrow 192,50 = 12,50 + \Delta P_v + 100 \rightarrow \Delta P_v = 80 \text{ psi}$$

$$\text{Assim, } f(\ell): q = C_v f(\ell) \sqrt{\frac{\Delta P_v}{\rho_r}} \rightarrow 200 = 80 \times f(\ell) \times \sqrt{\frac{80}{1}} \rightarrow f(\ell) = 0,2795 \text{ ou } 27,95\%$$

c)- Para se calcular a rangeabilidade precisamos saber qual é a vazão mínima dada pela válvula quando a $f(\ell)$ é de 10%. Como ainda não sabemos qual é esta vazão mínima, temos que expressar as perdas de carga da linha em função da vazão e usar a equação da válvula para calcular esta vazão:

$$\text{Bomba: } \Delta P_p = 198,33 - 1,458 \cdot 10^{-4} \times q_{\min}^2$$

$$\text{Camisa: } \frac{\Delta P_c}{50} = \left(\frac{q_{\min}}{400} \right)^2 \rightarrow \Delta P_c = 50 \times \left(\frac{q_{\min}}{400} \right)^2$$

$$\text{Pelo balanço de cargas: } P_{\text{atm}} + \Delta P_p = \Delta P_c + \Delta P_v + 100 + P_{\text{atm}}$$

$$198,33 - 1,458 \cdot 10^{-4} \times q_{\min}^2 = 50 \times \left(\frac{q_{\min}}{400} \right)^2 + \Delta P_v + 100$$

$$\Delta P_v = 198,33 - 1,458 \cdot 10^{-4} \times q_{\min}^2 - 50 \times \left(\frac{q_{\min}}{400} \right)^2 - 100$$

Finalmente, a equação da válvula nos dará a $f(\ell)$:

$$q = C_v f(\ell) \sqrt{\frac{\Delta P_v}{\rho_r}}$$

$$q_{\min} = C_v f(\ell) \sqrt{\frac{198,33 - 1,458 \cdot 10^{-4} \times q_{\min}^2 - 50 \times \left(\frac{q_{\min}}{400}\right)^2 - 100}{\rho_r}}$$

$$q_{\min} = 80 \times 0,1 \sqrt{\frac{198,33 - 1,458 \cdot 10^{-4} \times q_{\min}^2 - 50 \times \left(\frac{q_{\min}}{400}\right)^2 - 100}{1}} \rightarrow q_{\min} = 78,22 \text{ gpm}$$

Então a rangeabilidade é dada por: $R = \frac{q_{\max}}{q_{\min}} = \frac{400}{78,22} \rightarrow R = 5,11$

PROPOSTA DE EXERCÍCIOS (Entrega não necessária!):

- 1)- Refazer os exercícios do capítulo;
- 2)- Fazer as atividades propostas para o capítulo.

BOM ESTUDO!

Bibliografia

- 1)- SEBORG, D. E., EDGAR, T. F., MELLCHAMP, D. A. – Process Dynamics and Control, Wiley, 2011.
- 2)- SMITH, C. A., CORRIPIO, A. B. – Princípios e Práticas do Controle Automático de Processos, LTC, 3ª edição, 2008.
- 3)- OGATA, K – Engenharia de Controle Moderno, Pearson, 5ª edição, 2011.
- 4)- HENRIQUE, H. M. – Notas de aula. Universidade Federal de Uberlândia, 2009.
- 5)- LUYBEN, W. L. – Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineers, 2a. Edição, McGraw Hill, 1990.
- 6)- BEQUETTE, B. W. – Process Control. Modeling, Design, and Simulation. Prentice Hall, 2003.
- 7)- SIGHIERI, L., NISHINARI, A. Controle Automático de Processos Industriais – Instrumentação, 2ª Ed, Edgard Blucher, 1997.
- 8)- COUGHANOWR, D.; LEBLANC, S. Process Systems Analysis and Control, McGraw Hill, ed 3, 2008.
- 9)- STEPHANOPOULOS, G. – Chemical Process Control. An Introduction to Theory and Practice, Prentice Hall, 1984.
- 10)- GONÇALVES, M. G. – Monitoramento e Controle de Processos, Petrobras, SENAI, 2003.



Obrigado!
Bom estudo!

Prof. Davi Leonardo de Souza
davi.souza@uftm.edu.com