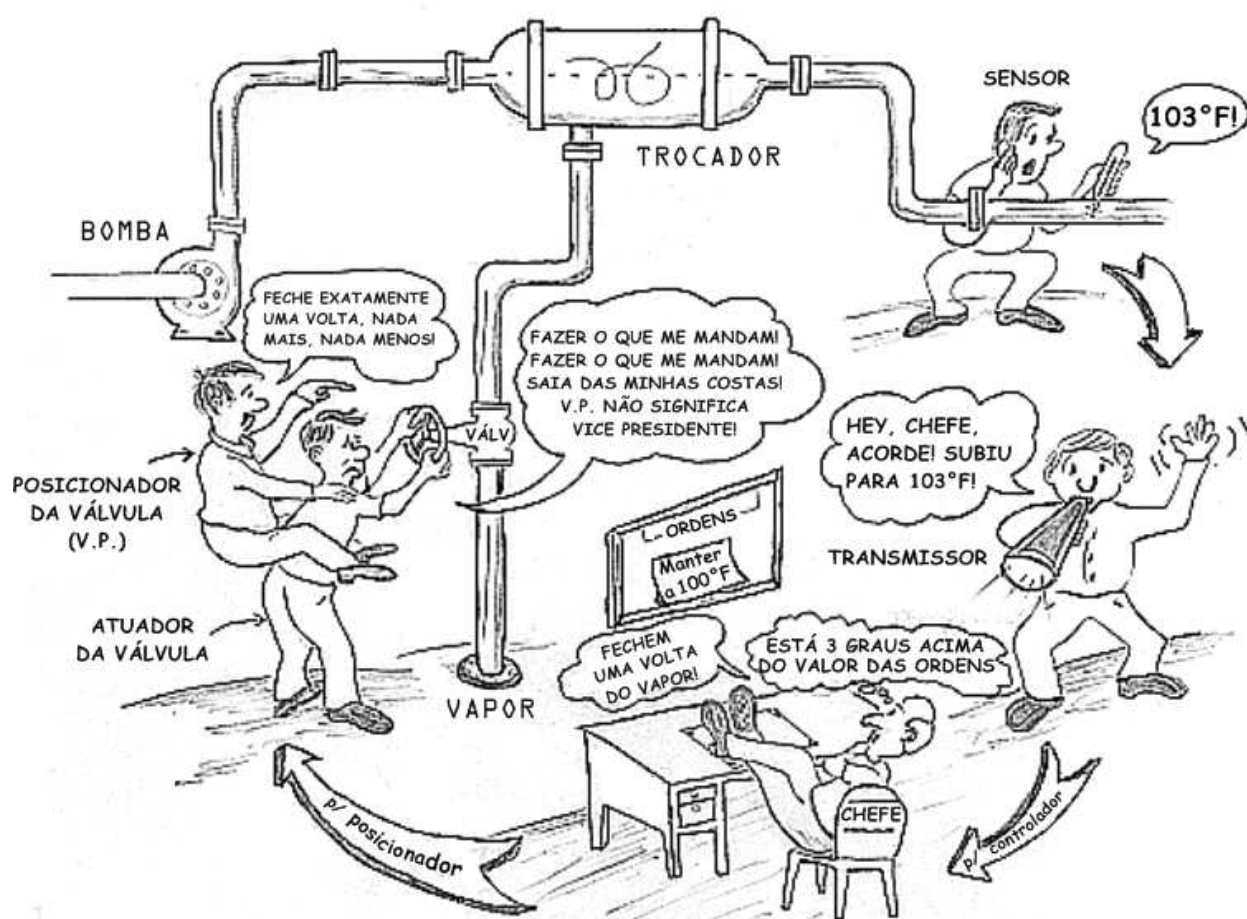


INTRODUÇÃO AO CONTROLE DE PROCESSOS QUÍMICOS

Prof. Luiz de França Netto



SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO	3
1. INTRODUÇÃO AO CONTROLE DE PROCESSOS QUÍMICOS	4
1.1 Leis de Controle de Processos, 4	
1.2 Nomenclatura Básica, 4	
1.3 Tipos de Controle, 5	
1.4 Ações de Controle, 12	
1.5 Tipos de Controladores, 13	
2. TRANSFORMADA DE LAPLACE	18
3. FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA	20
3.1 Sistemas Dinâmicos de Primeira Ordem, 20	
3.1.1 Resposta de um Sistema de 1ª Ordem a uma Entrada Degrau, 21	
3.2 Sistemas Dinâmicos de Segunda Ordem, 25	
3.2.1 Classificação de Sistemas de 2ª Ordem, 26	
3.2.2 Resposta de um Sistema de 2ª Ordem a uma Entrada Degrau, 26	
4. SIMBOLOGIA E NOMENCLATURA ISA	32
4.1 Piping & Instrumentation Diagram, 32	
4.2 Nomenclatura de Instrumentação, 32	
4.3 Simbologia de Equipamentos, 33	
4.4 Simbologia de Instrumentação, 34	
4.4.1 Exemplos de Malhas de Controle, 35	
5. PLACA DE ORIFÍCIO	63
5.1 Princípio de Medição, 63	
5.2 Dimensionamento de Placas para Líquidos, 64	
5.3 Dimensionamento de Placas para Gases, 67	
6. VÁLVULA DE CONTROLE	72
6.1 Componentes da Válvula de Controle, 72	
6.2 Vazão Característica da Válvula de Controle, 74	
6.2.1 Vazão Característica Inerente, 75	
6.2.2 Vazão Característica Instalada, 76	
6.3 Dimensionamento de Válvulas de Controle para Líquidos, 80	
6.4 Dimensionamento de Válvulas de Controle para Gases, 84	
APÊNDICE	87
1. Conversão de Unidades, 87	
2. Cálculo de Propriedades Físicas Médias, 88	
3. Dimensionamento de Tubulações, 89	
4. Dimensionamento de Bombas, 89	
ANEXO	90
1. Diagrama de Obert (Pressões Moderadas), 90	
2. Diagrama de Obert (Pressões Baixas), 91	
RESPOSTAS DOS TESTES	92
BIBLIOGRAFIA	93

APRESENTAÇÃO

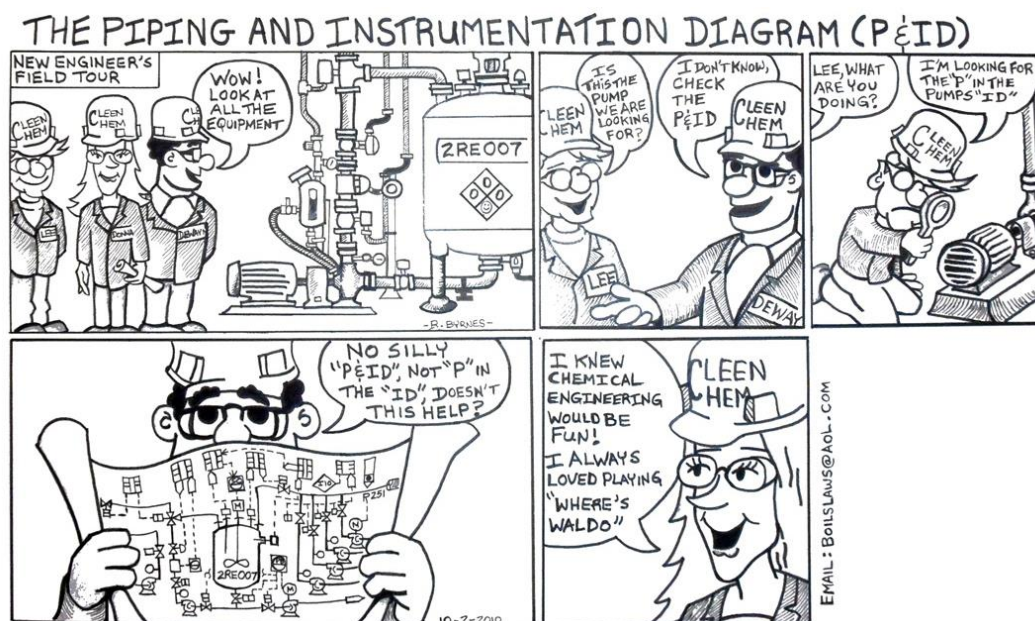
Na maioria das vezes, ao tomarmos banho, faz-se necessário um ajuste de temperatura. Nossa pele permite **sentirmos** as sensações de quente e frio e nosso cérebro **gera uma solução: abrir ou fechar** um pouco mais as válvulas do chuveiro. Com este exemplo lúdico geralmente é apresentada a noção de Controle de Processo Químico em sala de aula. Comparando a um sistema industrial, a pele é um **medidor** de temperatura, nosso cérebro é o **controlador** e nós somos **atuadores** sobre as **válvulas de controle**, alterando o fluxo de água para modificar a temperatura. A charge que serve de capa destes apontamentos mostra de maneira bem humorada um sistema de controle no qual o próprio homem desempenha os papéis dos modernos sensores industriais. Neste sentido, uma malha de controle típica possui as seguintes etapas:

- **Medição:** é preciso conhecer a temperatura da água;
- **Comparação:** comparamos a temperatura medida com uma temperatura ideal;
- **Controle:** a partir de cálculos envolvendo a diferença entre as temperaturas medida e ideal, um controlador gera uma solução (correção), que pode ser abrir ou fechar uma válvula; e
- **Correção:** o atuador toma a ação gerada pelo controlador.

Além disso, pode ser destacada a função de transmissão. A informação **térmica** é convertida em pulsos **elétricos** e a ação que tomamos é motora. Medidor, controlador e atuador comunicam-se em diferentes “línguas” por intermédio de um **transmissor**.

O Capítulo 1, Introdução ao Controle de Processos Químicos, apresenta a importância desta área da Engenharia e os conceitos principais, enfatizando a nomenclatura e os tipos de malhas (*loops*), ações de controle e controladores. O Capítulo 2, Transformada de Laplace, traz uma revisão de Cálculo Diferencial e Integral, trabalhando-se com a aplicação das transformadas de Laplace na resolução de equações diferenciais ordinárias, focando a utilização de tabelas. O Capítulo 3, Função de Transferência, introduz a modelagem matemática de sistemas dinâmicos, análise preliminar para o projeto de controladores. O Capítulo 4, Simbologia e Nomenclatura ISA, aborda a leitura e construção de P&ID's (*Piping and Instrumentation Diagrams*), destacando-se as malhas de controle de fluxo, nível, temperatura e pressão. O Capítulo 5, Placa de Orifício, trata do dimensionamento do elemento primário de **medição de vazão** mais empregado na indústria. Finalmente, o Capítulo 6, Válvula de Controle, discute os principais conceitos teóricos e práticos do **elemento final de controle**.

Ao longo do curso, além dos novos conhecimentos, são resgatados: balanço material em processos físicos e químicos, balanço de energia mecânica, Primeiro Princípio da Termodinâmica, cálculo de sistemas de bombeamento, estimativa de propriedades físicas de misturas entre outros. Além disso, cada capítulo traz questões de Concursos Públicos, a fim de incentivar o aluno a avaliar sua aprendizagem no decorrer do semestre. Bons estudos!



1. INTRODUÇÃO AO CONTROLE DE PROCESSOS QUÍMICOS

Controlar um processo químico é manter os valores das **variáveis do processo** (nível, fluxo, pressão, temperatura, pH, condutividade, concentração etc.) dentro de limites de projeto. Dentre os objetivos do controle destacam-se:

- a) Garantir segurança aos operadores;
- b) Proteger o meio ambiente;
- c) Promover a qualidade dos produtos (especificações);
- d) Estabilidade operacional e
- e) Lucratividade (eficiência e otimização).

1.1 LEIS DE CONTROLE DE PROCESSOS

1ª Lei – “O melhor sistema de controle é o mais simplificado capaz de realizar dada tarefa.”

2ª Lei – “O processo deve ser plenamente compreendido.”

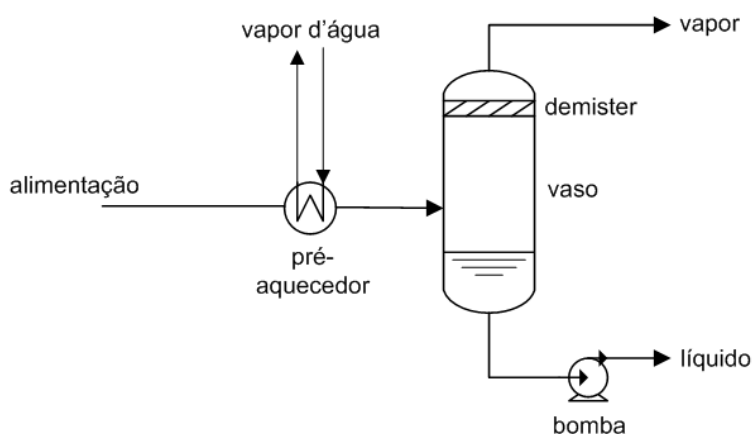
3ª Lei – “Os níveis de líquido sempre devem ser mantidos sob controle.” (LUYBEN, 1997)

1.2 NOMENCLATURA BÁSICA

- **Variável medida ou do processo (VP):** é aquela cujo valor medido é tomado como referência para ação de controle.
- **Variável manipulada (VM):** é aquela que é alterada a fim de se manter a variável controlada num dado valor constante.
- **Variável controlada (VC):** é aquela que se deseja manter em um valor constante.
- **Ponto de trabalho (set-point, SP):** é o valor constante no qual se deseja manter a VC.
- **Erro:** é a diferença entre o SP e a VP, dado por $\varepsilon = SP - VP$ ou $\varepsilon = R - B$.
- **Elemento primário (medidor):** é o instrumento que realiza medições da VP.
- **Controlador:** é o instrumento que faz a comparação entre o SP e a VP e julga a melhor ação de controle.
- **Elemento secundário ou final (atuador):** é o instrumento (em geral uma válvula) que promove uma alteração física (ex.: abrir ou fechar) no processo a fim de manter a VC no SP.
- **Transmissor:** é o instrumento que faz a conversão de sinal entre medidor / controlador / atuador. Na indústria, os sinais elétricos vão de 4 a 20 mA e os pneumáticos, de 3 a 15 psig.
- **Malha de controle:** é o conjunto processo / medidor / transmissor / controlador / atuador.
- **Malha aberta:** o sinal de saída não interfere no sinal de entrada (ex.: microondas).
- **Malha fechada:** o sinal de saída modifica o sinal de entrada (ex.: caixa d'água).

EXERCÍCIO 1.1

Considere o processo de destilação flash abaixo. Em sua opinião, quais as variáveis a serem controladas? Esboce medidores e válvulas de controle.



1.3 TIPOS DE CONTROLE

a) Controle feedback (por realimentação): a variável controlada é a variável medida. Desta forma, a saída precisa ser alterada antes que se tome uma ação de controle, isto é, as perturbações são apenas compensadas. A Figura 1.1 apresenta o diagrama de blocos deste tipo de controle.

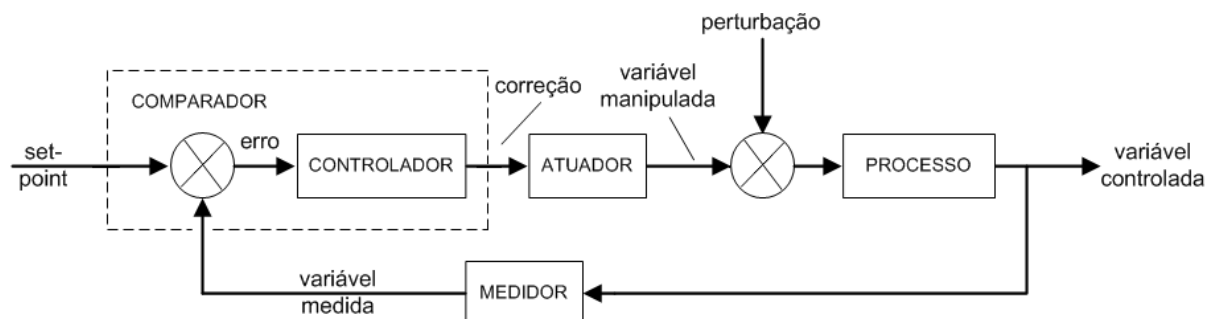


Figura 1.1 – Diagrama de blocos do controle feedback.

b) Controle feedforward (antecipativo): a variável medida não é a variável controlada, mas, sim, uma variável perturbação. Desta forma, visa corrigir os distúrbios antes que afetem a VC. O diagrama de blocos deste tipo de controle é mostrado na Figura 1.2. Algumas vantagens e desvantagens dos controles feedback e feedforward estão listadas no Quadro 1.1.

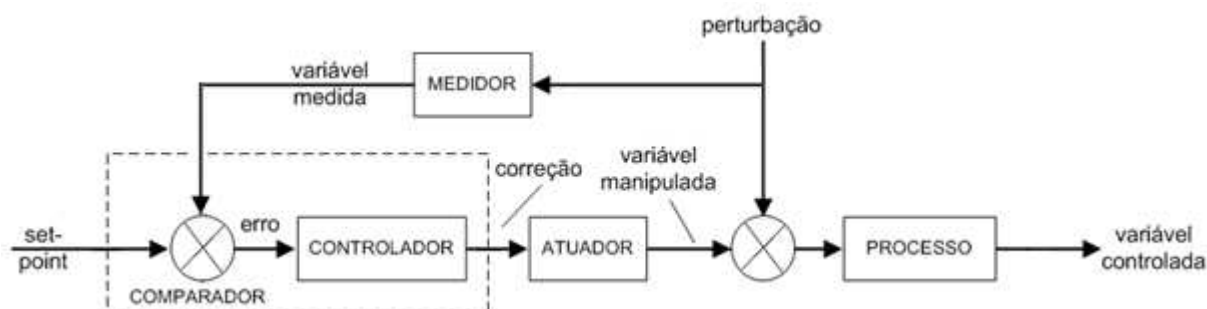


Figura 1.2 – Diagrama de blocos do controle feedforward.

Quadro 1.1 – Vantagens e desvantagens dos controles feedback e feedforward (STEPHANOPOULOS, 1984).

Feedback (Realimentação)	
Vantagens	Desvantagens
1. Não requer identificação e medição dos distúrbios. 2. É insensível a erros na modelagem do processo. 3. É insensível a mudanças nos parâmetros do processo.	1. Aguarda até que o efeito da perturbação seja sentido pelo sistema para, então, tomar uma ação de controle. 2. É insatisfatório para sistemas lentos ou com elevado tempo morto (<i>dead time</i>). 3. Pode criar instabilidade na resposta em malha fechada.
Feedforward (Antecipativo)	
Vantagens	Desvantagens
1. Age antes que o efeito da perturbação seja sentido pelo sistema. 2. É bom para sistemas lentos ou com significativo tempo morto. 3. Não introduz instabilidade na resposta em malha fechada.	1. Requer identificação e medição direta de todas as fontes de distúrbio. 2. Não pode funcionar com distúrbios não medidos. 3. Sensível a variações nos parâmetros de processo. 4. Requer bom conhecimento do modelo.

c) Controle em cascata: é formado por dois controladores feedback, um escravo e outro mestre. A saída do controlador mestre estabelece o SP (variável) do escravo. A saída do controlador escravo vai para o elemento final de controle. O intuito deste sistema é minimizar perturbações na variável manipulada. O diagrama de blocos está representado através da Figura 1.3.

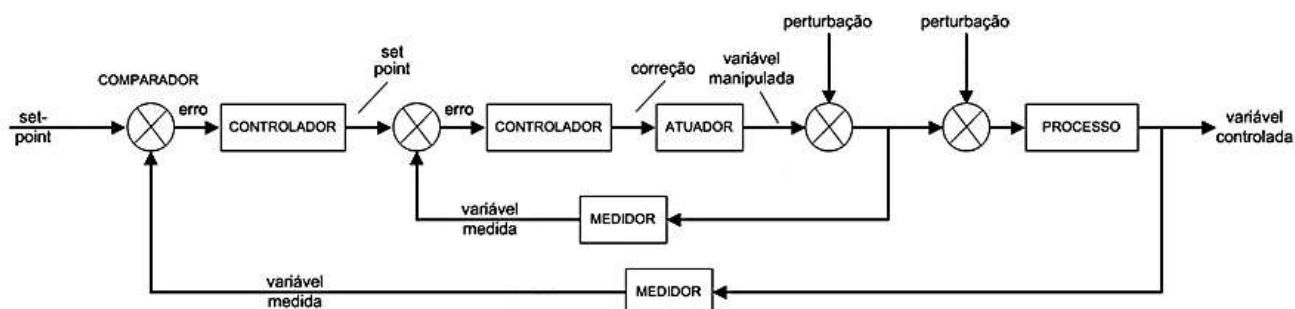


Figura 1.3 – Diagrama de blocos do controle em cascata.

Uma comparação entre os três tipos de controle apresentados pode ser feita analisando-se o controle de nível de um tanque (ver Figura 1.4). Na configuração (a), a variável “nível” é medida e controlada; em (b), a perturbação (vazão de entrada) é medida para se controlar o nível e, em (c), emprega-se um controlador de nível (mestre) que gera o set-point do controlador de vazão de saída (escravo), minimizando distúrbios desta variável.

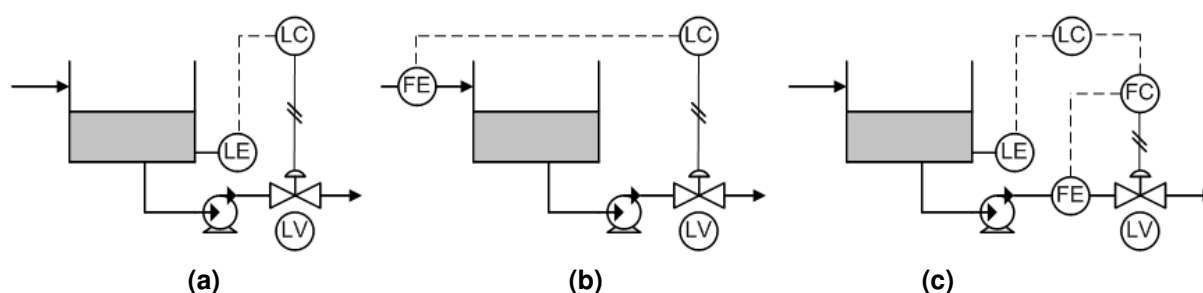
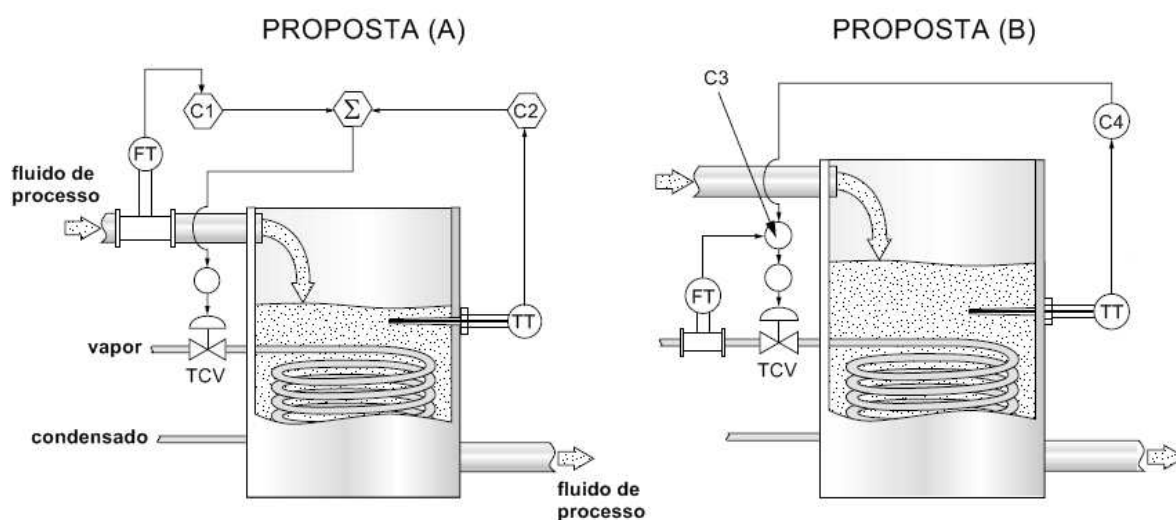


Figura 1.4 – Controle de nível de um tanque empregando-se diferentes técnicas. (a) Feedback; (b) Feedforward e (c) Cascata.

EXERCÍCIO 1.2

O fluido de processo de uma unidade industrial é aquecido em um tanque dotado de serpentina pela qual escoo vapor d'água saturado. Um engenheiro químico faz duas propostas de sistemas de controle, (A) e (B), mostradas abaixo. Os elementos FT e TT são medidores de vazão e temperatura, respectivamente. A válvula de controle TCV modula a vazão de vapor de aquecimento. Identifique os tipos de controle associados aos controladores C1, C2, C3 e C4.



EXERCÍCIO 1.3

No sistema de destilação apresentado na Figura 1.5, os elementos LT, FT e PT são, respectivamente, medidores de nível, fluxo e pressão, enquanto LC, FC e PC simbolizam, nesta ordem, controladores de nível, fluxo e pressão. Identifique os tipos de controle da coluna.

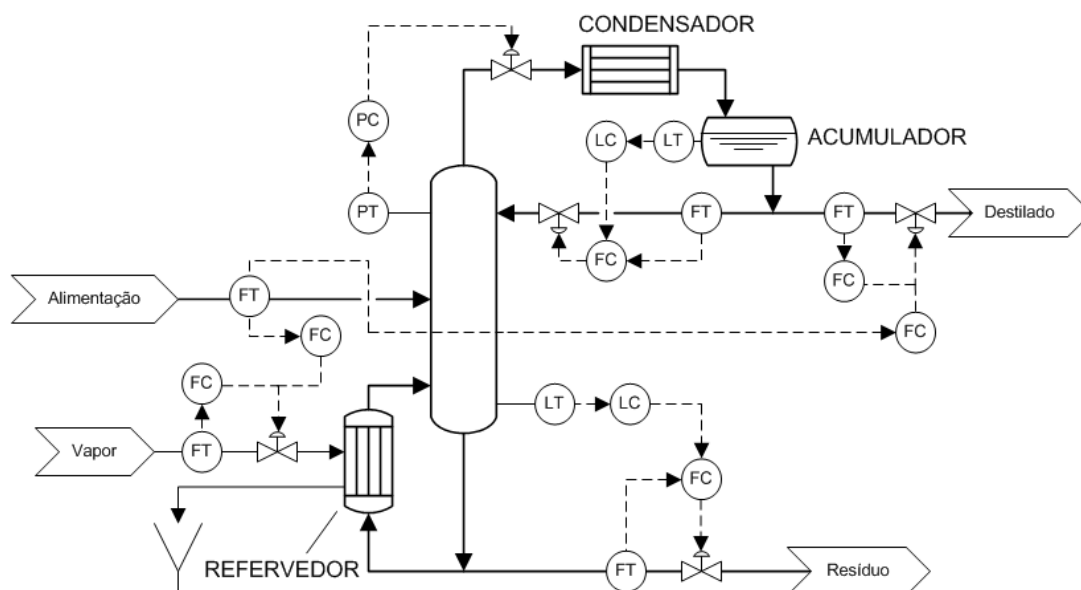
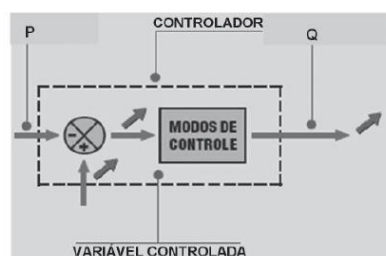
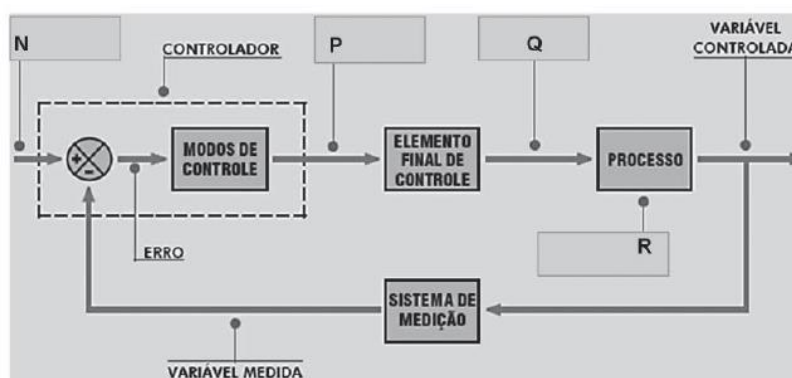


Figura 1.5 – Sistema de destilação do exercício 1.3.

EXERCÍCIO 1.4

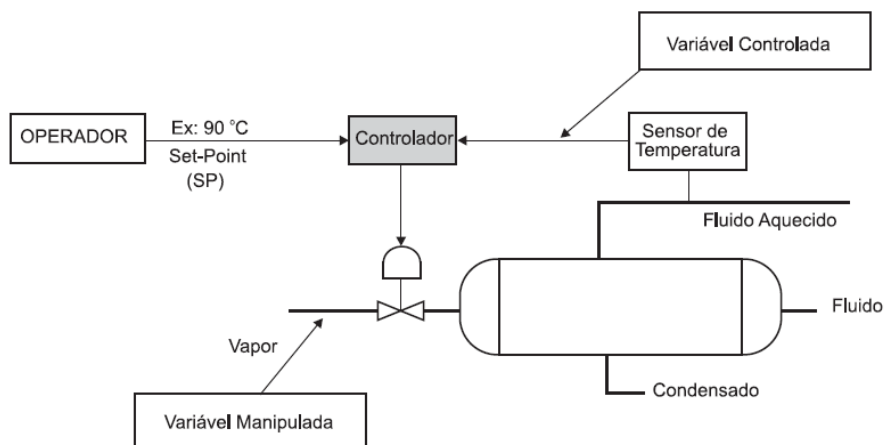
(Petrobras) Na figura, vê-se um diagrama de controle mostrando a ação do controlador. No esquema mostrado, P, Q e o tipo de ação sobre a variável controlada são, respectivamente,

- set point, resultado, direta
- set point, resultado, indireta
- set point, correção, direta
- signal, correção, direta
- signal, resultado, indireta

**EXERCÍCIO 1.5**

(Petrobras) O diagrama de blocos, descrito na figura acima, mostra uma malha de controle fechada de um determinado processo. São vistos agentes descritos como R, Q, P e N, que são fornecidos ou recebidos pelo controle e pelo processo. Os agentes R, Q, P e N são, respectivamente,

- correção, set point, variável manipulada, ação
- ação, variável manipulada, resultado, set point
- distúrbio, variável manipulada, resultado, medição
- distúrbio, variável manipulada, correção, set point
- set point, correção, variável manipulada, ação

EXERCÍCIO 1.6

(Petrobras) No processo de aquecimento de um fluido com uso de vapor e trocador de calor, utiliza-se um controle de processo a fim de garantir a eficiência dessa operação. Analisando o esquema acima, verifica-se que o controle é uma malha

- a) fechada, sendo que o operador não interfere no controle.
- b) fechada, sendo que o operador interfere no controle.
- c) aberta, sendo que o operador não interfere no controle.
- d) aberta, sendo que o operador interfere no controle.
- e) aberta e independe da presença do operador.

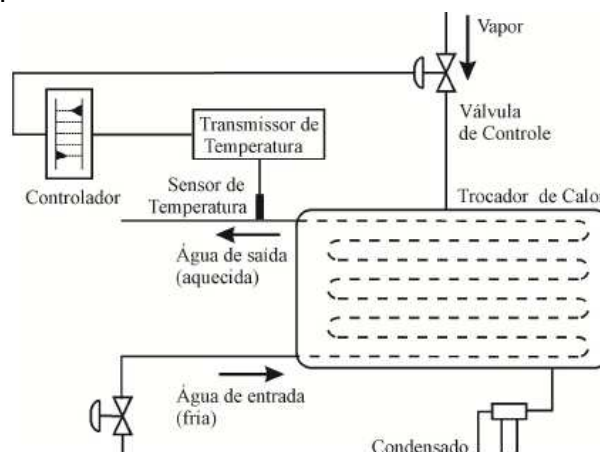
EXERCÍCIO 1.7

(Transpetro) Em um sistema de controle em malha fechada, a planta é o elemento que possui a(s) variável(eis)

- a) manipulada(s)
- b) medida(s)
- c) erro
- d) a ser(em) controlada(s)
- e) de referência

EXERCÍCIO 1.8

(CEPS-UFPA) Seja um sistema de controle em malha fechada, mostrado na figura abaixo.

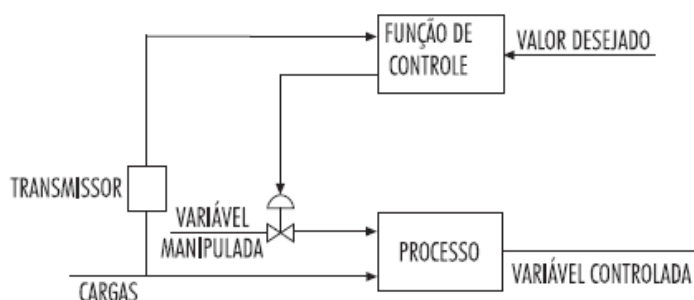


Sobre o referido sistema, apresentam-se as seguintes afirmações.

- I. Os elementos primários do controle são representados pelo sensor de temperatura e pela válvula de controle.
- II. A variável manipulada é a posição da válvula de controle.
- III. A variável de processo é a temperatura da água de saída.
- IV. O set-point desta malha é a temperatura desejada da água aquecida.
- V. A pressão do vapor e a vazão de água são perturbações do processo.

Estão corretas as afirmações:

- a) I, II e III.
- b) III, IV e V.
- c) II, IV e V.
- d) II, III e V.
- e) I, II e V.

EXERCÍCIO 1.9

(Petrobras) O tipo de controle ilustrado no sistema acima é

- antecipativo, apenas.
- manual típico, apenas.
- antecipativo associado a um controle por retroalimentação.
- por retroalimentação com ação automatizada.
- por retroalimentação com ação manual.

ESTUDO DE CASO**SISTEMA DE CONTROLE DE UM FORNO PRÉ-AQUECEDOR DE ÓLEO**

“Em uma refinaria, uma fornalha pré-aquece óleo cru que, em seguida, é fracionado (Figura 1.6). Dois engenheiros discutem a implantação de um sistema de controle para este forno.

Engenheiro de Controle (E.C.):

Quais são seus objetivos de operação?

Engenheiro de Processo (E.P.):

Nós gostaríamos de entregar óleo cru para a unidade de fracionamento à jusante a uma temperatura alvo consistente T^* . O valor deste set-point é usualmente determinado pelo tipo de óleo cru e pelo rendimento desejado da refinaria. Portanto, muda a cada 2-3 dias. Nós também temos um limite superior de restrição, T_m , sobre o quanto a temperatura dos tubos do forno pode alcançar.

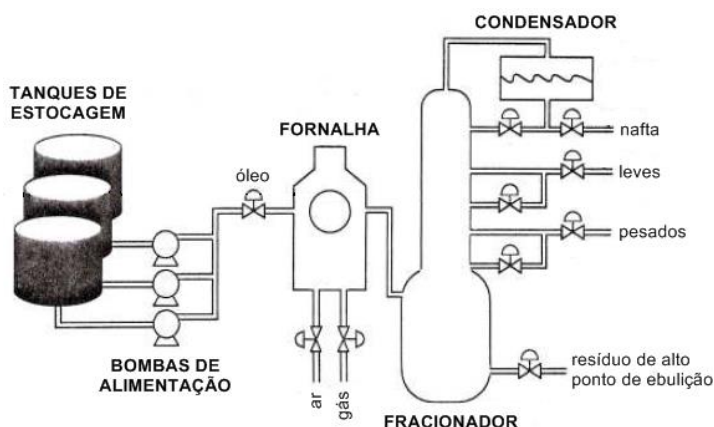


Figura 1.6 – Sistema de pré-aquecimento e fracionamento de óleo cru.

E.C.: Portanto, das suas duas saídas de processo, F e T , a primeira é estabelecida externamente pelo fracionador, enquanto a última é aquela que você está preocupado em controlar?

E.P.: Sim.

E.C.: Seu objetivo de controle é, portanto, regular a saída do processo, T , assim como lidar com o problema servo de mudanças de set-point a cada 2-3 dias?

E.P.: Sim.

E.C.: De suas variáveis de entrada, quais são aquelas sobre as quais você realmente tem controle?

- E.P.:** Apenas a vazão de ar, Q_A , e a vazão de gás combustível, Q_C , e mesmo assim nós usualmente pré-estabelecemos a vazão de ar e mudamos apenas a de gás quando necessário. Nossa principal variável de controle é a razão ar-combustível.
- E.C.:** As outras variáveis de entrada, a vazão de óleo cru, F_0 , e a temperatura de entrada, T_0 , são, portanto, perturbações?
- E.P.:** Sim.
- E.C.:** Há outras variáveis de processo de importância que eu deva conhecer?
- E.P.:** Sim. A pressão de fornecimento de gás combustível, P_C , e o calor latente, λ_C . Eles variam significativamente e nós não temos qualquer controle sobre estas variações.
- E.C.:** Quê tipo de instrumentação você tem para aquisição de dados e implementação da ação de controle?
- E.P.:** Nós temos termopares para medir T e T_0 , medidor de vazão para F e de pressão para P_C , e uma válvula de controle na linha de combustível. Nós temos um pirômetro óptico instalado para monitorar a temperatura do tubo da fornalha. Um alarme é acionado se a temperatura fica uns poucos graus próxima da restrição do limite superior.
- E.C.:** Você tem um modelo de processo disponível para esta fornalha?
- E.P.:** Não. Mas há um operador que entende do comportamento do processo muito bem. Nós temos tentado operar o processo sob controle manual usando este operador, mas os resultados não foram aceitáveis. Este registro (Figura 1.7) tirado de um registrador de temperatura é bastante representativo. Esta é a resposta para um aumento degrau na vazão de entrada F_0 .

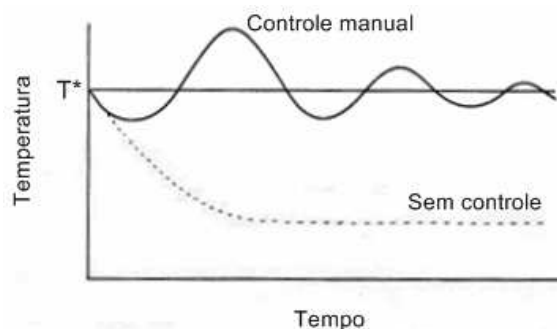


Figura 1.7 – Variação da temperatura com controle manual.

- E.C.:** Você tem uma ideia do que poderia ser responsável?
- E.P.:** Sim. Nós pensamos que tem a ver com as limitações humanas básicas; sua antecipação do efeito da perturbação na alimentação é engenhosa, mas imperfeita, e ele simplesmente não consegue reagir rápido o bastante à influência dos efeitos de perturbação adicional na pressão de fornecimento de combustível e no conteúdo energético.
- E.C.:** Então vamos começar com um sistema feedback simples (Figura 1.8 (a)). Vamos instalar um controlador de temperatura que usa medidas da saída da fornalha, T , para ajustar a vazão Q_C . Vamos usar um controlador PID com estes parâmetros para começar. Sinta-se livre para reajustar o controlador se necessário. Vamos discutir os resultados assim que estiverem prontos.
- Após a implantação do sistema feedback, os engenheiros voltam a se encontrar.
- E.P.:** O desempenho do sistema feedback, ainda que melhor que o do controle manual, não é aceitável. Muita alimentação a baixa temperatura é mandada para o fracionador durante as primeiras horas que se seguem a cada aumento de F .
- E.C.:** O que é preciso é um meio pelo qual nós possamos mudar a vazão de combustível no instante que detectarmos uma mudança na vazão de alimentação. Tente primeiramente esta

estratégia de controle feedforward (Figura 1.8 (b)) sozinha; aumente-a com o feedback apenas se achar necessário.

Dias depois das tentativas com os sistemas feedforward e feedforward combinado a feedback...

E.P.: Com a estratégia feedforward sozinha houve a vantagem de rapidamente compensar o efeito da perturbação, pelo menos inicialmente. O principal problema era a não disponibilidade da medida da temperatura de saída do forno para o controlador. Como resultado, nós tivemos offsets. Desde que nós não podemos aceitar estes erros persistentes, tivemos de ativar o sistema feedback. Como esperado a adição do sistema feedback (Figura 1.8 (c)) retificou este problema. Mas nós ainda temos um grande problema: a temperatura de saída da fornalha flutua, algumas vezes de forma inaceitável, sempre que nós observamos variações na pressão de chegada do gás combustível. Adicionalmente, estamos certos de que as variações no conteúdo energético do gás contribuem para estas flutuações, mas não temos uma maneira fácil de monitorá-las quantitativamente. Neste ponto, no entanto, elas não parecem ser tão significativas quanto às variações na pressão de fornecimento, P_C .

E.C.: Vamos focalizar no problema causado pelas variações na pressão de fornecimento de combustível. É fácil de ver porque isto deve ser um problema. O controlador pode apenas ajustar a válvula na linha de combustível; e embora nós esperemos que posições específicas da válvula devam corresponder a vazões específicas de combustível, isso só será verdade se a pressão de chegada for constante. Quaisquer flutuações na pressão de gás significam que o controlador não vai obter a vazão de combustível solicitada. Nós devemos instalar uma malha adicional para assegurar que o controlador de temperatura obtém a mudança de vazão verdadeira que ele solicita; uma simples mudança na posição da válvula não vai assegurar isso. Nós devemos instalar um controlador de pressão entre o controlador de temperatura e a válvula de controle da linha de combustível. A tarefa deste controlador interno será assegurar que a vazão de combustível solicitada pelo controlador de temperatura será realmente entregue à fornalha, independentemente de variações na pressão de fornecimento. A adição desse sistema de controle em cascata (Figura 1.8 (d)) deverá funcionar bem.

Com o sistema em cascata, associado ao controle feedforward, a temperatura de óleo cru na saída da fornalha foi mantida muito próxima do valor T^* em qualquer instante do processo. Entretanto, o operador que realizava o controle manual inicial foi devolvido ao mercado de trabalho."

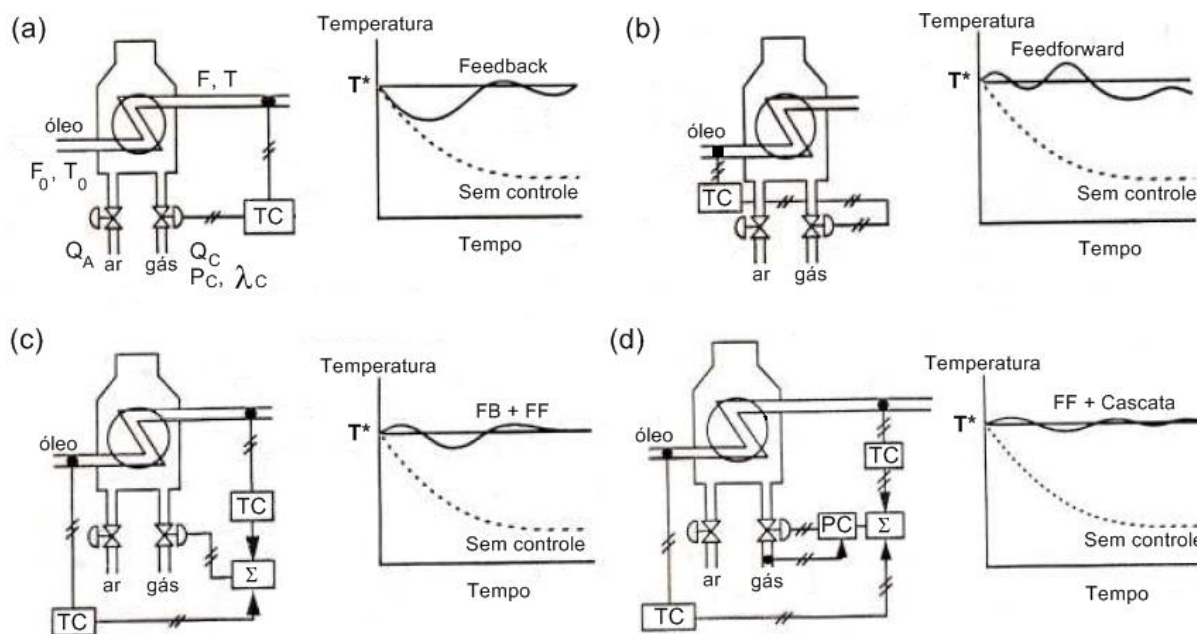


Figura 1.8 – Implantação do controle automático no forno. (a) Feedback; (b) feedforward; (c) FB + FF e (d) FF + Cascata.

1.4 AÇÕES DE CONTROLE

a) Proporcional – P

- A correção é **proporcional ao erro**;
- Aparecimento de um **erro persistente** (*offset*), isto é, a variável controlada não retorna ao seu set-point inicial;
- Equação característica dada por:

$$c(t) = K_c \varepsilon(t) + b,$$

em que:

$c(t)$ é o sinal de saída do controlador (correção)

$\varepsilon(t)$ é o erro (diferença entre o set-point e a variável medida)

b é o sinal de saída quando o erro é zero e

K_c é o **ganho proporcional** do controlador

- O ganho proporcional expressa a relação entre as variações dos sinais de saída e de entrada:

$$K_c = \frac{\Delta \text{saída}}{\Delta \text{entrada}}$$

- Para $\Delta \text{saída} = 100\%$, isto é, fechamento ou abertura total da válvula, $\Delta \text{entrada}$ é denominada banda (ou faixa) proporcional (BP):

$$K_c = \frac{100}{BP} \quad \leftrightarrow \quad BP = \frac{100}{K_c}$$

- Quanto maior o valor de K_c , menor é o offset e maior a oscilação (risco de instabilidade). A Figura 1.9 exemplifica este comportamento;
- Controladores de ação exclusivamente proporcional são os menos onerosos. Entretanto, o processo deve suportar os *offsets* intrínsecos deste tipo de ação de controle.

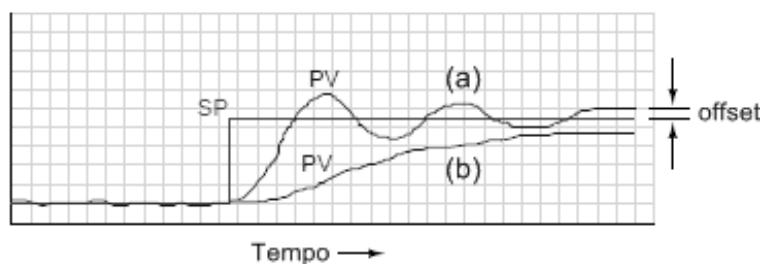


Figura 1.9 – Ação proporcional a uma entrada degrau. (a) K_c elevado e (b) K_c baixo.

b) Integral – I

- A correção depende do erro e do tempo que ele perdurar;
- Quanto maior o erro, maior a velocidade de correção;
- **Elimina offset**;
- Equação característica dada por:

$$c(t) = \frac{1}{\tau_i} \int_0^t \varepsilon(t) dt + b,$$

em que:

τ_i é o **tempo integral**

c) Derivativa – D

- A correção é proporcional à velocidade do erro;
- Quanto mais rápida a razão de mudança do desvio, maior será a correção;
- Não atua caso o erro seja constante;
- Pode amplificar ruídos (perturbações), exigindo a instalação de filtros;
- Equação característica dada por:

$$c(t) = \tau_d \frac{d\varepsilon}{dt} + b,$$

em que:

τ_d é o **tempo derivativo**

O Quadro 1.2 mostra as respostas das ações individuais e combinadas mais comuns em um sistema de malha aberta submetido a diferentes tipos de distúrbios (entradas).

Quadro 1.2 – Respostas de ações de controle em sistemas de malha aberta.

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

1.5 TIPOS DE CONTROLADORES

Os controladores mais comuns são o P, PI e PID. A Figura 1.10 ilustra a resposta destes tipos de controladores a uma dada perturbação, evidenciando o comportamento da variável controlada ao decorrer do tempo.

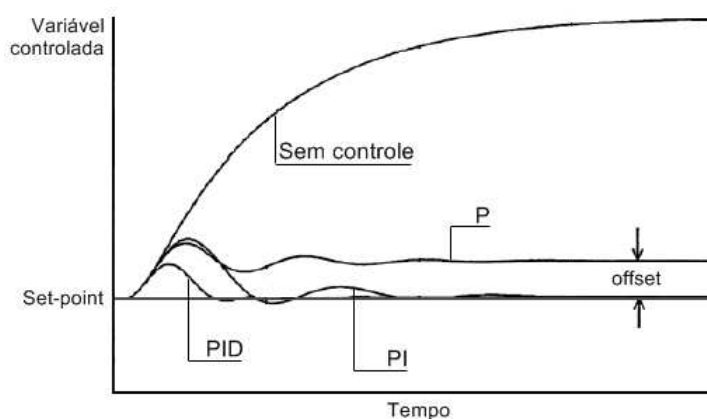


Figura 1.10 – Respostas de diferentes tipos de controladores (PERRY & GREEN, 2008).

Como visto, o controlador proporcional gera um *offset*, enquanto os demais eliminam este erro; e o controlador PID tem uma resposta mais rápida comparado ao PI. A Tabela 1.1 fornece uma direção na escolha do tipo de controlador, devendo ser levados em conta também outros aspectos na seleção (ex.: econômicos).

Tabela 1.1 – Guia para seleção preliminar do tipo de controlador.

Controlador	Variável Controlada				Processo permite		
	Fluxo	Nível	Pressão	Temperatura	Offset	Ruído*	Tempo morto**
P	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
PI	Sim	Sim	Sim	Sim	Não	Sim	Sim
PID	Não	Raro	Raro	Sim	Não	Não	Não

*Ruído: erros temporários (causados por vento forte, descargas atmosféricas etc.) que não refletem condições reais do processo.

**Tempo morto: intervalo entre a perturbação e a ação de controle.

EXERCÍCIO 1.10

(Petrobras) Considerando-se um sistema de controle que emprega um controlador do tipo PID, a(s) parcela(s)

- proporcional não afeta a dinâmica do sistema de controle.
- derivativa não influencia na amplificação de ruídos.
- integral não afeta no comportamento em regime permanente.
- proporcional e derivativa influenciam o amortecimento do sistema.
- proporcional e integral afetam apenas a estabilidade do sistema.

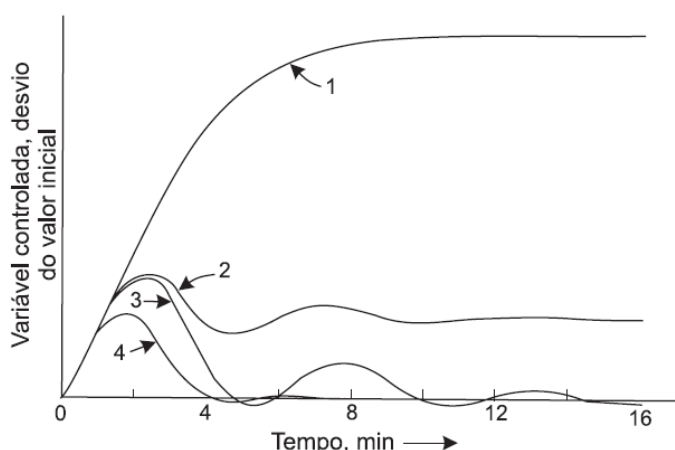
EXERCÍCIO 1.11

Associe corretamente.

- (1) Controle proporcional.
- (2) Controle integral.
- (3) Controle derivativo.
- () Tipo de controle que corrige o erro e elimina o offset.
- () Tipo de controle que produz uma saída incorreta na presença de ruídos.
- () Tipo de controle que pode deixar offset.

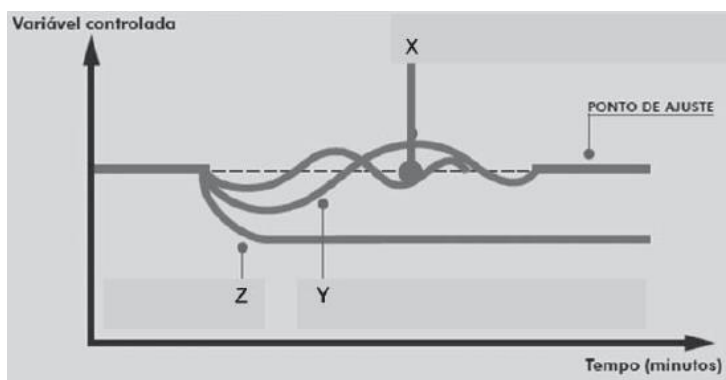
EXERCÍCIO 1.12

(Petrobras) O gráfico abaixo ilustra efeitos de diversos modos de controle.



Alguns deles representam corretamente a resposta de um sistema de controle proporcional-integral?

- Sim, o 1.
- Sim, o 2.
- Sim, o 3.
- Sim, o 4.
- Não, nenhum deles.

EXERCÍCIO 1.13

(Petrobras) O gráfico acima mostra comparativamente alguns modos de controle aplicados em ajustes de controladores de processo. Os modos de controle descritos em X, Y e Z são, respectivamente,

- proporcional, proporcional + integral, proporcional + integral + derivativo
- proporcional + derivativo, proporcional + integral + derivativo, proporcional
- proporcional + derivativo, proporcional + integral, proporcional
- proporcional + integral + derivativo, proporcional + derivativo, proporcional
- proporcional + integral + derivativo, proporcional + integral, proporcional

EXERCÍCIO 1.14

(Petrobras) No controle de processo, fazem-se necessários ajustes de modo a garantir a confiabilidade de valores e respostas. Vários conceitos são importantes, como sensibilidade, tempo morto e ganho. O ganho do sistema de controle

- é definido e fixado por tipo de controlador, variando de acordo com a aplicação do controlador.
- pode ser sempre usado para ajustar sinal de entrada e saída de um indicador.
- depende do operador do sistema, pois há a necessidade de ajuste no processo produtivo por parte dele.
- define a relação entre o sinal de saída e o sinal de entrada do controlador.
- garante que a variável de processo tenha seu valor sempre correto.

EXERCÍCIO 1.15

(Petrobras) O modo derivativo ideal de controladores com retroalimentação negativa

- não afeta o valor estacionário final do erro e age baseado na taxa de mudança de erro.
- não afeta o valor estacionário final do erro e é insensível a ruído na variável medida.
- age baseado na taxa de mudança do erro e é insensível a ruído na variável medida.
- elimina o erro estacionário final e age baseado no somatório do erro ao longo do tempo.
- reduz o erro estacionário final e age de forma reversa ao erro.

EXERCÍCIO 1.16

(Petrobras) Em relação ao tipo de ação de controle utilizado nas situações mais comuns, analise as afirmações a seguir.

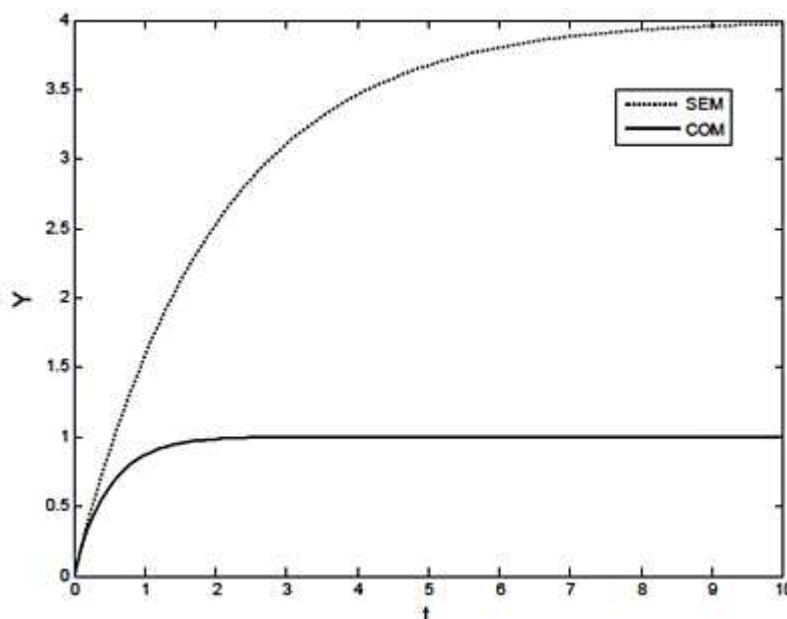
- A ação proporcional é essencial para o controle de nível.
- A ação integral é essencial para o controle da pressão de gás.
- A ação derivativa é essencial no controle de vazão.
- Tanto a ação proporcional quanto a derivativa são essenciais no controle da pressão de vapor.

Está correto APENAS o que se afirma em

- III.
- IV.
- I e II.
- I e IV.
- II e III.

EXERCÍCIO 1.17

(Sudene) Um dado processo, quando submetido a uma variação degrau em uma entrada do tipo perturbação ou distúrbio, exibe as curvas de resposta mostradas abaixo para o caso sem controle (curva tracejada) e com controle (curva cheia), tal que Y é a variável controlada em variáveis-desvio.



Admitindo que o set point não foi alterado, o valor absoluto do offset para o caso com controle é dado por

- a) 0. b) 1. c) 2. d) 3. e) 4.

EXERCÍCIO 1.18

(Eletrobras) Sejam os exemplos de controle de processos apresentados na tabela abaixo:

CASO	Variável Controlada	Características da Malha	Aceitação de offset
I.	vazão de líquido	sinal de medida apresenta ruído de alta frequência, devido à vibração da bomba	Sim
II.	nível de líquido	sinal de medida apresenta ruído, devido à turbulência do líquido que entra no tanque	Sim
III.	temperatura em estágio de coluna de destilação	presença de tempo morto na malha	Não
IV.	pressão em um vaso	pequeno tempo de resposta do processo	Não

Caso se preocupe em conciliar simplicidade (em termos de número de parâmetros de ajuste do controlador), desempenho e estabilidade em malha fechada, o controlador mais adequado para cada caso será:

- a) I. P; II. P; III. PID; IV. PI.
 b) I. P; II. PD; III. PID; IV. PID.
 c) I. PI; II. PD; III. P; IV. P.
 d) I. P; II. P; III. PI; IV. P.
 e) I. P; II. PID; III. PID; IV. PID.

EXERCÍCIO 1.19

(CEPS-UFPA) Um transmissor de temperatura com faixa de operação entre 0–100°C com sinal de saída de 4–20 mA tem uma tolerância de calibração especificada de $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Neste caso, a tolerância de saída, em mA, é de:

- a) 0,02 b) 0,01 c) 0,08 d) 0,1 e) 0,4

EXERCÍCIO 1.20

(Petrobras) Constatou-se que uma variável de processo em malha fechada apresentava elevadas sobrelevações (ou *overshoots*) em resposta a distúrbios ou mudanças no seu *set point*. Diagnosticou-se que a causa desse comportamento era a sintonia inadequada do controlador, que era um PI, com função de transferência dada por $G_C(s) = K_C (1 + 1/\tau_I s)$, tal que K_C é o ganho do controlador (adimensional) e τ_I é o tempo integral (com unidade de tempo). Dentre as alterações de sintonia apresentadas abaixo, a resposta em malha fechada com o PI se tornará menos oscilatória devido a:

- diminuição de K_C e de τ_I .
- diminuição de K_C e aumento de τ_I .
- aumento de K_C , mantendo-se τ_I fixo.
- aumento de K_C e de τ_I .
- aumento de K_C e diminuição de τ_I .

EXERCÍCIO 1.21

ENTRADAS AÇÕES DE CONTROLE	K	L	M	N
Proporcional				
Integral				
Derivativo				
Proporcional + Integral				
Proporcional + Derivativo				
Proporcional + Integral + Derivativo				

(Petrobras) O quadro acima mostra como são os modos de operação dos diversos tipos de controle. Em cada coluna, observa-se como a ação de cada tipo de controle pode atuar. Os modos K, L, M e N são, respectivamente,

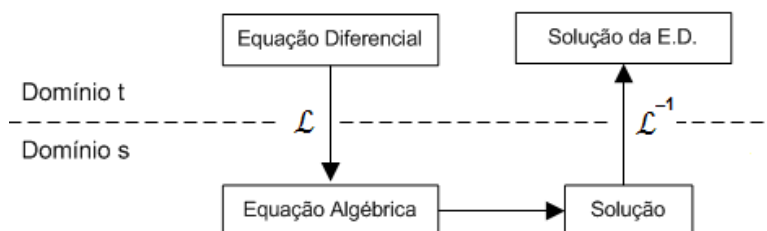
- rampa, pulso, degrau e senoidal.
- rampa, senoidal, degrau e pulso.
- degrau, pulso, rampa e senoidal.
- degrau, senoidal, rampa e pulso.
- degrau, rampa, pulso e senoidal.

2. TRANSFORMADA DE LAPLACE

Seja uma função $f(t)$ no domínio da variável real t . A transformada de Laplace de $f(t)$ é uma função $F(s)$ (domínio da variável complexa s ou domínio de Laplace) definida pela integral:

$$\mathcal{L}\{f(t)\} \equiv F(s) = \int_0^{+\infty} e^{-st} f(t) dt$$

A transformada de Laplace é utilizada para transformar **equações diferenciais lineares** com coeficientes constantes em **equações algébricas** (de mais fácil resolução). Esquematicamente:



A transformação de $F(s)$ em $f(t)$ é chamada transformada inversa de Laplace ($\mathcal{L}^{-1}$), dada por:

$$\mathcal{L}^{-1}\{F(s)\} \equiv f(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{c-i\infty}^{c+i\infty} e^{st} F(s) ds$$

EXERCÍCIO 2.1 A partir da definição, obtenha a transformada de Laplace da função $f(t) = a$.

EXERCÍCIO 2.2 A partir da definição, obtenha a transformada de Laplace da função $g(t) = e^{-at}$.

A tabela 2 relaciona algumas funções e as respectivas transformadas de Laplace.

Tabela 2 – Exemplos de transformadas de Laplace usuais.

$f(t)$	$\mathcal{L}\{f(t)\} \equiv F(s)$
A	$\frac{A}{s}$
e^{-at}	$\frac{1}{s+a}$
$\frac{1}{a}e^{-t/a}$	$\frac{1}{as+1}$
$\frac{1}{b-a}(e^{-at} - e^{-bt})$	$\frac{1}{(s+a)(s+b)}$
$\left(\frac{c-a}{b-a}\right)e^{-at} + \left(\frac{c-b}{a-b}\right)e^{-bt}$	$\frac{s+c}{(s+a)(s+b)}$
t	$\frac{1}{s^2}$
t^n	$\frac{n!}{s^{n+1}}$
$\frac{df(t)}{dt}$	$sF(s) - f(0)$

(continua)

Tabela 2 – Exemplos de transformadas de Laplace usuais (continuação).

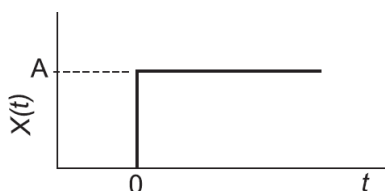
$f(t)$	$\mathcal{L}\{f(t)\} \equiv F(s)$
$\frac{d^2 f(t)}{dt^2}$	$s^2 F(s) - s f(0) - f'(0)$
$\int_0^t f(\tau) d\tau$	$\frac{1}{s} F(s)$
$\text{sen}(\omega t)$	$\frac{\omega}{s^2 + \omega^2}$
$\cos(\omega t)$	$\frac{s}{s^2 + \omega^2}$
$e^{-at} \text{sen}(\omega t)$	$\frac{\omega}{(s + a)^2 + \omega^2}$
$e^{-at} \cos(\omega t)$	$\frac{s + a}{(s + a)^2 + \omega^2}$

EXERCÍCIO 2.3

Determine a transformada de Laplace da função $z(t) = 5 + 8t^3 - e^{-t}$.

EXERCÍCIO 2.4

(Petrobras) Observe a representação gráfica abaixo.



Assinale a opção que descreve a transformada da função mostrada.

- a) $X(s) = A\omega / (s^2 + \omega^2)$ b) $X(s) = A$ c) $X(s) = A / (\tau s + 1)$
d) $X(s) = A / s$ e) $X(s) = 1$

EXERCÍCIO 2.5

(MAYA & LEONARDI) Empregando o método da decomposição em frações parciais, obtenha a transformada inversa de Laplace da função:

$$F(s) = \frac{2s + 1}{s^2 + 3s + 2}$$

EXERCÍCIO 2.6

(SEBORG, EDGARD & MELLICHAMP) Resolva a equação diferencial:

$$5 \frac{dy}{dt} + 4y = 2 \quad y(0) = 1$$

EXERCÍCIO 2.7

As equações de velocidade para uma reação do tipo $A \rightarrow P$, ordem zero e em fase gasosa, são (em termos de conversão do reagente A):

$$-r_A = \frac{C_{A0}}{1 + \varepsilon_A X_A} \frac{dX_A}{dt} \quad \text{e} \quad -r_A = k$$

Deduza a equação cinética que relaciona tempo e conversão de A.

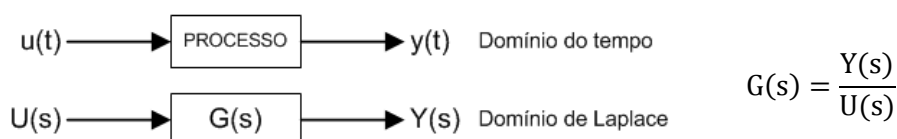
EXERCÍCIO 2.8

Resolva os seguintes problemas de balanço material em regime transiente:

- a) Qual o tempo necessário, em horas, para se esvaziar um tanque com nível inicial de 5 m e área da seção transversal de 4 m² sabendo-se que as vazões volumétricas de carga e descarga são, respectivamente, 2 m³/h e 6 m³/h?
- b) Calcule a concentração de sal no interior de um tanque de 10 m³ após 3h sabendo-se que o mesmo é alimentado com água isenta de sal à taxa de 10 m³/h e tem concentração inicial de 20 kg/m³.

3. FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA

A função de transferência, $G(s)$, é definida como a razão entre a transformada de Laplace da variável de saída, $Y(s)$, e a transformada de Laplace da variável de entrada, $U(s)$.



3.1 SISTEMAS DINÂMICOS DE PRIMEIRA ORDEM

Seja a equação diferencial linear de um sistema dinâmico de 1ª ordem:

$$a_0 \frac{dy(t)}{dt} + a_1 y(t) = a_2 u(t), \quad a_0, a_1 \text{ e } a_2 \text{ constantes}$$

A função de transferência deste sistema é definida por:

$$G(s) = \frac{\mathcal{L}\{y(t)\}}{\mathcal{L}\{u(t)\}} = \frac{Y(s)}{U(s)}$$

Neste caso particular, teremos:

$$\mathcal{L}\left\{a_0 \frac{dy(t)}{dt} + a_1 y(t)\right\} = \mathcal{L}\{a_2 u(t)\} \quad (3.1)$$

$$a_0 [s Y(s) - y(0)] + a_1 Y(s) = a_2 U(s) \quad (3.2)$$

$$a_0 s Y(s) + a_1 Y(s) = a_2 U(s) \quad (3.3)$$

$$\frac{a_0}{a_1} s Y(s) + Y(s) = \frac{a_2}{a_1} U(s) \quad (3.4)$$

$$\left(\frac{a_0}{a_1} s + 1\right) Y(s) = \frac{a_2}{a_1} U(s) \quad (3.5)$$

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\frac{a_2}{a_1}}{\left(\frac{a_0}{a_1} s + 1\right)} \quad (3.6)$$

Substituindo-se os termos constantes

$$\frac{a_2}{a_1} = K_p \text{ e } \frac{a_0}{a_1} = \tau_p \quad (3.7)$$

Chega-se a:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_p}{\tau_p s + 1} \quad (3.8)$$

A equação 3.8 é a função de transferência para sistemas dinâmicos de 1ª ordem, sendo:

K_p o ganho estático do sistema e

τ_p a constante de tempo do sistema.

3.1.1 RESPOSTA DE UM SISTEMA DE 1ª ORDEM A UMA ENTRADA DEGRAU

Perturbação do tipo degrau: $U(s) = \frac{A}{s}$

Função de transferência (sistema de 1ª ordem): $\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_p}{\tau_p s + 1} \rightarrow Y(s) = \frac{K_p}{\tau_p s + 1} \cdot \frac{A}{s}$

Transformada inversa da saída pelo método da decomposição em frações parciais:

$$Y(s) = \frac{K_p}{\tau_p s + 1} \cdot \frac{A}{s} = \frac{a}{\tau_p s + 1} + \frac{b}{s} \quad (3.9)$$

$$\frac{K_p A}{(\tau_p s + 1)s} = \frac{a s + b (\tau_p s + 1)}{(\tau_p s + 1)s} \rightarrow K_p A = (a + b \tau_p) s + b \quad (3.10)$$

Termo independente de s: $b = K_p A$ (3.11)

Termo em s: $a + b \tau_p = 0 \Rightarrow a = -K_p A \tau_p$ (3.12)

Substituindo os valores das constantes a (3.12) e b (3.11) na eq. 3.9, resulta:

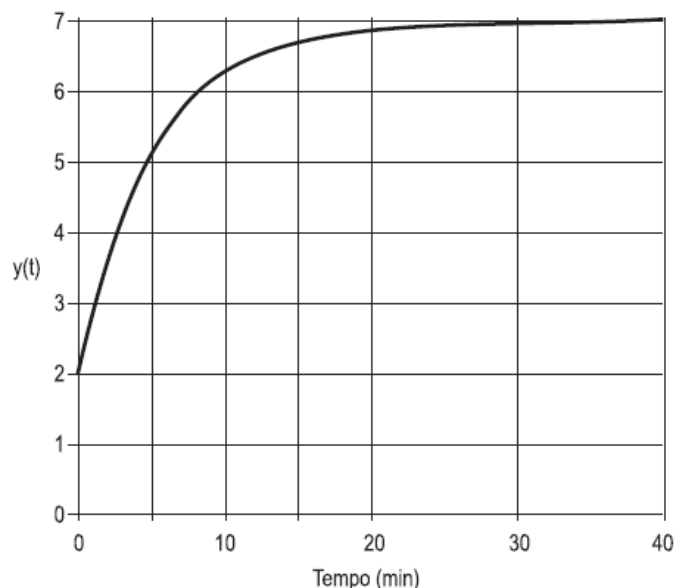
$$Y(s) = \frac{-K_p A \tau_p}{\tau_p s + 1} + \frac{K_p A}{s} \quad (3.13)$$

Com auxílio da tabela de transformadas de Laplace (tabela 2), chega-se a $y(t)$:

$$y(t) = -K_p A \tau_p \left(\frac{1}{\tau_p} e^{-t/\tau_p} \right) + K_p A = K_p A - K_p A e^{-t/\tau_p}$$

$$y(t) = K_p A (1 - e^{-t/\tau_p}) \quad (3.14)$$

EXERCÍCIO 3.1



(Petrobras) A figura acima representa a resposta da variável de saída $y(t)$ a uma perturbação degrau de magnitude de 2 unidades na variável de entrada de um processo, a partir de um instante em que o processo estava em regime permanente. Com base nessas informações, a função de transferência desse processo é

- | | | |
|-----------------|------------------|------------------|
| a) $2,5/(2s+1)$ | c) $2,5/(30s+1)$ | e) $3,0/(30s+1)$ |
| b) $2,5/(5s+1)$ | d) $3,0/(5s+1)$ | |

EXERCÍCIO 3.2

Sejam $G_1(s)$, $G_2(s)$ e $G_3(s)$ as funções de transferência dos sistemas de primeira ordem 1, 2 e 3, respectivamente.

$$G_1(s) = \frac{5}{s + 10} \quad G_2(s) = \frac{0,5}{0,2s + 1} \quad G_3(s) = \frac{20}{2s + 20}$$

Determine:

- o ganho estático e a constante de tempo de cada sistema;
- o valor final no estado estacionário após uma perturbação degrau unitária para cada sistema;
- os gráficos da resposta y em função de t .

EXERCÍCIO 3.3

(Petrobras) Um processo apresenta uma função de transferência de 1ª ordem entre sua saída $Y(s)$ e sua entrada $U(s)$, expressas em variáveis desvio. Admitindo-se que uma perturbação do tipo degrau unitário foi aplicada em U , em $t = 0$, a constante de tempo τ_p pode ser obtida pelo intervalo de tempo decorrido entre $t = 0$ e um valor definido de tempo posterior. Esse tempo posterior corresponde ao momento para o qual a saída $Y(t)$

- começou a responder.
- sofreu aproximadamente 63% da variação total até o estacionário final.
- sofreu aproximadamente 87% da variação total até o estacionário final.
- sofreu aproximadamente 99% da variação total até o estacionário final.
- alcançou $\pm 5\%$ do seu estacionário final e nele permaneceu.

EXERCÍCIO 3.4

Um termômetro de mercúrio cujo bulbo possui formato aproximadamente cilíndrico de diâmetro 4,0 mm e comprimento 12,0 mm efetua medições da temperatura de uma corrente de retorno de água de resfriamento a 30°C (regime estacionário). Subitamente, a temperatura da água se eleva a 35°C. Desenvolva a função de transferência do termômetro e estime o tempo que leva, em segundos, para que seja registrada a nova leitura.

Dados: densidade do mercúrio = 13600 kg/m³
calor específico do mercúrio = 0,033 kcal/kg
coeficiente de película da água = 2000 kcal/h.m².°C

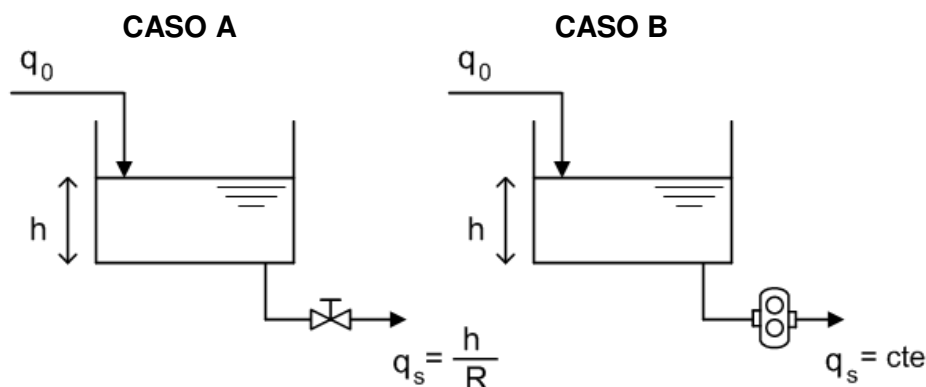
EXERCÍCIO 3.5

Um tanque de seção transversal constante sofre uma alteração na sua vazão de alimentação do tipo degrau, passando de 1 m³/s para 1,5 m³/s. O diâmetro e a altura do tanque são, respectivamente, 6 m e 10 m. No regime estacionário, isto é, antes da perturbação, o nível do tanque era de 6 m. Considere que a densidade do fluido no tanque seja constante. Estude o comportamento dinâmico deste sistema para os seguintes casos:

CASO A – A vazão de saída é diretamente proporcional ao nível do tanque.

CASO B – A descarga do tanque é feita por uma bomba (vazão constante).

Apresente as funções de transferência, o nível no novo estacionário e, caso ocorra, o tempo de transbordamento.



EXERCÍCIO 3.6

Um tanque sofre uma alteração na sua vazão de entrada do tipo degrau, passando de 10 m³/h para 15 m³/h. A área da seção transversal do tanque é 0,7 m². Sabendo-se que a altura do nível de líquido no tanque antes do distúrbio era de 4 m e que, para este sistema, a vazão de saída é diretamente proporcional à raiz quadrada do nível, determine:

- a expressão que relaciona a vazão de saída com o nível de líquido;
- a função de transferência do sistema;
- o nível do tanque ao se atingir o novo estado estacionário;
- para uma altura nominal do tanque igual a 7 m, ocorre transbordamento? Em caso positivo, em qual instante?

Expansão de $f(x)$ por séries de Taylor em torno de x_0 :

$$f(x) \cong f(x_0) + f'(x_0)(x - x_0) + \frac{f''(x_0)(x - x_0)^2}{2!} + \frac{f'''(x_0)(x - x_0)^3}{3!} + \dots$$

EXERCÍCIO 3.7

O tanque pulmão de um reator químico (figura 3.1) recebe 5 m³/min de uma solução contendo, em média, 150 g/m³ de determinado sal. A concentração de entrada oscila de forma senoidal, com amplitude de 50 g/m³ e período de 5 minutos. Pede-se:

- Calcule o volume útil do tanque pulmão de modo que a concentração de sal à entrada do reator não ultrapasse 160 g/m³.
- Esboce os gráficos das concentrações de entrada e de saída do tanque pulmão em função do tempo.
- Qual o atraso (lag) relativo entre as curvas do item anterior?

Dada a decomposição:

$$C(s) = \frac{a}{\tau_p s + 1} + \frac{b s + c}{s^2 + \omega^2}$$

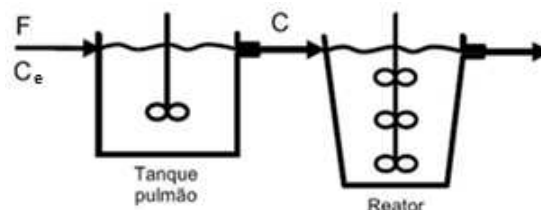


Figura 3.1 – Representação do problema 3.7.

EXERCÍCIO 3.8

Empregando as funções dos tipos de ações de controle apresentadas no Capítulo 1 e com auxílio da tabela de transformadas de Laplace, estabeleça a função de transferência $G_C(s) = C(s)/E(s)$ para um controlador do tipo PID.

EXERCÍCIO 3.9

(Termoaçu) Qual das funções de transferência representa um sistema de primeira ordem?

- $X(s) = 1/s$
- $H(s)/Q(s) = R_1/(\tau s + 1)$
- $Y(s)/X(s) = 1/(\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s + 1)$
- $H(s)/X(s) = 1/(\tau s + 1)^n$
- $H(s)/Q(s) = [1/(\tau_1 s + 1)][R_2/(\tau_2 s + 1)]$

EXERCÍCIO 3.10

(BR Distribuidora) A equação diferencial a seguir (equação 1) representa o comportamento dinâmico de um sistema.

$$T \frac{dc(t)}{dt} + c(t) = \frac{R}{A} u(t), \quad c(0) = 0 \quad (\text{equação 1})$$

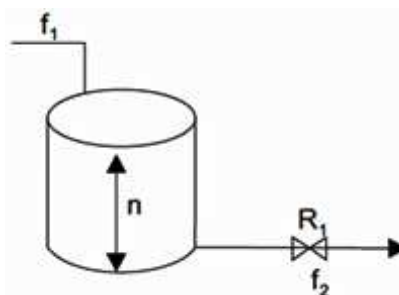
Onde: T é a constante de tempo;
 $u(t)$ é uma função degrau de entrada;
 R e A são constantes.

A equação que representa a resposta $c(t)$ na saída é

- $1 - (R/A) \cdot e^{t/T}$
- $(A/R) \cdot (1 - e^{t/T})$
- $(R/A) \cdot (1 - e^{t/T})$
- $(R/A) \cdot (1 - e^{-t/T})$
- $(R/A) \cdot (1 - e^{-T/t})$

EXERCÍCIO 3.11

(BR Distribuidora) Um tanque com área transversal $A(\text{m}^2)$, que é alimentado pelo topo por uma corrente f_1 (m^3/h), tem uma corrente de saída f_2 (m^3/h), pelo fundo. Na tubulação de descarga, foi colocada uma válvula que tem uma resistência $R = n/f_2$, onde $n(\text{m})$ corresponde ao nível de líquido no tanque.



Com base nas informações, é correto afirmar que o(a)

- a) nível de líquido no tanque é dado pela função $n(t) = R_1 \cdot f_1 (1 - e^{-t/\tau})$.
- b) nível de líquido no tanque é dado pela função $n(t) = R_1 \cdot f_1 \cdot e^{-t/\tau}$.
- c) função de transferência do processo é $N(s)/F_1(s) = R_1 / (Ts + 1)$.
- d) função de transferência do processo é $F_2(s)/F_1(s) = R_1 / (Ts + 1)$.
- e) função de transferência do elemento de atraso de 1ª ordem é $1 / AS$.

(Transpetro) Considere o enunciado a seguir para responder aos exercícios 3.12, 3.13 e 3.14.

A função de transferência no domínio de Laplace de um sistema linear é:

$$\frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{K}{\tau s + 1}$$

onde $Y(s)$ é a variável de saída e $R(s)$, a variável de entrada. Nos três itens a seguir, considere as condições iniciais NULAS.

EXERCÍCIO 3.12

O valor da resposta em regime permanente desse sistema para uma entrada do tipo degrau unitário é:

- a) K
- b) τ
- c) $1/\tau$
- d) K/τ
- e) τ/K

EXERCÍCIO 3.13

Para uma entrada degrau unitário, a saída desse sistema atinge a condição de regime permanente num tempo aproximadamente igual a:

- a) 2τ
- b) 5τ
- c) 20τ
- d) $2K$
- e) $5K$

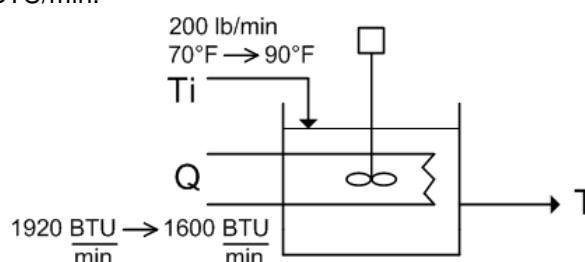
EXERCÍCIO 3.14

O valor inicial, em $t = 0$, do sinal de saída desse sistema, quando se aplica um impulso unitário na entrada é:

- a) K/τ
- b) τ/K
- c) $1/K$
- d) τK
- e) τ

EXERCÍCIO 3.15

(SEBORG, EDGARD & MELLICHAMP) Em dado processo, um tanque de aquecimento perfeitamente agitado é alimentado com 200 lb/min de um fluido frio ($\rho = 62,4 \text{ lb/ft}^3$; $c_p = 0,32 \text{ BTU/lb} \cdot ^\circ\text{F}$). O volume útil do tanque é de $1,6 \text{ ft}^3$. No regime estacionário, a temperatura de alimentação T_i e a taxa de calor Q , que é fornecida através de uma serpentina de vapor, são, respectivamente, 70°F e 1920 BTU/min .



Pede-se:

- (a) A temperatura de saída T do fluido no regime estacionário.
- (b) As funções de transferência que relacionam as variáveis Q, T_i e T.
- (c) A nova temperatura de saída do tanque quando a temperatura de entrada é repentinamente elevada à 90°F e a taxa de calor reduzida à 1600 BTU/min.

3.2 SISTEMAS DINÂMICOS DE SEGUNDA ORDEM

Seja a equação diferencial linear de um sistema dinâmico de 2ª ordem:

$$a_0 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_2 y(t) = a_3 u(t), \quad a_0, a_1, a_2 \text{ e } a_3 \text{ constantes}$$

A função de transferência deste sistema pode ser obtida da seguinte forma:

$$\mathcal{L} \left\{ a_0 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + a_1 \frac{dy(t)}{dt} + a_2 y(t) \right\} = \mathcal{L} \{ a_3 u(t) \} \quad (3.15)$$

$$a_0 [s^2 Y(s) - y(0) - y'(0)] + a_1 [s Y(s) - y(0)] + a_2 Y(s) = a_3 U(s) \quad (3.16)$$

$$a_0 s^2 Y(s) + a_1 s Y(s) + a_2 Y(s) = a_3 U(s) \quad (3.17)$$

$$\frac{a_0}{a_2} s^2 Y(s) + \frac{a_1}{a_2} s Y(s) + Y(s) = \frac{a_3}{a_2} U(s) \quad (3.18)$$

$$\left(\frac{a_0}{a_2} s^2 + \frac{a_1}{a_2} s + 1 \right) Y(s) = \frac{a_3}{a_2} U(s) \quad (3.19)$$

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\frac{a_3}{a_2}}{\left(\frac{a_0}{a_2} s^2 + \frac{a_1}{a_2} s + 1 \right)} \quad (3.20)$$

Substituindo-se os termos constantes

$$\frac{a_3}{a_2} = K_p, \quad \frac{a_0}{a_2} = \tau^2 \quad \text{e} \quad \frac{a_1}{a_2} = 2 \zeta \tau \quad (3.21)$$

Chega-se a:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_p}{\tau^2 s^2 + 2 \zeta \tau s + 1} \quad (3.22)$$

A equação 3.22 é a função de transferência para sistemas dinâmicos de 2ª ordem, sendo:

- K_p o ganho generalizado de frequência zero;
- ζ o grau de amortecimento (lê-se “zeta”) e
- τ a constante de tempo do sistema.

Para sistemas deste tipo, são definidos ainda:

- ω_n frequência natural do sistema, dada por: $\omega_n = 1/\tau$, e
- α coeficiente de amortecimento, dado por: $\alpha = \zeta \cdot \omega_n$.

A partir destes novos conceitos, pode-se reescrever a equação 3.22 em função das variáveis ω_n e α :

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_p \omega_n^2}{s^2 + 2 \alpha s + \omega_n^2} \quad (3.23)$$

3.2.1 CLASSIFICAÇÃO DE SISTEMAS DE 2ª ORDEM

Os sistemas de segunda ordem são usualmente classificados em função do valor do grau de amortecimento ζ , que reflete o comportamento típico da resposta. A figura 3.2 apresenta a resposta dinâmica de um sistema de 2ª ordem à uma perturbação do tipo degrau para diferentes valores de ζ .

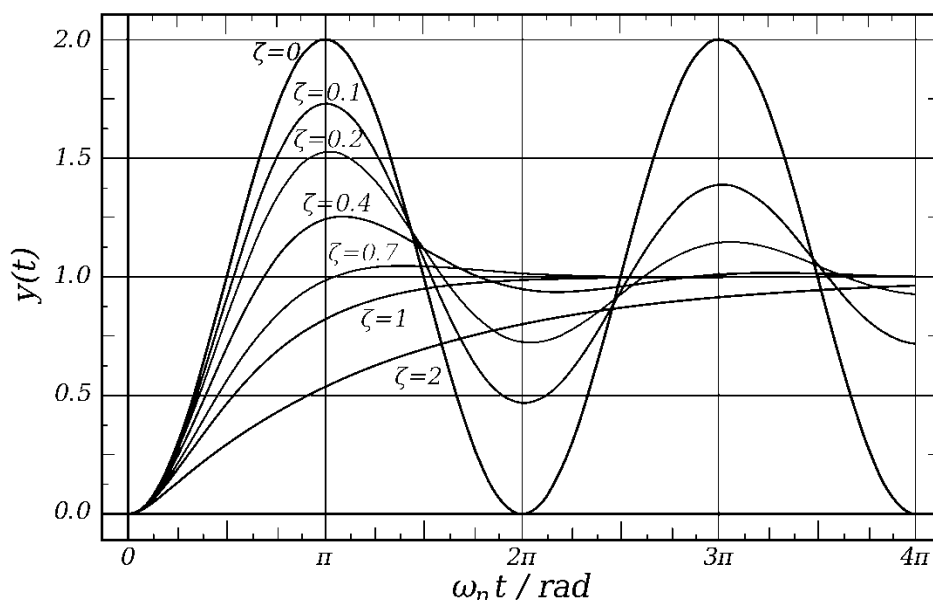


Figura 3.2 – Respostas de um sistema de 2ª ordem ao degrau para diferentes graus de amortecimento (OGATA, 2010).

O sistema pode ser classificado em:

- **Superamortecido**, para $\zeta > 1$. Quanto maior o valor de ζ , maior o tempo de resposta, isto é, a demora a se atingir o valor final.
- **Criticamente amortecido**, para $\zeta = 1$. É a resposta mais rápida sem “overshoot”, ou seja, exceder o valor final.
- **Subamortecido**, para $0 < \zeta < 1$. Ocorrem oscilações, mas o sistema ainda é estável.

Para $\zeta \leq 0$, o sistema torna-se instável, isto é, a resposta não atinge valor final estacionário.

3.2.2 RESPOSTA DE UM SISTEMA DE 2ª ORDEM A UMA ENTRADA DEGRAU

As definições construídas em cima da resposta de sistemas de 2ª ordem à perturbação degrau servem como base para análise do desempenho de sistemas de controle, especialmente quando são disponíveis **respostas gráficas**. Estes conceitos podem ser ainda extrapolados com boa aproximação para **sistemas de ordem superior à segunda**.

Analiticamente, a função do sinal de saída $y(t)$, com $0 < \zeta < 1$, pode ser obtida como segue:

Perturbação do tipo degrau: $U(s) = \frac{A}{s}$

Função de transferência (sistema de 2ª ordem): $\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_p \omega_n^2}{s^2 + 2\alpha s + \omega_n^2}$

$$Y(s) = \frac{K_p \omega_n^2}{s^2 + 2\alpha s + \omega_n^2} \cdot \frac{A}{s} \quad (3.24)$$

Definindo-se:

$$\omega_d^2 = \omega_n^2 - \alpha^2 \quad (3.25)$$

A eq.3.24 pode ser reescrita na forma:

$$Y(s) = \frac{K_p A \omega_n^2}{s [(s + \alpha)^2 + \omega_d^2]} \quad (3.26)$$

Transformada inversa da saída pelo método da decomposição em frações parciais:

$$Y(s) = \frac{K_p A \omega_n^2}{s[(s + \alpha)^2 + \omega_d^2]} = \frac{a}{s} + \frac{bs + c}{(s + \alpha)^2 + \omega_d^2} = \frac{a(s^2 + 2\alpha s + \alpha^2) + bs^2 + cs}{s[(s + \alpha)^2 + \omega_d^2]} \quad (3.27)$$

$$\text{Identificando numeradores: } K_p A \omega_n^2 = (a + b)s^2 + (2\alpha a + c)s + a(\alpha^2 + \omega_d^2) \quad (3.28)$$

$$\text{Termo independente de } s: \quad a(\alpha^2 + \omega_d^2) = K_p A \omega_n^2 \Rightarrow a = \frac{K_p A \omega_n^2}{\alpha^2 + \omega_d^2} = K_p A \quad (3.29)$$

$$\text{Termo em } s: \quad 2\alpha a + c = 0 \Rightarrow c = -2\alpha K_p A \quad (3.30)$$

$$\text{Termo em } s^2: \quad a + b = 0 \Rightarrow b = -K_p A \quad (3.31)$$

Substituindo os coeficientes calculados na equação 3.27:

$$Y(s) = \frac{K_p A}{s} - \frac{K_p A s + 2\alpha K_p A}{(s + \alpha)^2 + \omega_d^2} = K_p A \left[\frac{1}{s} - \frac{s + \alpha}{(s + \alpha)^2 + \omega_d^2} - \frac{\alpha}{(s + \alpha)^2 + \omega_d^2} \right] \quad (3.32)$$

$$\text{Definição de coeficiente de amortecimento: } \alpha = \zeta \cdot \omega_n \Rightarrow \omega_n = \frac{\alpha}{\zeta} \quad (3.33)$$

$$\begin{aligned} \text{Subst. (3.33) em (3.25): } \omega_d^2 &= \left(\frac{\alpha}{\zeta}\right)^2 - \alpha^2 = \alpha^2 \left(\frac{1}{\zeta^2} - 1\right) = \alpha^2 \left(\frac{1 - \zeta^2}{\zeta^2}\right) \\ \alpha &= \frac{\omega_d}{\sqrt{\frac{1 - \zeta^2}{\zeta^2}}} = \frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \omega_d \end{aligned} \quad (3.34)$$

$$\text{Subst. (3.34) em (3.32): } Y(s) = K_p A \left[\frac{1}{s} - \frac{s + \alpha}{(s + \alpha)^2 + \omega_d^2} - \frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \cdot \frac{\omega_d}{(s + \alpha)^2 + \omega_d^2} \right] \quad (3.35)$$

Com auxílio da tabela de transformadas de Laplace (tabela 2), chega-se a $y(t)$:

$$y(t) = K_p A \left\{ 1 - e^{-\alpha t} \left[\cos(\omega_d t) + \frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin(\omega_d t) \right] \right\} \quad (3.36)$$

$$\text{Por definição: } \omega_n = \frac{1}{\tau} \Rightarrow \alpha = \frac{\zeta}{\tau} \quad \text{e} \quad \omega_d = \alpha \cdot \frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta} = \frac{\zeta}{\tau} \cdot \frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta} = \frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\tau} \quad (3.37)$$

Subst. (3.37) em (3.36), chega-se enfim a:

$$y(t) = K_p A \left\{ 1 - e^{-(\zeta/\tau)t} \left[\cos\left(\frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\tau} t\right) + \frac{\zeta}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin\left(\frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\tau} t\right) \right] \right\} \quad (3.38)$$

Graficamente, a função $y(t)$ está representada na figura 3.3.

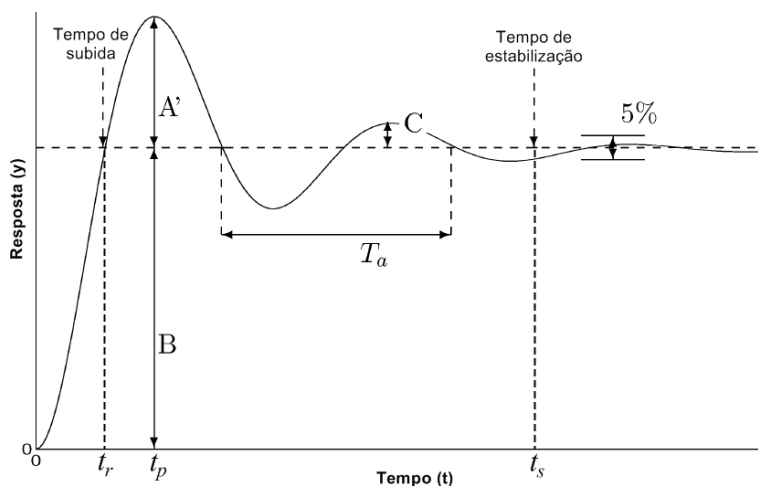


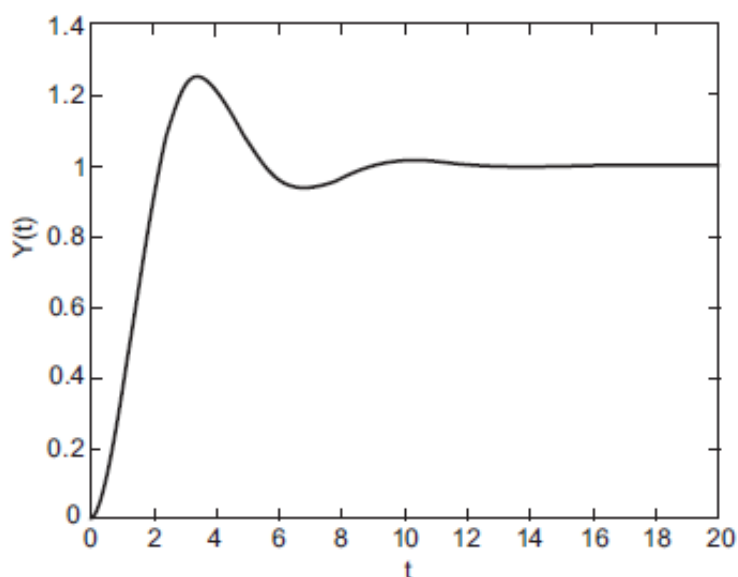
Figura 3.3 – Conceitos estabelecidos sobre a resposta ao degrau de sistemas de 2ª ordem subamortecidos.

Da figura 3.3, são definidos os termos:

- **Overshoot:** sobrelevação do sistema, $OS = A'/B = \exp(-\pi \zeta / \sqrt{1 - \zeta^2})$;
- **Razão de declínio:** decay ratio, $DR = C/A' = (\text{overshoot})^2$;
- **Período real de oscilação:** intervalo de tempo decorrido entre dois picos (T_d) ;
- **Tempo de subida:** tempo decorrido para a resposta atingir pela primeira vez o valor final (t_r). Também costuma ser definido como tempo para a resposta ir de 10% a 90% do valor final. Neste caso, pode ser estimado por: $t_r = 0,25 \tau$;
- **Tempo de estabilização:** tempo decorrido para a resposta permanecer em um intervalo de $\pm 5\%$ (também adota-se $\pm 2\%$) do valor final (t_s). Pode ser estimado por: $t_s = 3 \tau / \zeta$;
- **Tempo para atingir o primeiro pico:** pode ser calculado por: $t_p = \pi \tau / \sqrt{1 - \zeta^2}$.

EXERCÍCIO 3.16

(Petrobras) Quando submetido a um degrau unitário, em $t = 0$, na sua entrada $U(t)$, um dado sistema apresentou a resposta $Y(t)$ mostrada na figura abaixo.



Se esse sistema apresenta a função de transferência $\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{2}{s^2 + 2\zeta s + 1}$, conclui-se que, com base na resposta exibida ao degrau, que

- a) $\zeta < 0$ b) $\zeta = 0$ c) $0 < \zeta < 1$ d) $\zeta = 1$ e) $\zeta > 1$

EXERCÍCIO 3.17

(CEPS-UFBA) Considere um sistema cuja resposta $y(t)$ à excitação tipo degrau unitário é descrita pela curva de resposta mostrada na Figura 1.

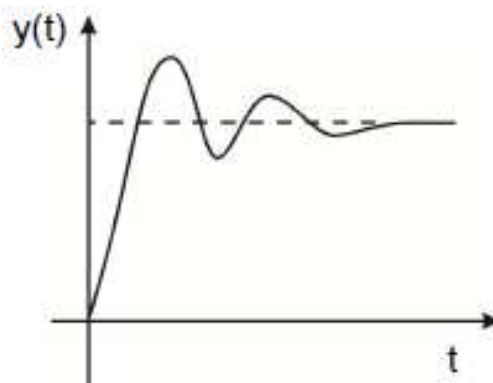
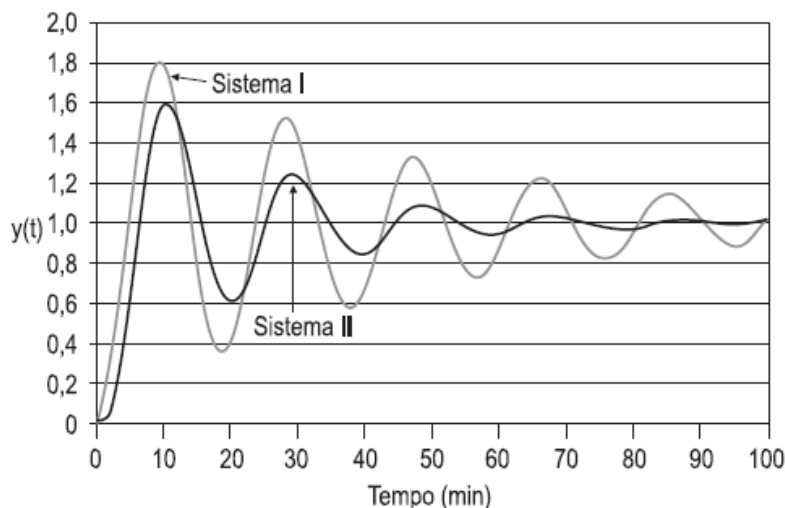


Figura 1 – Curva resposta de um sistema para uma excitação degrau unitário.

Observando-se esta curva, pode-se afirmar que o sistema é:

- a) sobreamortecido. b) subamortecido.
c) criticamente amortecido. d) oscilante unitônico.
e) amortecido.

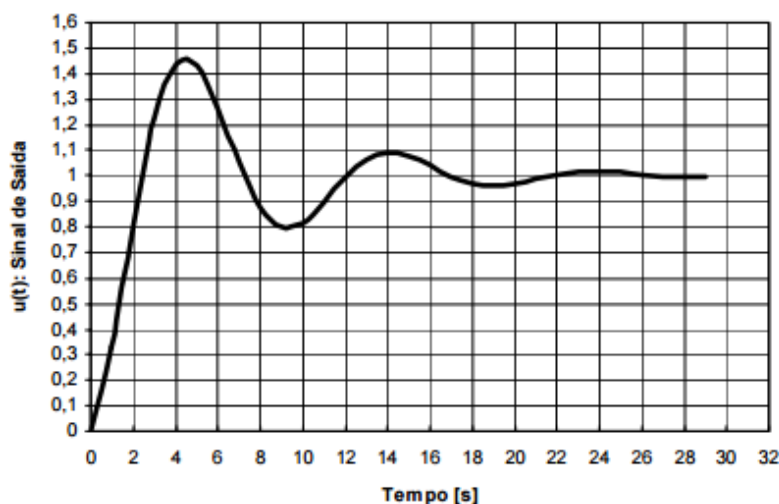
EXERCÍCIO 3.18

(Petrobras) (Modificada) A figura acima representa a resposta da variável de saída a uma perturbação degrau de magnitude 2 unidades na variável de entrada de um sistema de segunda ordem, a partir de um instante em que o processo estava em regime permanente. Com base nessas informações, conclui-se que

- o sistema I tem fator de amortecimento (ζ) maior que o sistema II.
- o tempo de subida (ou ascensão) do sistema I é 10 min.
- os dois sistemas têm fator de amortecimento (ζ) maiores do que 1.
- a sobrelevação do sistema II é 0,6.
- o sistema I é mais estável quando comparado ao sistema II.

EXERCÍCIO 3.19

(IPAD) A figura abaixo apresenta a saída de um sistema de controle.



Considerando que o valor desejado para a saída seja 1,0, julgue as seguintes afirmativas

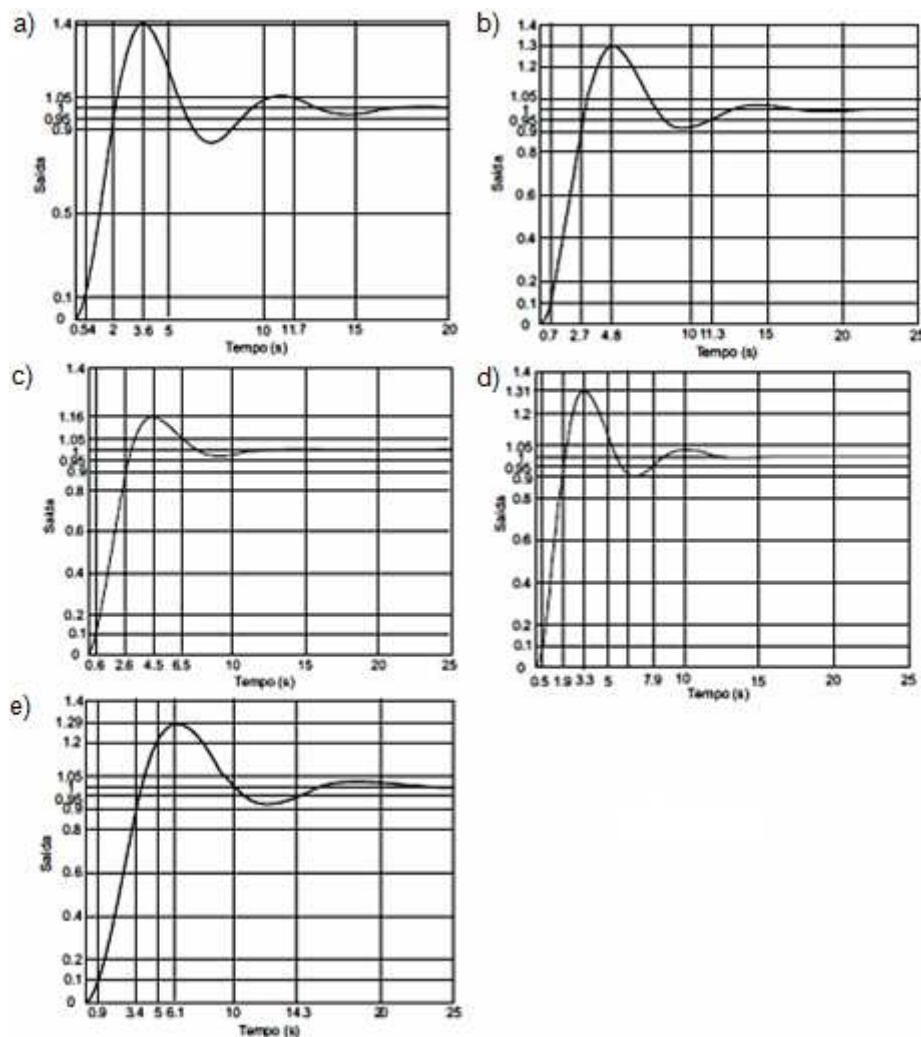
- O valor do *overshoot* está entre 0,4 e 0,5.
- O maior erro tem o mesmo valor que o *overshoot*.
- O sistema, neste caso, apresenta um comportamento estável.
- O valor do *overshoot* é 22.

Assinale a alternativa correta:

- as afirmativas 1 e 2 são verdadeiras.
- as afirmativas 1 e 3 são verdadeiras.
- as afirmativas 1 e 4 são verdadeiras.
- as afirmativas 2 e 3 são verdadeiras.
- as afirmativas 3 e 4 são verdadeiras.

EXERCÍCIO 3.20

(Petrobras) A resposta ao degrau de um sistema apresenta tempo de subida $t_r = 1.4$ s, tempo de pico $t_p = 3.3$ s, tempo de acomodação $t_s = 7.9$ s (critério de 5%) e sobrepasso de 31%. Dentre os gráficos abaixo, o que corresponde à resposta degrau do sistema é:

**EXERCÍCIO 3.21**

(CEPS-UFBA) Considere um sistema de controle automático de temperatura cujo set-point é 120°C . Considere que o erro em regime desta variável de processo situa-se em uma faixa de 5% do valor em regime. Nestas condições, pode-se afirmar que a faixa de controle do sistema situa-se entre os valores máximo e mínimo respectivos de:

- a) 123°C e 117°C c) 126°C e 114°C e) 120°C e 108°C
 b) 120°C e 114°C e) 126°C e 120°C

EXERCÍCIO 3.22

A função de transferência de um sistema dinâmico de 2ª ordem é dada por:

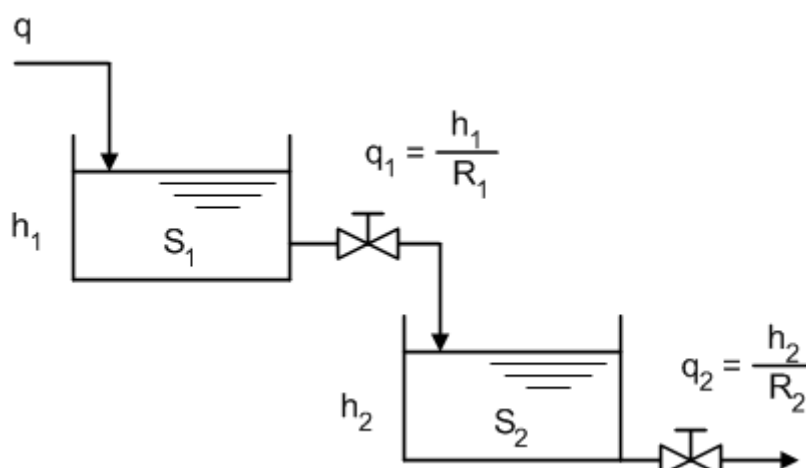
$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{1}{0,64 s^2 + 0,48 s + 1}$$

Considerando uma perturbação do tipo degrau unitário, responda:

- Quais os valores do grau de amortecimento e da constante de tempo?
- Como este sistema pode ser classificado quanto ao seu amortecimento?
- Quais os valores máximo (pico) e estacionário atingidos pela resposta após a perturbação?
- Quais os tempos de primeiro pico e de estabilização?
- Esboce a resposta y em função de t indicando os parâmetros calculados nos itens (c) e (d).

EXERCÍCIO 3.23

(COUGHANOWR & KOPPEL) Considere a associação de tanques em série representada na figura abaixo.



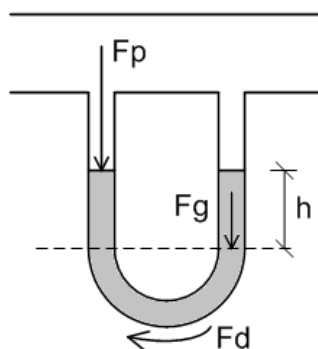
Para este sistema dinâmico, pede-se:

- (a) A função de transferência global $G_o(s) = H_2(s) / Q(s)$;
- (b) O grau de amortecimento do sistema;
- (c) A função da variável-desvio $h_2(t)$ para perturbação degrau unitário em $q(t)$.

Dados: $S_1 = 1 \text{ m}^2$ $S_2 = 1 \text{ m}^2$
 $R_1 = 0,5 \text{ h/m}^2$ $R_2 = 1,0 \text{ h/m}^2$

EXERCÍCIO 3.24

(STEPHANOPOULOS) Através do balanço de forças e admitindo regime laminar, obtenha a função de transferência que relaciona as transformadas de Laplace do desnível de fluido e da pressão diferencial aplicada em um manômetro de tubo em U, como o representado abaixo.



Estime também os valores do ganho, da constante de tempo e do grau de amortecimento para os seguintes parâmetros do medidor:

Densidade do fluido manométrico = 13600 kg/m^3
 Viscosidade do fluido manométrico = $1,55 \cdot 10^{-3} \text{ Pa.s}$
 Comprimento do tubo = 20 cm
 Diâmetro interno do tubo = $0,2 \text{ cm}$

4. SIMBOLOGIA E NOMENCLATURA ISA

A norma **ANSI/ISA 5.1** da *The Instrumentation, Systems and Automation Society* (ISA) descreve a nomenclatura e a simbologia adotadas em diagramas de processo e de instrumentação (P&ID – *piping and instrumentation diagram*). A **NBR 8190** publicada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é a norma brasileira baseada na ANSI/ISA 5.1.

4.1 PIPING & INSTRUMENTATION DIAGRAM

O Fluxograma de Engenharia ou Diagrama de Processo e Instrumentação (P&ID) contempla:

- **Equipamentos do processo** Entende-se como os equipamentos de Operações Unitárias (escoamento de fluidos, transferência de calor, transferência de massa, processos termodinâmicos e mecânicos) e os dispositivos de segurança (discos de ruptura, válvulas de alívio, válvulas de segurança etc.). Os equipamentos são desenhados sem escala e seguem simbologia padronizada. Todos acompanham uma identificação conhecida como “tag”. De modo geral, um P&ID contém no máximo 4 equipamentos, dispostos em ordem lógica da esquerda para direita, quando possível.
- **Dados das tubulações** Toda linha (também chamada corrente ou tubulação) deve apresentar o produto transportado, número de identificação, o seu diâmetro nominal e o material do qual é feita.
- **Instrumentação** Os elementos seguem nomenclatura e simbologia de modo a possibilitar compreensão clara da malha de controle.
- **Utilitários** Entende-se por vapor de aquecimento, eletricidade, ar de instrumentação, água de resfriamento ou refrigeração etc. São evidenciadas as entradas e as saídas (destinos) destas correntes.

4.2 NOMENCLATURA DE INSTRUMENTAÇÃO

Os instrumentos de um P&ID são identificados por um conjunto de letras e um número. A primeira letra é associada a uma variável do processo enquanto as letras subsequentes representam funções do instrumento (elemento). As correspondências seguem à **língua inglesa**. Os números podem indicar uma ordem cronológica ou uma localização na planta.

Alguns exemplos:

AE	Elemento analisador	LI	Indicador de nível
DT	Transmissor de densidade	LIT	Transmissor e indicador de nível
EV	Válvula elétrica (solenóide)	PCV	Válvula controladora de pressão
FE	Elemento medidor de fluxo	PDT	Transmissor de pressão diferencial
FI	Indicador de fluxo	PI	Indicador de pressão
FIC	Controlador e indicador de fluxo	PIT	Transmissor e Indicador de pressão
FO	Placa de orifício	TE	Elemento medidor de temperatura
HS	Chave manual	TR	Registrador de temperatura
IT	Transmissor de corrente elétrica	TT	Transmissor de temperatura
JIC	Controlador e indicador de potência	ZIR	Registrador e indicador de posição

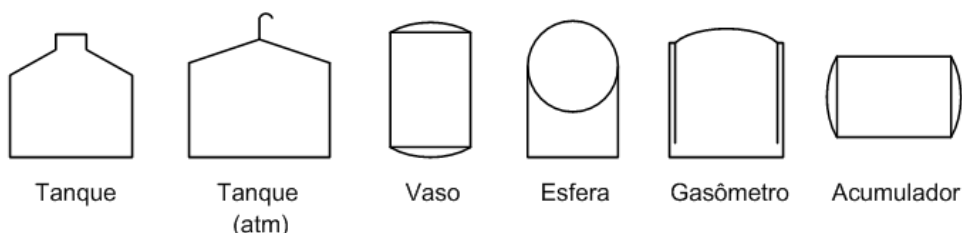
A tabela 4.1, adaptada da norma ANSI / ISA 5.1, apresenta a nomenclatura de instrumentos.

Tabela 4.1 – Nomenclatura para instrumentação (ANSI / ISA 5.1)

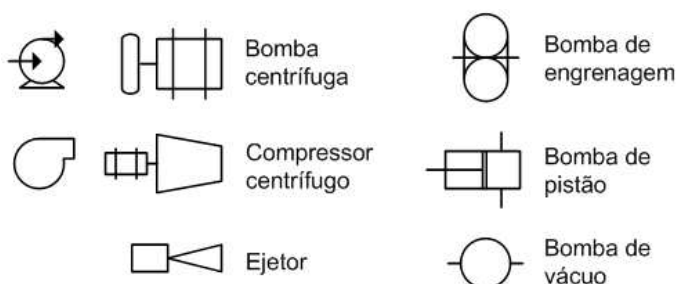
	Primeira Letra		Letras Subsequentes		
	Variável inicial	Modificadora	Função passiva	Função final	Modificadora
A	Analizador		Alarme		
B	Queimador		Escolha livre	Escolha livre	Escolha livre
C	Condutividade			Controlador	
D	Densidade	Diferencial			
E	Tensão		Elemento primário		
F	Vazão	Razão			
G	Dimensão		Visor		
H	Comando manual		Nível alto		
I	Corrente elétrica		Indicador		
J	Potência	Varredura			
K	Escala de tempo			Estação de controle	
L	Nível		Nível baixo		
M	Umidade				
N	Escolha livre	Escolha livre	Escolha livre	Escolha livre	Escolha livre
O	Escolha livre		Orifício		
P	Pressão / Vácuo		Ponto		
Q	Quantidade	Totalizador			
R	Radioatividade		Registrador		
S	Velocidade	Segurança		Chave	
T	Temperatura			Transmissor	
U	Multivariável		Multifunção	Multifunção	Multifunção
V	Viscosidade			Válvula	
W	Peso / Força		Poço		
X	Escolha livre		Escolha livre	Escolha livre	Escolha livre
Y	Escolha livre		Relé		
Z	Posição			Escolha livre	

4.3 SIMBOLOGIA DE EQUIPAMENTOS

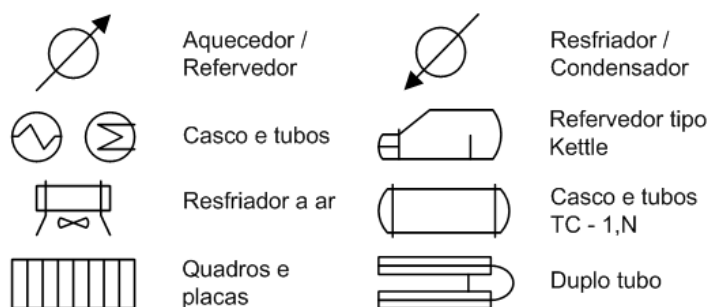
a) Tanques e vasos



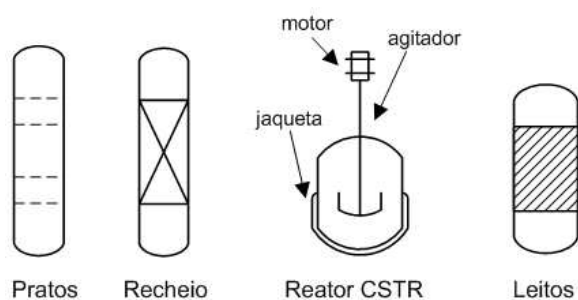
b) Bombas e compressores



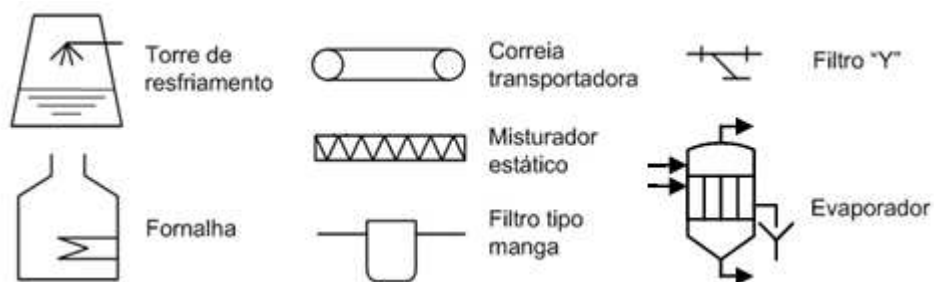
c) Trocadores de calor



d) Colunas e reatores

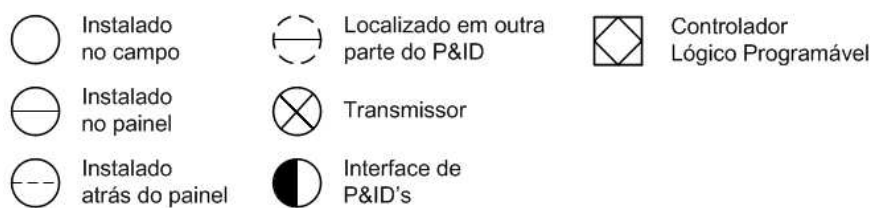


e) Outros dispositivos

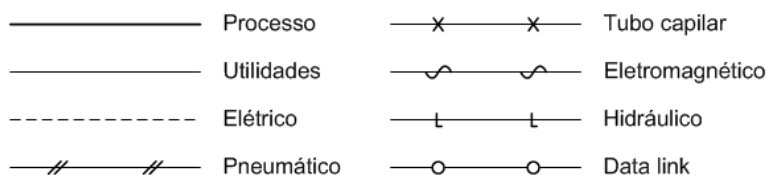


4.4 SIMBOLOGIA DE INSTRUMENTAÇÃO

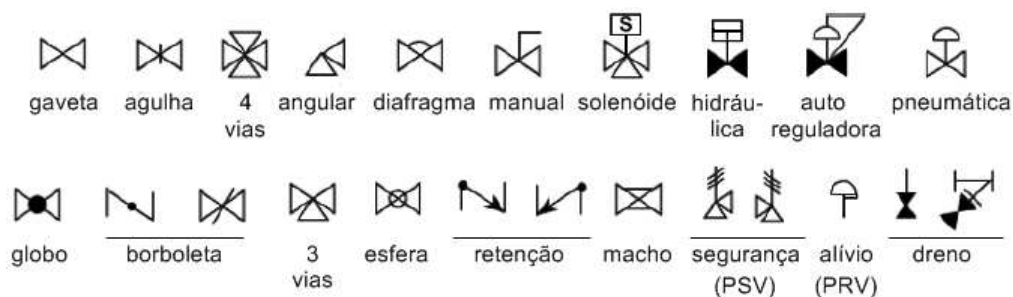
a) Instrumentos básicos



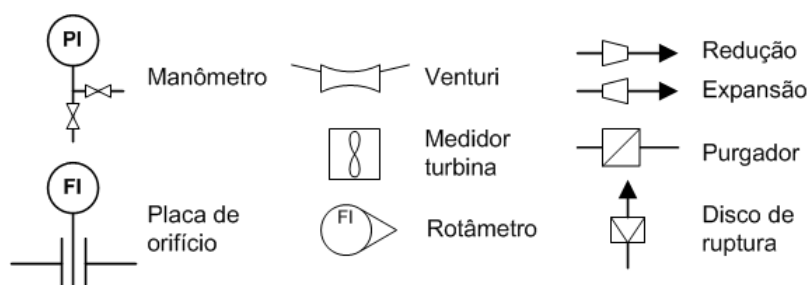
b) Linhas e sinais



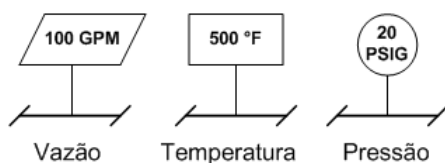
c) Válvulas e dispositivos de segurança



d) Outros dispositivos

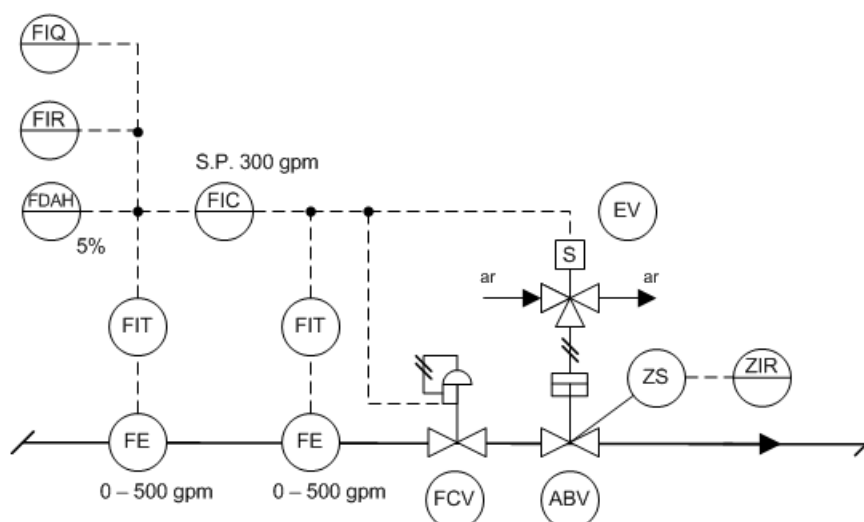


e) Anotações



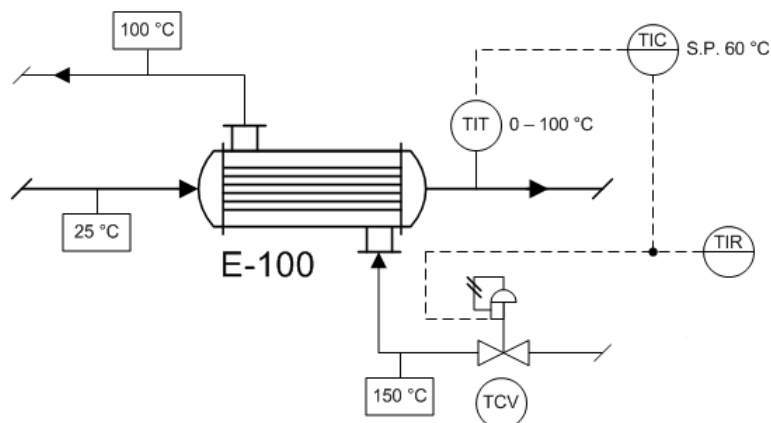
4.4.1 EXEMPLOS DE MALHAS DE CONTROLE

a) Controle de fluxo redundante

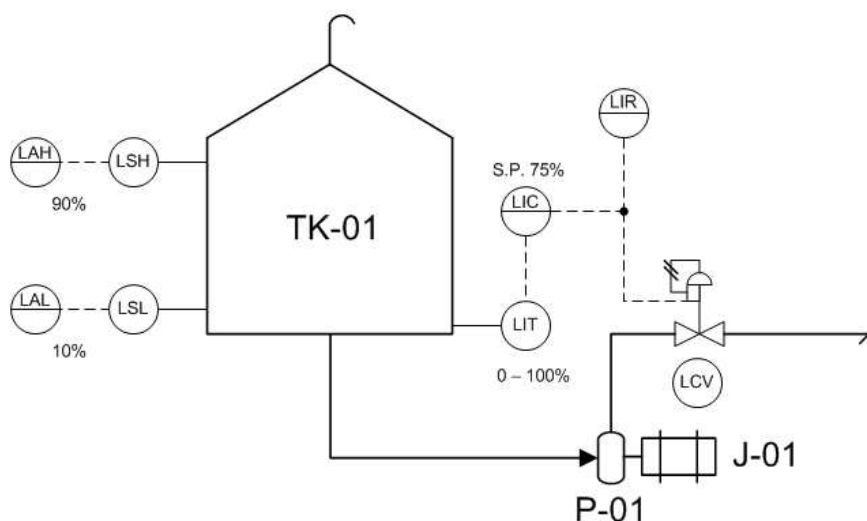


Notas:

- 1) Chama-se "redundância" à prática de se medir uma mesma variável com dois elementos primários;
- 2) Enquanto uma válvula de controle (ex.: globo ou borboleta) trabalha com variações em sua abertura, uma válvula de bloqueio (ex.: gaveta ou esfera) trabalha apenas em duas posições: aberta ou fechada.

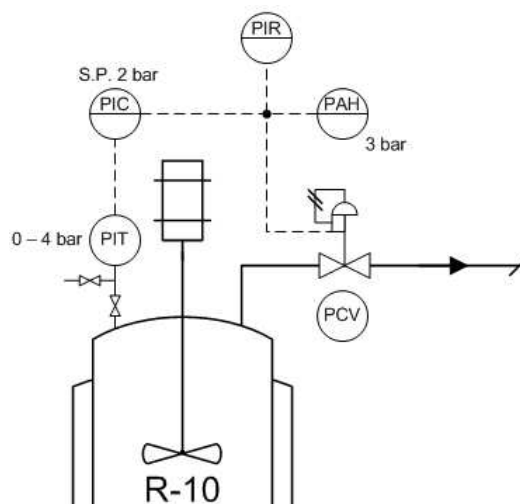
b) Controle da temperatura de saída de um fluido aquecido em um trocador


Nota: na vaporização de um fluido, é comum se fazer o controle medindo-se a pressão deste fluido, ao invés da temperatura de saída.

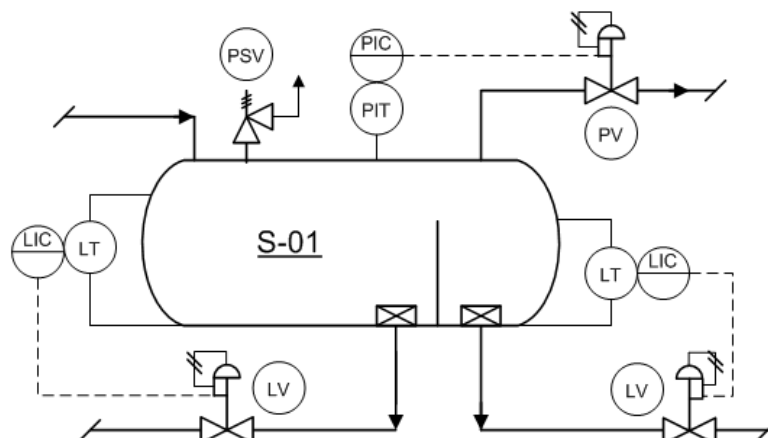
c) Controle do nível de um tanque atmosférico


Notas:

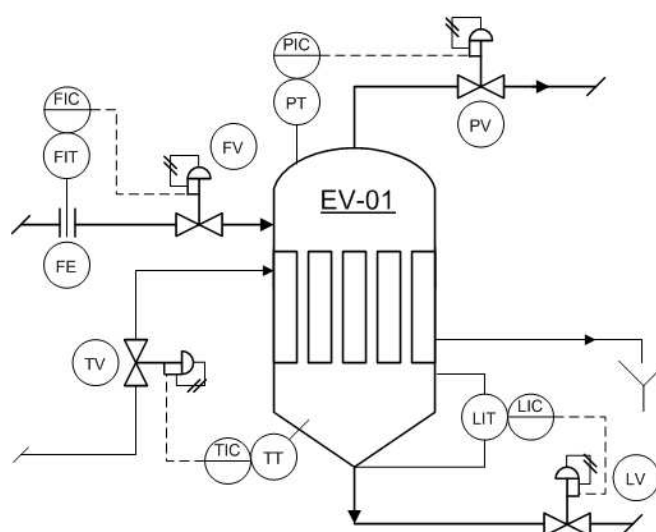
- 1) A válvula de controle jamais deve ser instalada na sucção da bomba, uma vez que facilitaria o processo de cavitação;
- 2) Para tanques ou vasos que operem com pressão superior à atmosférica, são necessárias duas tomadas de pressão: uma acima da superfície livre do nível do líquido e outra na parte inferior do equipamento.

d) Controle da pressão interna de um reator


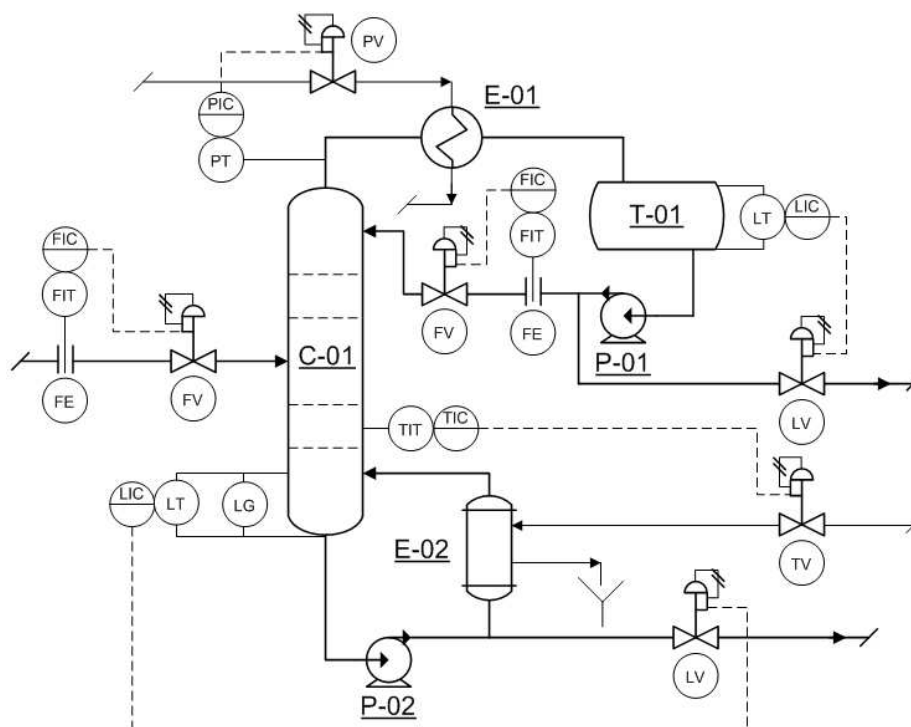
e) Malha de controle típica de um separador trifásico



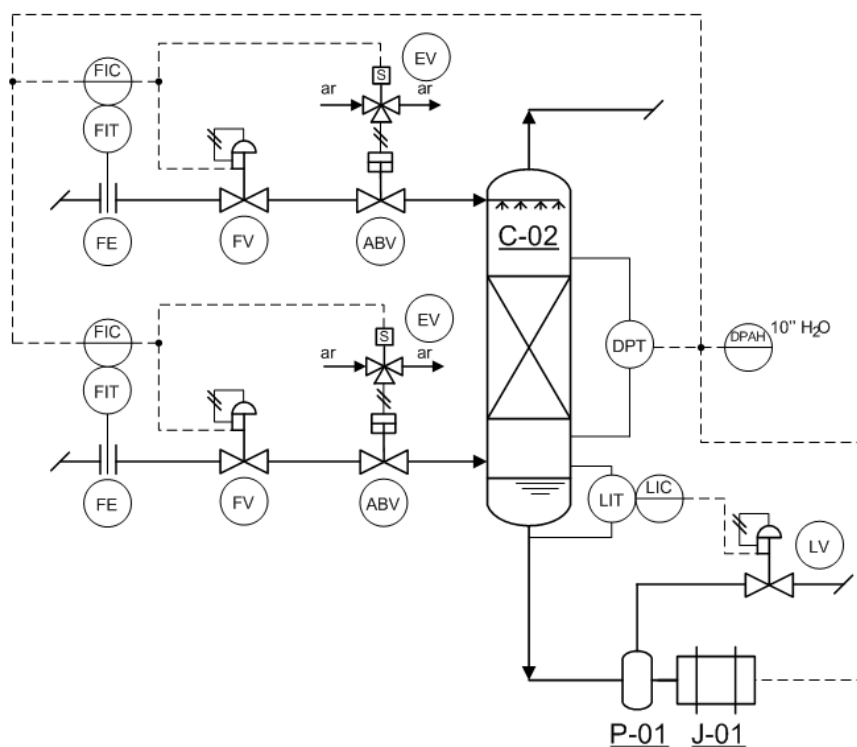
f) Malha de controle típica de um evaporador de simples estágio



g) Malha de controle típica de uma coluna de pratos

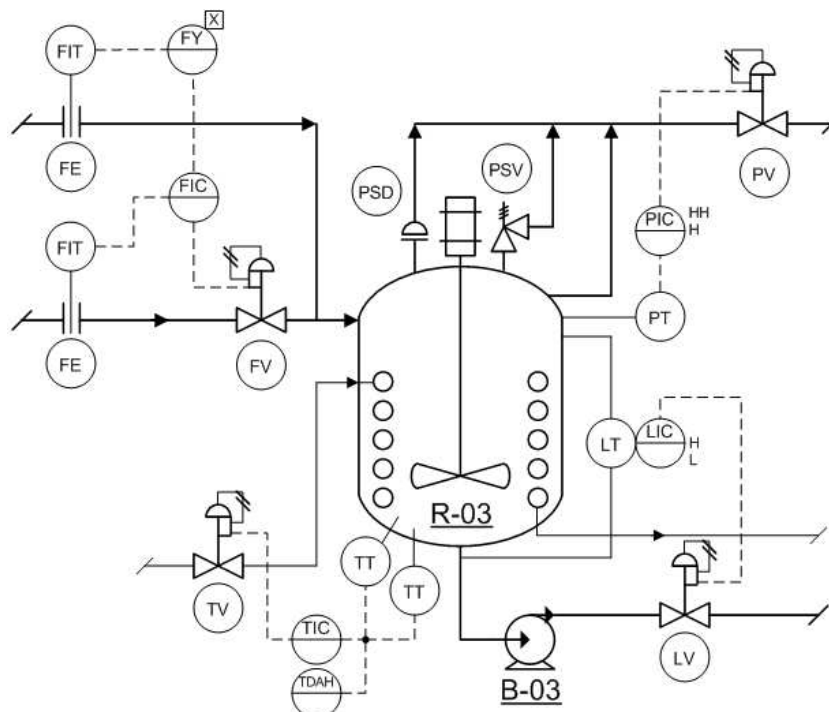


h) Malha de controle típica de uma coluna de recheio



Nota: é comum o intertravamento (*interlock*) de dispositivos de modo a parar uma dada operação enquanto uma variável do processo não retorna ao seu set point. Neste exemplo, a elevação da queda de pressão do gás ao atravessar o recheio (indício de inundação) bloqueia a alimentação de líquido e gás da coluna e desliga a bomba de fundo.

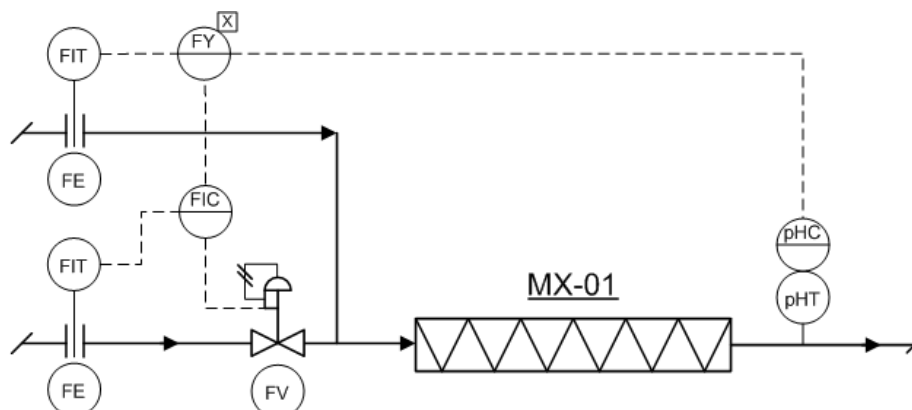
i) Malha de controle típica de um reator exotérmico



Notas:

- 1) Os instrumentos PSV e PSD são dispositivos de segurança (em relação à elevação da pressão interna do reator), sendo que o disco de ruptura PSD é o elemento final de segurança (último a romper);
- 2) Um caso específico do controle feedforward é o controle de razão (*ratio control*). Nesta estratégia de controle multivariável, a relação entre duas ou mais variáveis é mantida constante. No exemplo, a razão entre as vazões dos dois reagentes alimentados ao reator. FY é denominada estação de razão (*ratio station*), sendo um multiplicador da variável-distúrbio que gera o set point do controlador da variável manipulada.

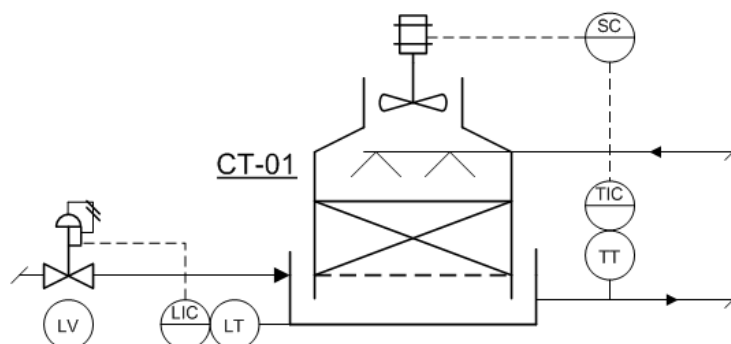
j) Malha de controle de vazão aplicada ao controle de pH (*ratio control*)



Notas:

- 1) Nesta malha, o controlador pHC determina a razão (ganho) do elemento FY a partir das leituras de pHT.
- 2) O controle de razão (ou relação) é comumente empregado em: (a) sistemas de mistura (*blending*), (b) alimentação de reatores químicos, (c) manutenção da razão de refluxo em colunas e (d) alimentação de ar e combustível em fornalhas.

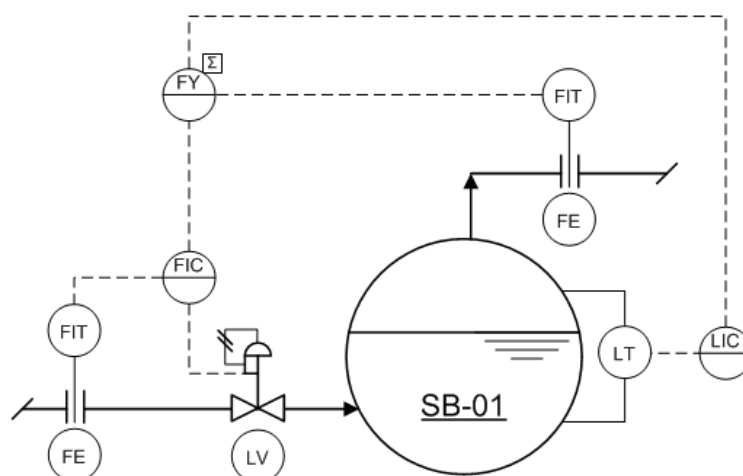
k) Malha de controle típica de uma torre de resfriamento



Notas:

- 1) A corrente de "make-up" serve para manter o nível de água da torre, que diminui conforme a evaporação ocorre;
- 2) Quanto maior a vazão de ar seco admitida à torre, menor será a temperatura de saída da água.

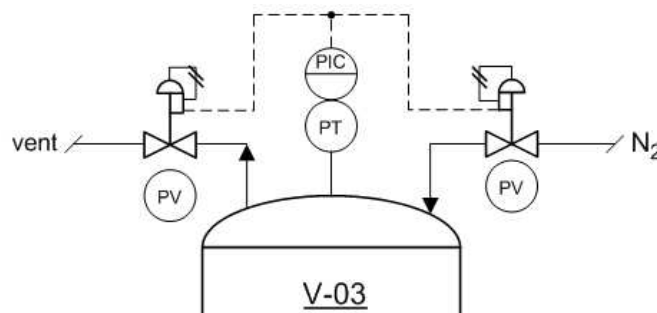
l) Controle de nível a três elementos de uma caldeira



Notas:

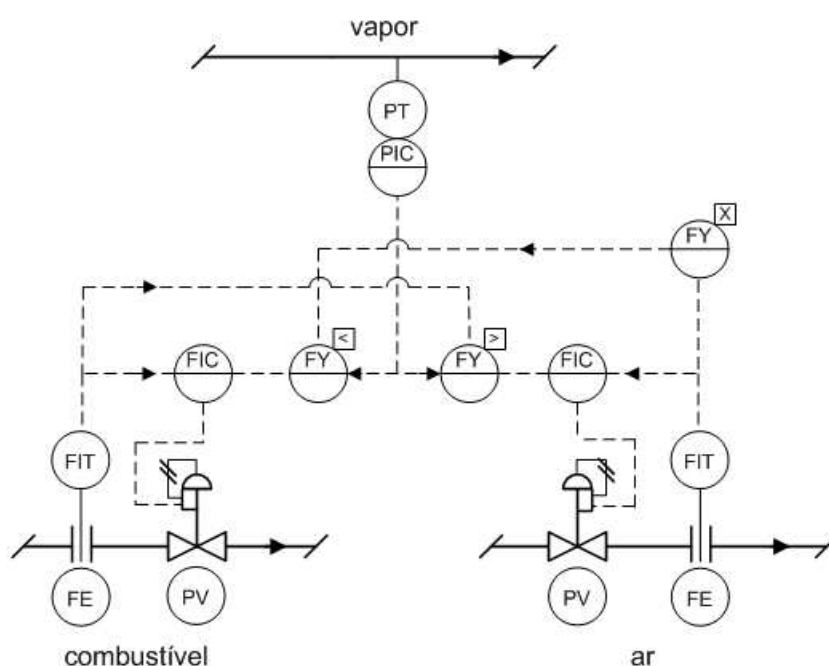
- 1) O somador FY combina os sinais das malhas *feedback* (nível) e *feedforward* (vazão de vapor).
- 2) O controle de nível de caldeiras pode ser feito a um elemento (mede-se apenas o nível); dois elementos (medem-se o nível e a vazão de água); três elementos (medem-se o nível, a vazão de água e a vazão de vapor) e a quatro elementos (nível, vazão de água, vazão de vapor e pressão da caldeira).

m) Controle de pressão em um vaso inertizado (*split range*)



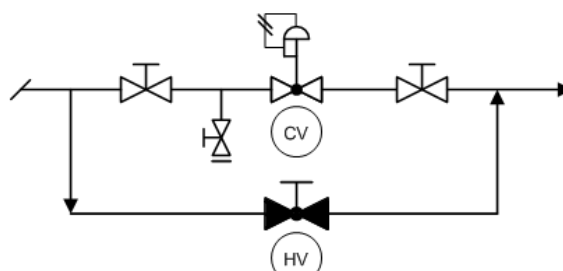
Nota: no controle *split range* (ou por faixa dividida), um único controlador envia sinais para duas ou mais válvulas de controle que atuarão em diferentes faixas. No exemplo, a válvula de nitrogênio opera desde 100% aberta até 100% fechada da pressão mínima até o set point do vaso; já a válvula de exaustão (vent) opera desde 100% fechada até 100% aberta do set point até a pressão máxima.

n) Controle de combustão com limites cruzados (controle seletivo)



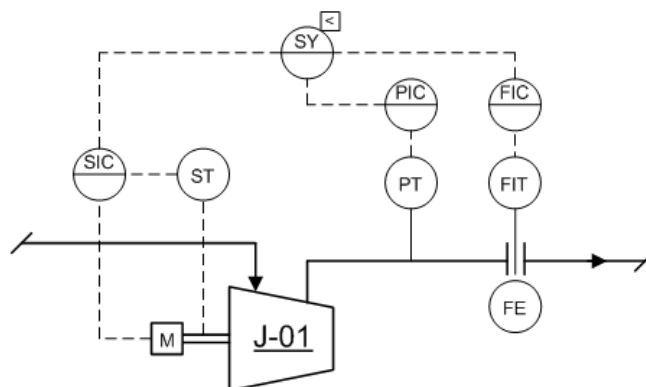
Nota: os seletores de sinal são empregados em malhas nas quais variáveis do processo compartilham uma mesma variável manipulada. Na malha acima, os seletores de alta (FY >) e de baixa (FY <) possibilitam a construção de um sistema no qual, para variações da pressão de vapor, sempre haverá excesso de ar em relação ao combustível. Por exemplo, para uma queda de pressão no sistema (aumento da demanda de vapor), o sinal do PIC aumentará (sentido de abertura das válvulas / ação inversa). Deste modo, o seletor FY < permitirá passagem do sinal do FIT de ar e o seletor FY > transmitirá o sinal do PIC. À medida que a válvula PV de ar abre, o sinal do FIT de ar aumenta e, por consequência, a vazão de combustível. Esta lógica garante que sempre haja excesso de ar em relação ao combustível, uma vez que o mesmo aumentará somente após o fluxo de ar. Na situação contrária (diminuição da produção de vapor), a malha faz com que primeiramente seja reduzida a vazão de combustível para, então, ser afetada a taxa de ar.

o) Instalação de válvula de controle com bypass



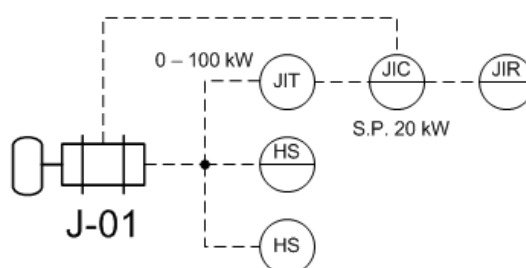
Nota: válvulas em preto indicam operação normalmente fechada (NC); em branco, normalmente aberta (NO).

p) Controle com restrição (*override control*) para proteção de um compressor



Nota: o controle *override* (ou com restrição) é um tipo de controle seletivo no qual a malha alterna entre uma situação normal de operação e uma situação de perigo. No exemplo, a chave seletora de alta (SY <) transfere o controle para o PIC quando a pressão de descarga do compressor exceder determinado valor limite.

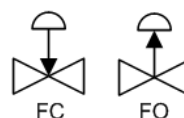
q) Monitoramento de potência para proteção contra cavitação



Nota: HS (*hand switch*) representa as botoeiras de acionamento do motor da bomba (em campo e no painel).

OBSERVAÇÃO

Em virtude de **falhas elétricas** ou no **suprimento de ar** de instrumentação, as válvulas de controle e de bloqueio entram em modo de **falha aberta** (F.O. – *fail open*) ou **falha fechada** (F.C. – *fail close*). Estas posições devem ser selecionadas de modo a garantir a **segurança do processo**. A válvula de um sistema de resfriamento, por exemplo, deverá ser mantida totalmente aberta em caso de interrupção do sinal para o atuador. Há ainda o modo de falha na última posição (F.L. – *fail last*), na qual a válvula mantém-se com a abertura do momento anterior à falha.



EXERCÍCIO 4.1

(ENADE) Uma enorme explosão destruiu uma planta industrial. O processo envolvia um reator em batelada produzindo tricarbonilo metilciclopentadienil de manganês. Estudos efetuados pela Comissão de Investigação de Risco e Segurança de Processos Químicos concluíram que erros cometidos durante o projeto do sistema de resfriamento do reator foram a causa do acidente. O sistema de resfriamento consistia na troca térmica entre a mistura reagente e água de resfriamento. A água era alimentada por meio de uma válvula de controle na entrada de uma serpentina e, após a troca térmica, descartada na forma de vapor para o ambiente. Uma válvula de drenagem foi instalada para descartar a água não vaporizada, e um sistema de alívio de pressão foi instalado para situações de emergência. Todos os procedimentos de operação do reator eram efetuados na sala de controle por um operador. Sobre as prováveis causas do acidente, avalie as afirmações a seguir.

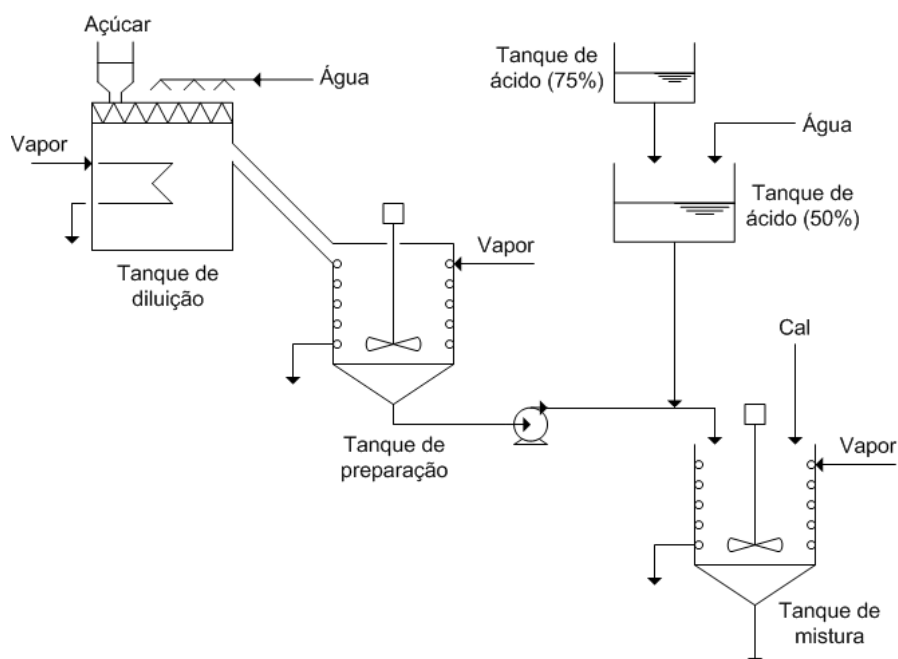
- I. O disco de ruptura do sistema de alívio de pressão escolhido rompe-se a uma pressão muito baixa. O projetista deveria escolher um disco de ruptura para uma pressão maior.
- II. A válvula de alimentação da água de resfriamento escolhida foi a normalmente fechada. O projetista deveria escolher uma válvula normalmente aberta.
- III. A válvula de drenagem da água de resfriamento escolhida foi a normalmente aberta. O projetista deveria escolher uma válvula normalmente fechada.
- IV. O controlador escolhido foi do tipo Proporcional Integral (PI). O projetista deveria escolher um controlador do tipo Proporcional Integral Derivativo (PID).

É correto apenas o que se afirma em:

- a) I b) III c) I e II d) II e IV e) III e IV

EXERCÍCIO 4.2

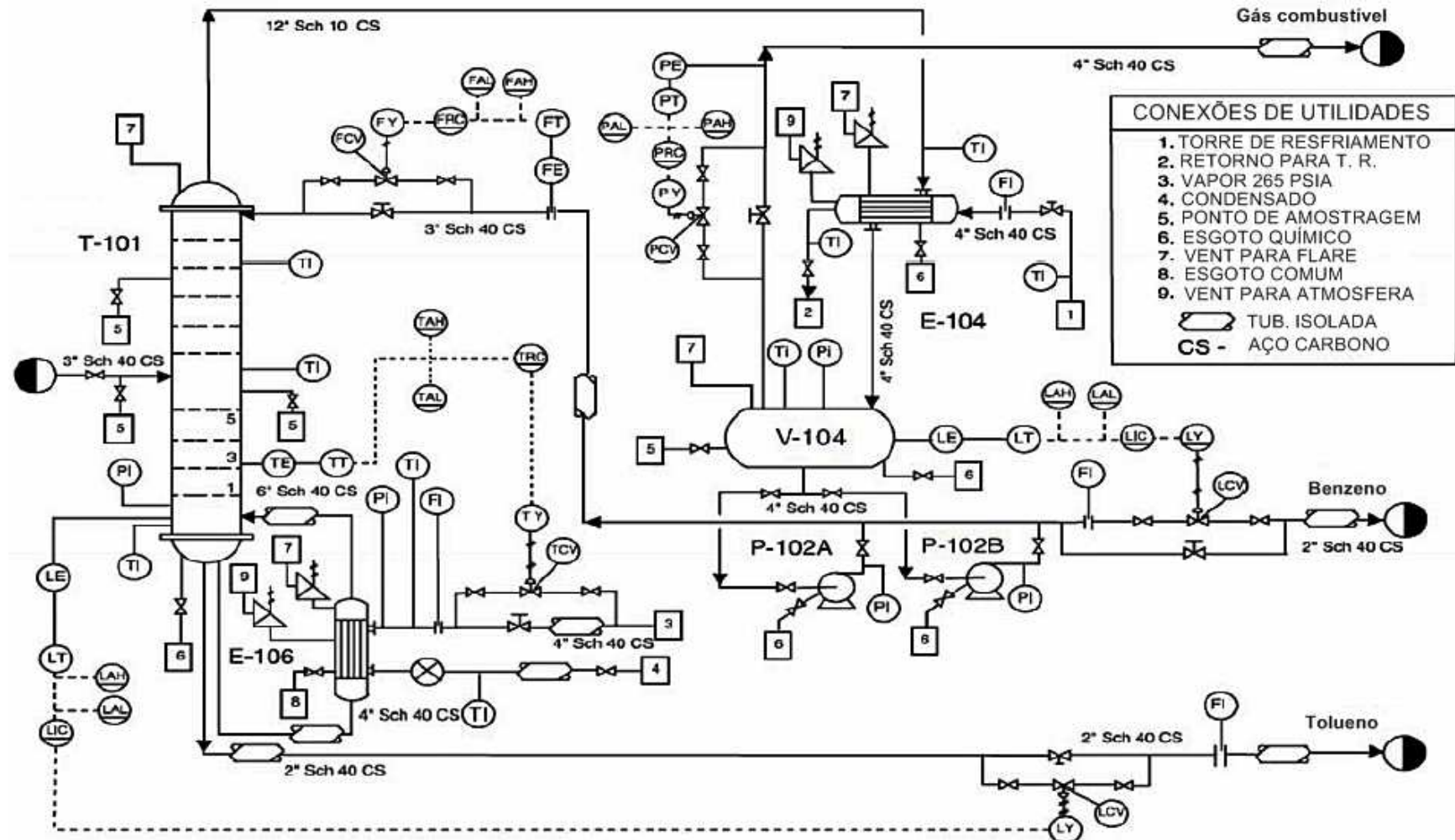
A figura abaixo ilustra o processo de uma típica refinaria de açúcar. O açúcar bruto é transportado ao processo por meio de uma esteira. Água é borrifada no açúcar para formar um xarope de açúcar. O xarope é aquecido no tanque de diluição. A partir do tanque de diluição o xarope flui para o tanque de preparação onde será simultaneamente aquecido e misturado. A partir do tanque de preparação o xarope vai escoar para o tanque de mistura. No tanque de mistura são adicionados ácido e cal. Esse tratamento com ácido, cal e calor tem dois propósitos. O primeiro é a clarificação, que é um tratamento que causa coagulação e precipitação de partículas que não contenham açúcar, o segundo é eliminar a cor escura do açúcar.



Para controle da produção é necessário controlar as seguintes variáveis através da implementação de malhas de controle: (1) temperatura no tanque de diluição; (2) densidade do xarope que sai do tanque de preparação; (3) nível do tanque de ácido a 50%; (4) concentração do ácido no tanque de 50%; (5) vazão de xarope para o tanque de mistura; (6) pH da solução no tanque de mistura e (7) temperatura do tanque de mistura. Estabeleça as estratégias de controle das variáveis mencionadas e redesenhe o processo inserindo os instrumentos (sensores, transmissores, controladores, válvulas etc.) de acordo com a nomenclatura e simbologia ISA 5.1.

EXERCÍCIO 4.5

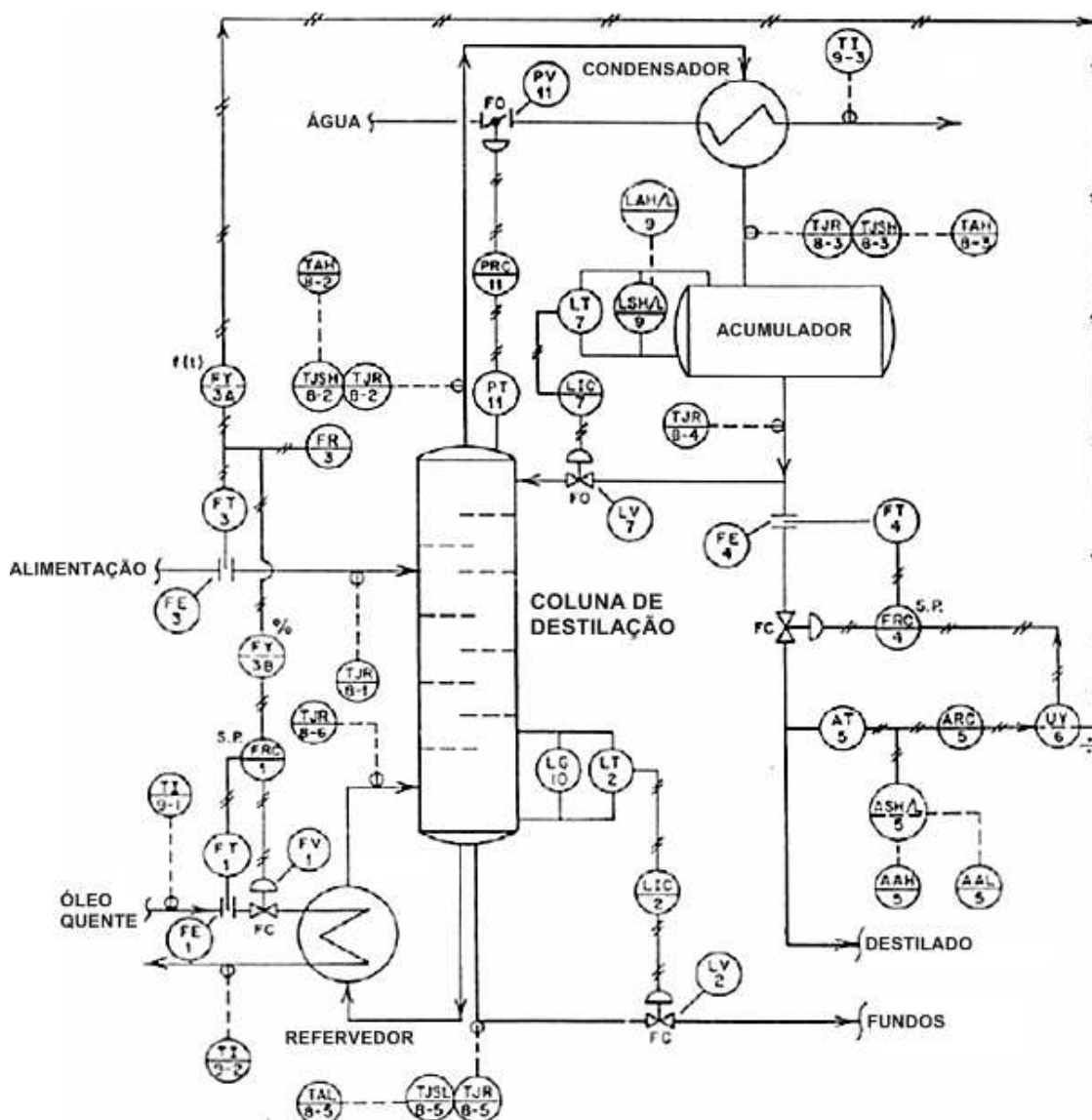
Considerando o P&ID abaixo, responda: (1) Qual o processo representado? (2) Quais os equipamentos representados? (3) Quais os fluidos e suas respectivas localizações em cada trocador de calor? (4) Como é feito o controle de nível da coluna? E o de temperatura? (5) Quais variáveis são controladas no acumulador? (6) Quais os alarmes presentes neste fluxograma? (7) Em relação às demais correntes, a que abandona o topo da coluna tem maior diâmetro nominal. Comente. (8) Porque existem duas bombas de destilado (P-102 A e P-102 B)?



EXERCÍCIO 4.6

Considerando o P&ID abaixo, responda:

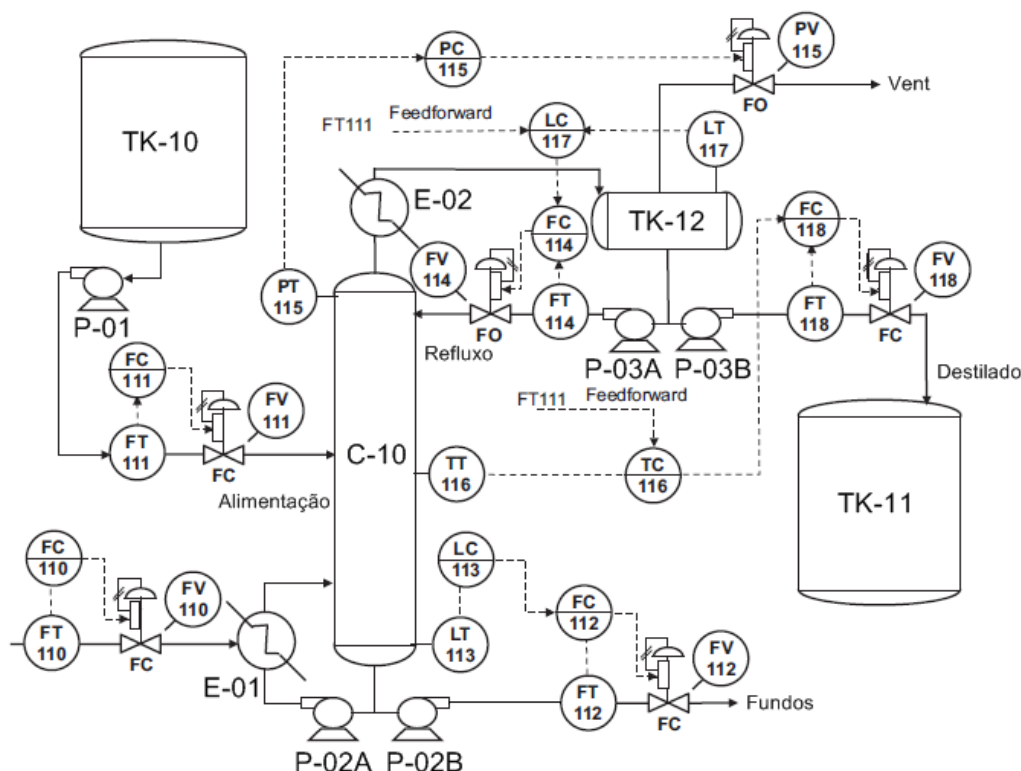
- 1) A válvula de controle FV-1 possui qual tipo de falha? Porque o projetista selecionou este tipo?
- 2) A válvula de controle PV-11 possui qual tipo de falha? Porque o projetista selecionou este tipo?
- 3) A válvula de controle LV-7 possui qual tipo de falha? Porque o projetista selecionou este tipo?
- 4) Como é feito o controle de pressão da coluna?
- 5) Como é feito o controle de nível da coluna?
- 6) Caso o instrumento LT-7 obtenha uma leitura inferior ao valor do set point do controlador LIC-7, qual deverá ser a tendência da válvula LV-7 no que se refere a abertura/fechamento? Justifique.
- 7) Caso o instrumento PT-11 obtenha uma leitura superior ao set point do controlador PRC-11, qual a tendência da válvula PV-11 no que se refere a abertura/fechamento? Justifique.
- 8) O que é o instrumento TI 9-3? A qual variável específica do processo ele está associado?
- 9) O que é o instrumento TAL 8-5? A qual variável específica deste processo ele está associado?
- 10) O que é o instrumento FE-4? A qual variável específica deste processo ele está associado?



EXERCÍCIO 4.7

Considerando o P&ID apresentado na figura abaixo, responda:

- Quais são as três operações unitárias retratadas neste fluxograma?
- Quais são os equipamentos de processo desta planta?
- Descreva como é feito o controle de temperatura da coluna C-10.
- Qual o tipo de falha da válvula PV 115? Porque o projetista optou por este tipo?
- Caso o LT 113 obtenha uma leitura inferior ao set-point do LC 113, qual a tendência da FV 112 no que se refere à abertura/fechamento? Justifique.
- Qual a função do equipamento TK-12?
- Qual o tipo de falha da válvula FV 114? Porque se optou por este tipo?
- Num sistema de controle em cascata, existem dois controladores: um dito mestre e outro, escravo. Com relação ao controle da vazão de refluxo, indique os controladores mestre e escravo.

**EXERCÍCIO 4.8**

Dois reagentes são misturados a um catalisador no tanque de mistura M-01. A mistura é transferida ao reator CSTR R-01, que opera sob média pressão. Os produtos líquidos são enviados pela bomba B-01 à coluna de destilação C-01, que é responsável pela separação dos produtos e do reagente em excesso. Os subprodutos gasosos são enviados a um *flare*. Para que a reação ocorra, os reagentes devem ser aquecidos até certa temperatura; serviço executado pelo trocador E-01, que opera com vapor saturado. Sendo a reação exotérmica, o R-01 é dotado de jaqueta, pela qual circula água de resfriamento da torre TR-01. O fluxograma de Engenharia deste processo está representado na figura 4.1. Utilizando a nomenclatura e simbologia ISA, faça a instrumentação deste fluxograma, controlando as seguintes variáveis do processo:

- Vazão dos reagentes à montante do trocador E-01;
- Temperatura dos reagentes à jusante do trocador E-01;
- Pressão interna do reator R-01;
- Nível de líquido do reator R-01 e
- Temperatura interna do reator R-01.

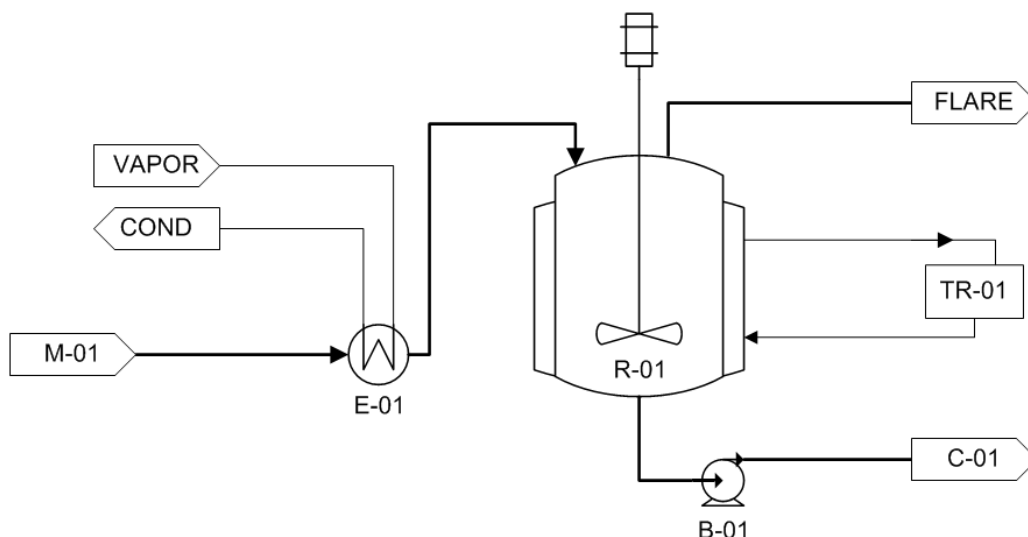


Figura 4.1 – P&ID do exercício 4.6.

EXERCÍCIO 4.9

Baseado nas informações a seguir, esboce um P&ID.

“O reagente limitante A é estocado em um tanque atmosférico T-01 e enviado ao reator R-01 através da bomba B-01. O reagente em excesso B também é armazenado em condições atmosféricas (tanque T-02) e posto a reagir com A no interior do R-01 transportado pela bomba B-02. Os produtos líquidos são enviados para a etapa de purificação por meio da bomba B-03, enquanto os gases liberados como subprodutos seguem para um sistema de recuperação.

Ambos os tanques de estocagem possuem medição e registro de nível, alarmes de alta e baixa leitura (10% e 90%) e válvulas de bloqueio automático à montante, com registradores e indicadores de posição.

As medidas dos fluxos dos reagentes são redundantes, dispondo de um alarme ao desvio de 3% entre as leituras. As vazões são controladas por válvulas pneumáticas (150 gpm para A e 250 gpm para B), existindo ainda em cada linha uma válvula de bloqueio.

A reação entre A e B é exotérmica, motivo pelo qual o R-01 é dotado de jaqueta de resfriamento pela qual água é vaporizada pelo calor liberado. A temperatura é mantida em 60°C, tendo medição tridundante, alarme de alta em 80°C e alarme de desvio entre os elementos em 2°C. Uma válvula de controle na alimentação de água garante o controle da temperatura. O nível de água na jaqueta é medido e registrado.

O nível de líquido no interior do reator é controlado a 80% por uma válvula instalada na descarga da B-03. Já a pressão, é mantida em 4 barg e possui leitura redundante. Um alarme acende no painel quando a pressão atinge 6 barg.

Os motores das bombas possuem proteção contra cavitação, com chaves manuais e controladores de potência (40 kW). Já o motor do agitador do R-01 possui, além do monitoramento da potência, controle e registro de rotação (30 rpm).

O fluxo enviado à purificação é registrado e totalizado.”

EXERCÍCIO 4.10

(Petrobras) A identificação correta, segundo a Norma ISA 5.1, para um registrador e controlador de vazão que é o quinto na sequência da área de atividades 1320 é:

- | | | |
|----------------|----------------|----------------|
| a) 1320-FRC-05 | b) 1320-VRC-05 | c) 1320-05-FRC |
| d) FRC-132005 | e) VRC-132005 | |

EXERCÍCIO 4.11

(Petrobras) Nos processos produtivos, os dispositivos conhecidos como transmissores são

- a) instrumentos utilizados para medir parâmetros relevantes em um processo, e a leitura desses parâmetros é sempre feita no próprio local por um técnico.
- b) instrumentos utilizados para medir parâmetros menos importantes num processo, e transmiti-los remotamente a um receptor.
- c) instrumentos utilizados para medir somente a pressão, e transmitir esses valores remotamente a um receptor.
- d) instrumentos utilizados para medir parâmetros relevantes em um processo, e sua função consiste em transmitir esses dados remotamente a um receptor.
- e) radiotransmissores, com que os técnicos comunicam os valores dos parâmetros relevantes do processo.

EXERCÍCIO 4.12

(Petrobras) Em um instrumento, o elemento transmissor

- a) detecta alterações na variável do processo.
- b) indica o valor da variável do processo a ser controlada.
- c) registra os valores instantâneos da variável do processo.
- d) converte sinais do detector em outra forma capaz de ser enviada a um instrumento receptor.
- e) recebe uma informação na forma de sinal, altera essa forma e emite um sinal proporcional ao de entrada.

EXERCÍCIO 4.13

(Petrobras) No controle de processos, são importantes os transmissores de sinal. Os principais transmissores são pneumáticos e eletrônicos. Considere as seguintes afirmações sobre tipos de transmissores:

- I. Os transmissores pneumáticos e eletrônicos têm seu sinal mínimo zero.
- II. Os transmissores eletrônicos são ideais para locais onde possa haver vazamento de gases inflamáveis.
- III. Os sistemas eletrônicos de transmissão são mais seguros e permitem facilmente perceber avarias.

É correto o que se afirma em:

- a) I, apenas.
- b) III, apenas.
- c) I e II, apenas.
- d) II e III, apenas.
- e) I, II e III.

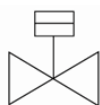
EXERCÍCIO 4.14

(Petrobras) De acordo com a Norma Técnica ANSI/ISA-5.1-1984 (R1992), a designação de um instrumento que está representada incorretamente é:

- a) HCV - válvula de controle manual.
- b) EAHL - alarme de tensão alta e baixa.
- c) LG - visor de nível.
- d) TDR - registrador de temperatura.
- e) FQIT - transmissor indicador totalizador de fluxo.

EXERCÍCIO 4.15

(Petrobras) Observe o desenho abaixo.



De acordo com a Norma ISA RP 5.1, que válvula de controle este símbolo representa?

- a) Atuador pneumático.
- b) Atuador elétrico.
- c) Atuador hidráulico.
- d) Auto-atuadora de diafragma.
- e) Transmissão pneumática.

EXERCÍCIO 4.16

(ENADE) O termo controle é aplicado para representar um método utilizado para manter uma determinada variável em um valor específico desejado. Assim, um sistema de controle de processo requer uma série de elementos que são definidos em termos de partes funcionais distintas. A função do elemento final de controle é

- determinar o erro antes que qualquer ação de controle possa ser realizada.
- relacionar a sequência de uma determinada produção, podendo envolver uma ou mais variáveis.
- exercer uma influência direta no processo, promovendo a mudança requerida na variável controlada.
- realizar a medida e a conversão de uma variável em termos de uma informação elétrica ou pneumática.
- analisar a medida do erro e determinar a necessidade e o tipo de ação a ser realizada para controlar o processo.

EXERCÍCIO 4.17

(Petrobras) De acordo com a Norma ANSI/ISA-S5.1 e os fluxogramas de engenharia, considere a identificação de alguns itens.

- FQI - indicador e totalizador de fluxo.
- PSV - válvula de segurança ou de alívio de pressão.
- PCV - válvula de controle progressivo.
- TIT - totalizador indicador de temperatura.

As identificações corretas estão em

- I e II.
- I e III.
- III e IV.
- I, II e III.
- II, III e IV.

EXERCÍCIO 4.18

(Petrobras) Observe o desenho abaixo.

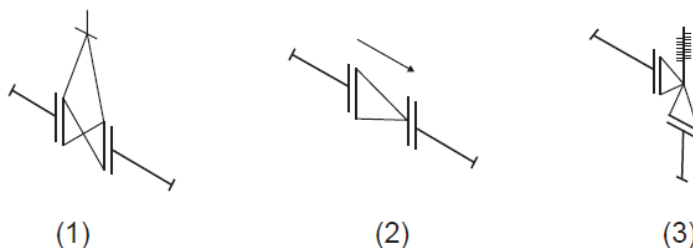


De acordo com a Norma ISA RP 5.1, que instrumento para medição de vazão é representado por este símbolo?

- Tubo Pitot.
- Medidor de agulha.
- Medidor Venturi.
- Rotâmetro.
- Placa de orifício.

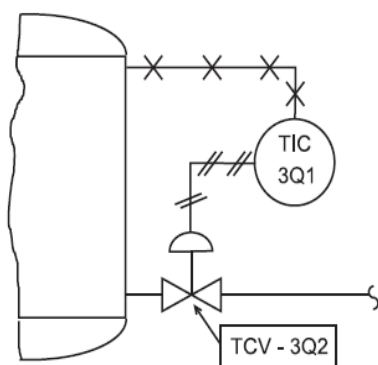
EXERCÍCIO 4.19

(Petrobras) Os desenhos isométricos de tubulações de um processo utilizam uma simbologia para representar as válvulas necessárias ao controle do processo. Três dessas válvulas são mostradas na figura abaixo.



Na figura, as válvulas (1), (2) e (3) são, respectivamente,

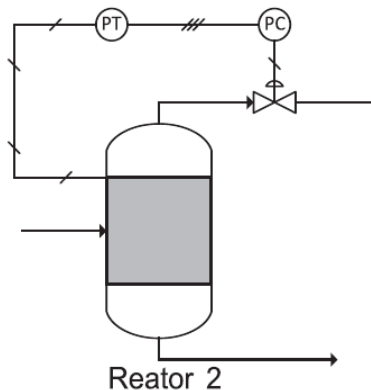
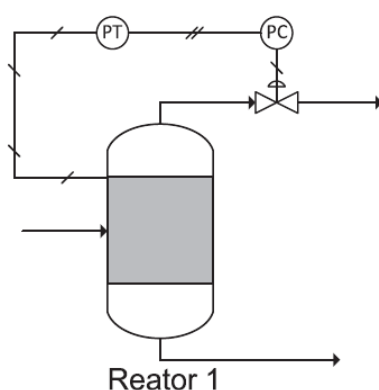
- gaveta, globo e solenoide.
- gaveta, de retenção e de segurança.
- globo, de retenção e solenoide.
- globo, de segurança e gaveta.
- de controle, globo e de segurança.

EXERCÍCIO 4.20

(Petrobras) Nos processos industriais, para melhorar a eficiência e o controle, faz-se uso de instrumentação industrial. Na figura ao lado, há uma malha de controle de um tanque industrial.

Analisando a figura, verifica-se que a(o):

- a) malha de controle é fechada.
- b) TCV é uma válvula de controle autoatuada, com sinal elétrico.
- c) TCV envia os dados de processo para a TIC através de sinal pneumático.
- d) TIC controla a TCV, utilizando sinal elétrico.
- e) TIC é um controlador indicador de temperatura, com entrada de sinal pneumático.

EXERCÍCIO 4.21

(Petrobras) As figuras acima representam transmissores de pressão (PT) que convertem sinais de pressão de dois reatores em sinais elétricos e pneumáticos, que são enviados aos controladores (PC). Os sinais dos transmissores foram ajustados de forma linear para faixas das variáveis: para o Reator 1, entre 3 atm e 7 atm, e para o Reator 2, entre 4 atm e 9 atm. A faixa emitida pelo transmissor elétrico encontra-se entre 4 mV e 20 mV, enquanto a faixa emitida pelo transmissor pneumático encontra-se entre 3 psi e 15 psi. Se os controladores recebem sinais de 6 psi e 12 mV, as pressões no Reator 1 e no Reator 2 são, em atm, respectivamente iguais a

- a) 6,5 e 4,0 b) 5,2 e 6,5 c) 5,2 e 4,8 d) 4,8 e 5,2 e) 4,0 e 6,5

EXERCÍCIO 4.22

(Petrobras) Analise as seguintes regras de designação de instrumentos e sistemas de instrumentação.

- I. Todas as letras de identificação funcional devem ser maiúsculas e o número total de letras agrupadas para um instrumento não deve exceder a quatro.
- II. Um instrumento que realiza duas ou mais funções deve ser designado apenas pela sua função principal.
- III. Em uma malha, a primeira letra de identificação funcional é selecionada de acordo com a variável medida, e não de acordo com a variável manipulada.

De acordo com a Norma Técnica ANSI / ISA-5.1-1984 (R 1992), é(são) correta(s) a(s) regra(s) de designação:

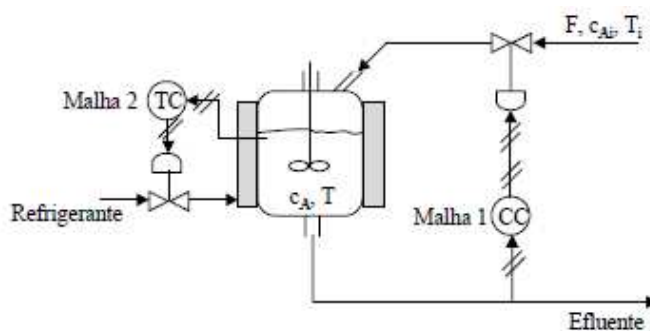
- a) I, apenas. b) II, apenas. c) I e III, apenas.
- d) II e III, apenas. e) I, II e III.

EXERCÍCIO 4.23

(Eletrobras) Considere o reator de mistura perfeita com camisa de refrigeração mostrado abaixo, no qual há duas malhas de controle (os dispositivos de medida não são mostrados para simplificar a figura):

MALHA 1: a temperatura T é controlada pelo controlador de temperatura TC, que manipula a vazão de refrigerante para a camisa;

MALHA 2: a concentração do reagente A no reator C_A é controlada pelo controlador de composição CC, que manipula a vazão de alimentação F .



Se a temperatura T_i e a concentração na alimentação C_{Ai} estão sujeitas a alterações, pode-se afirmar que:

- as malhas 1 e 2 não apresentam interação;
- a malha 1 afeta a malha 2, mas não vice-versa;
- a malha 2 afeta a malha 1, mas não vice-versa;
- as malhas 1 e 2 afetam uma a outra, mas apenas para distúrbios em T_i .
- as malhas 1 e 2 afetam uma a outra, para distúrbios em T_i e C_{Ai} .

EXERCÍCIO 4.24

(CEPS-UFPA) Considere um diagrama P&ID construído seguindo a norma ISA 5.1, apresentada na Figura 1. A partir deste diagrama, pode-se afirmar:

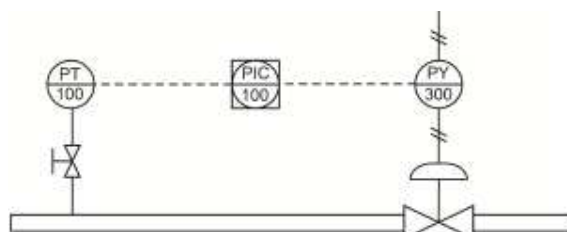


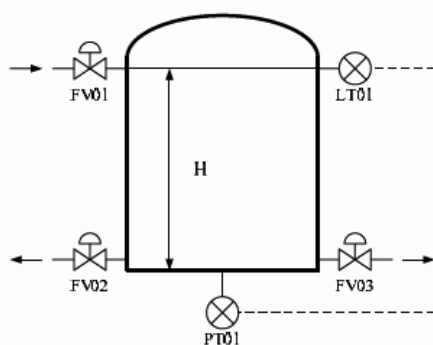
Figura 1 - Diagrama P&ID seguindo norma ISA 5.1.

- O diagrama descreve uma malha de controle de temperatura.
- O diagrama descreve uma malha de controle de pressão.
- O controlador está localizado na sala de comando.
- O controlador está localizado no campo.
- A válvula de controle é atuada através de sinal pneumático.

Estão corretas as afirmações:

- I, II e IV.
- II, IV e V.
- II, III e V.
- I, III e IV.
- II, III e IV.

(UNIFEI) As questões 4.25 a 4.27 referem-se à figura abaixo:



EXERCÍCIO 4.25

De acordo com a simbologia ISA, existem no processo:

- a) 2 válvulas de controle e 3 transmissores.
- b) 2 válvulas de controle e 3 instrumentos instalados no painel.
- c) 3 válvulas de controle e 2 transmissores.
- d) 3 válvulas de controle e 2 instrumentos instalados no painel.

EXERCÍCIO 4.26

De acordo com a simbologia ISA, as grandezas físicas medidas são:

- a) temperatura e nível.
- b) pressão e nível.
- c) pressão e temperatura.
- d) as temperaturas superior e inferior.

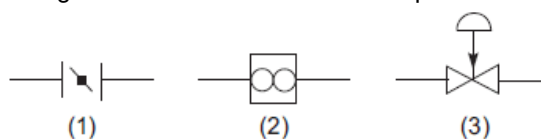
EXERCÍCIO 4.27

De acordo com a simbologia ISA, os sinais são transmitidos em um padrão:

- a) pneumático.
- b) elétrico.
- c) hidráulico.
- d) sônico.

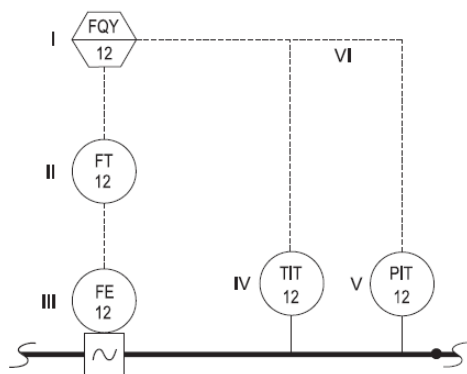
EXERCÍCIO 4.28

(Petrobras) De acordo com a Norma Técnica ANSI / ISA-5.1-1984 (R 1992), considere a simbologia de atuadores e elementos primários abaixo.



Os símbolos 1, 2 e 3 representam, respectivamente,

- a) tubo Venturi, válvula globo e válvula de 2 vias (falha indeterminada).
- b) medidor de vazão tipo rotâmetro, medidor de vazão tipo deslocamento positivo e válvula solenoide de 2 vias.
- c) válvula rotativa, medidor de vazão tipo bocal e válvula 2 vias (falha aberta).
- d) válvula borboleta, medidor de vazão tipo turbina e válvula 2 vias (falha bloqueada).
- e) válvula borboleta, medidor de vazão tipo deslocamento positivo e válvula 2 vias (falha fechada).

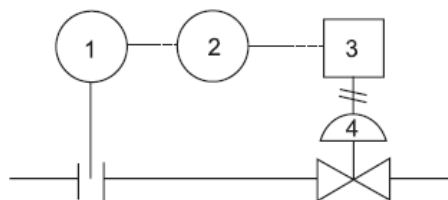
EXERCÍCIO 4.29

(Petrobras) A figura acima representa parte de um fluxograma de engenharia. Nela estão presentes seis elementos identificados por algarismos romanos. Nessa perspectiva, analise as afirmativas abaixo.

- P – O elemento I é um transmissor totalizador de fluxo, com localização primária normalmente acessível ao operador.
 - Q – O elemento II é um transmissor de fluxo, montado no campo.
 - R – O elemento III é um sensor de fluxo tipo turbina, montado no campo.
 - S – O elemento IV é um indicador de temperatura, com localização primária normalmente acessível ao operador.
 - T – O elemento V é um transmissor indicador de pressão, no campo.
 - U – O elemento VI é um sinal pneumático.
- Está correto APENAS o que se afirma em
- a) Q e T.
 - b) P, Q e S.
 - c) P, R e U.
 - d) Q, R e T.
 - e) S, T e U.

EXERCÍCIO 4.30

(Petrobras) Considere a malha abaixo.



Assinale a opção que, segundo a Norma ISA 5.1, indica corretamente as funções dos instrumentos 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

- Transmissor; Conversor; Controlador; Elemento primário.
- Transmissor; Controlador; Conversor; Elemento final de controle.
- Elemento primário; Controlador; Registrador; Elemento final de controle.
- Elemento primário; Controlador; Conversor; Elemento final de controle.
- Elemento primário; Conversor; Registrador; Elemento final de controle.

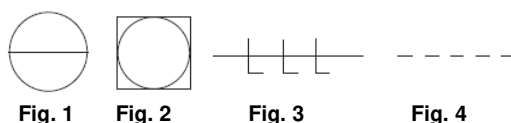
EXERCÍCIO 4.31

Fig. 1

Fig. 2

Fig. 3

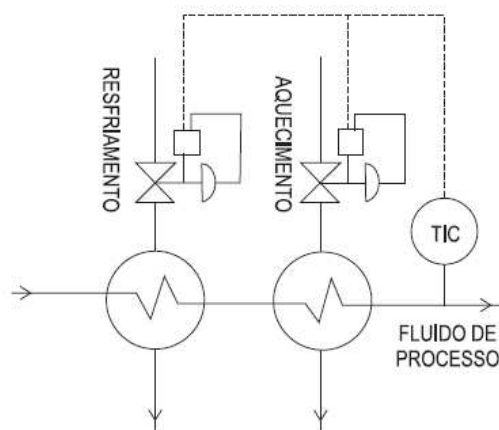
Fig. 4

(Petrobras) A utilização da Norma ISA S5.1 na indústria padroniza algumas informações, tais como apresentadas nas figuras acima. De acordo com essa Norma, analise as afirmações a seguir.

- A Figura 1 refere-se a instrumentos discretos com localização primária, acessível ao operador.
- A Figura 2 refere-se a instrumentos compartilhados montados no campo.
- A Figura 3 refere-se a um sinal hidráulico.
- A Figura 4 refere-se à ligação mecânica.

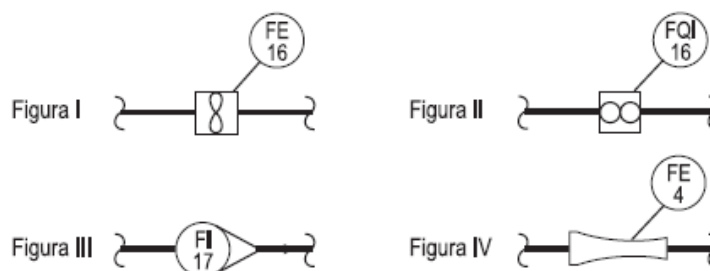
Está correto APENAS o que se afirma em

- I e II
- I e III.
- II e IV.
- I, II e III.
- II, III e IV.

EXERCÍCIO 4.32

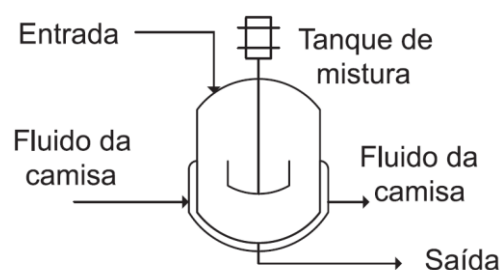
(Petrobras) No controle de temperatura ilustrado na figura acima, a ação do controlador é inversa, ou seja, quando a temperatura aumenta, o sinal de saída diminui, o que é feito pelo mesmo sinal de controle em faixa dividida. Qual acessório das válvulas de controle tem papel fundamental para a ação do sistema de controle ilustrado?

- Chave limite.
- Válvula solenoide.
- Volante.
- Posicionador.
- Sensor de temperatura.

EXERCÍCIO 4.33

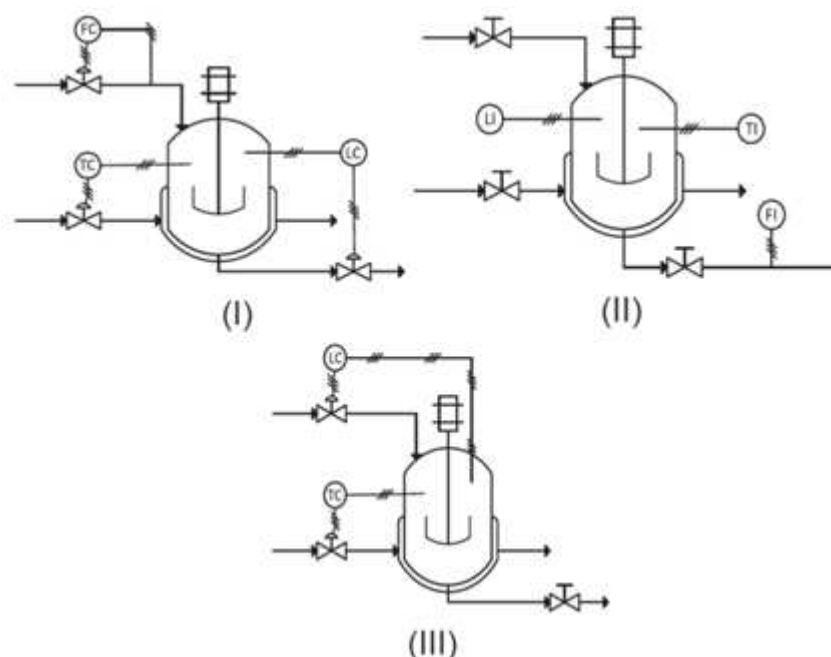
(Petrobras) As figuras mostradas acima representam instrumentos em um processo industrial. Observando a Norma ISA S5.1, a Figura

- I é um medidor de vazão tipo magnético.
- II é um sensor tipo alvo.
- II é um medidor de vazão tipo sônico.
- III é um indicador de vazão de área variável, tipo rotâmetro.
- IV é um indicador de vazão tipo placa de orifício.

EXERCÍCIO 4.34

(Petrobras) Considere um tanque de mistura encamisado, conforme apresentado na figura ao lado, alimentado a partir de um reservatório. O tanque visa à equalização da corrente de entrada, bem como o aquecimento da mesma, de forma que é necessário o controle de

temperatura mediante um fluido de aquecimento que passa através da camisa. A quantidade exigida na produção varia significativamente ao longo do mês, de acordo com as necessidades de mercado, demandando da equipe de engenheiros e técnicos o ajuste das condições de acordo com a produção requerida. Abaixo estão representadas, de forma simplificada, malhas de controle possíveis. Os símbolos L, F e T, representam, respectivamente, Nível, Vazão e Temperatura. Os símbolos C e I representam, respectivamente, Controlador e Indicador.

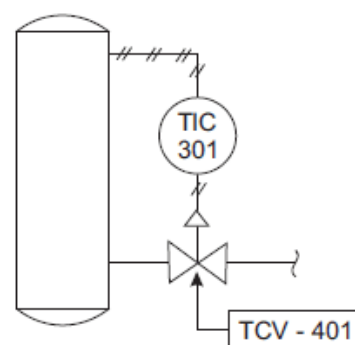


Para modificações frequentes na quantidade processada, a(as)

- a) configuração I é a mais adequada, pois requer o ajuste apenas do set point da vazão.
- b) configuração II é a mais adequada, pois permite o ajuste manual de todas as válvulas.
- c) configuração III é a mais adequada, e o operador apenas precisará modificar os set points do controlador do nível e do controlador de temperatura.
- d) configurações II e III são igualmente adequadas, havendo necessidade de ajuste em todos os controles.
- e) configurações I, II e III são igualmente adequadas, havendo necessidade de ajuste em todos os controles.

EXERCÍCIO 4.35

(Petrobras) Um técnico de manutenção está consultando o fluxograma de uma instalação industrial quando se depara com a figura ao lado. Sabendo-se que o fluxograma foi realizado com base na Norma ISA 5.1, esse é um

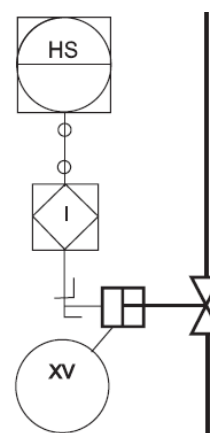


- a) controlador de temperatura tipo cego comandando uma válvula de controle com transmissão pneumática.
- b) instrumento combinado de registro e controle de temperatura, no painel, comandando uma válvula de controle com transmissão elétrica.
- c) instrumento combinado de registro e controle de temperatura, no painel, comandando uma válvula de controle com transmissão pneumática.
- d) indicador-controlador de temperatura comandando uma válvula de controle com transmissão elétrica.
- e) indicador-controlador de temperatura comandando uma válvula de controle com transmissão pneumática.

EXERCÍCIO 4.36

(Petrobras) Assinale a opção que caracteriza corretamente a atuação da malha ao lado, segundo a Norma ISA 5.1.

- a) Atuação na linha de processo por meio de uma chave manual em válvula com atuador hidráulico.
- b) Atuação na linha de processo por meio de um alarme de valor alto (high) em válvula com atuador pneumático/diafragma.
- c) Atuação na linha de processo por meio de um sensor de pressão em válvula com atuador hidráulico.
- d) Atuação na linha de processo por meio de um conversor de sinais em válvula com controle elétrico.
- e) Obtenção de informações da linha de processo por meio de um elemento primário de vazão e envio para um alarme de valor alto (high).



EXERCÍCIO 4.37

A figura 4.2 representa um trocador de calor a placas (PHE) que aquece uma corrente de processo via vapor saturado condensante. Uma malha de controle tipo cascata foi construída para manutenção da temperatura de saída do fluido de processo. Traduza a figura para um fluxograma de Engenharia (P&ID) utilizando a simbologia e nomenclatura ISA 5.1. Represente todos os equipamentos nomeados na figura.

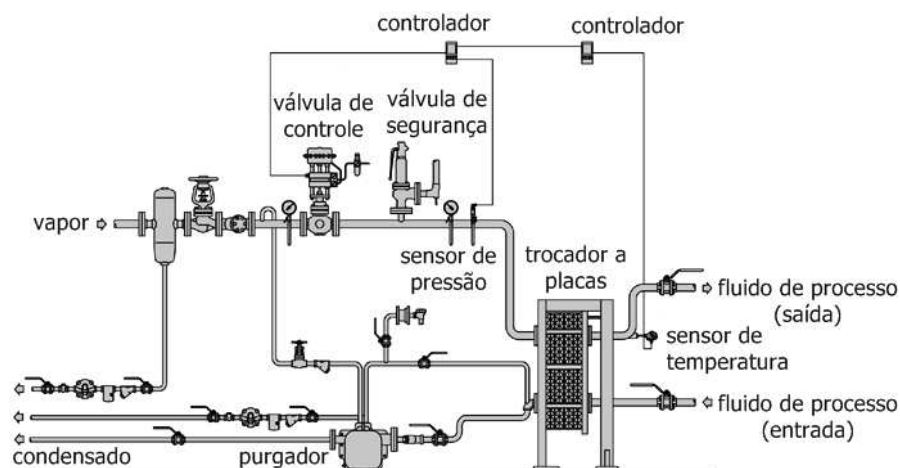


Figura 4.2 – Trocador de calor a placas do exercício 4.35.

EXERCÍCIO 4.38

A partir das informações do descritivo de processo abaixo, construa um P&ID.

“O produto A, contendo certo teor de umidade (água), é alimentado continuamente por um distribuidor no topo da torre de stripping T-101 (tipo recheio randômico), via controle de fluxo redundante. O ponto de trabalho (set point) é de 1.500 kg/h, com a faixa de escala dos medidores de 0–2.000 kg/h. Um alarme acende na sala de controle ao desvio de leitura dos medidores de vazão igual a 3%.

Esta coluna opera com ar de processo seco para remoção da umidade, sendo este admitido pelo fundo da T-101 acima do nível de líquido via controle de fluxo simples com ponto de trabalho de 100 Nm³/h, faixa do medidor de 0–200 Nm³/h. Esta malha de vazão trabalha intertravada com a alimentação de A, em que na falta deste todo o processo é interrompido.

A pressão diferencial do gás através do recheio é medida e registrada, sendo esta o elemento primário para evitar o afogamento da torre T-101, parando imediatamente o processo quando a perda de carga atinge 30 in.H₂O. Neste mesmo ponto, é aceso um alarme no painel de controle. A faixa do medidor é de 0–50 in.H₂O.

Esta coluna opera isotermicamente com temperatura ao redor de 30°C, com monitoração de seu valor de fundo e topo, além de registros enviados para a sala de controle. A faixa de trabalho dos elementos primários é de 0–50°C.

No topo da coluna tem-se o condensador E-101 (trocador tipo casco e tubos) no qual o fluido frio é água gelada, com temperatura de entrada igual a 5°C e saída de 10°C, escoando pelo feixe tubular. Para a condensação total da umidade do ar, a temperatura de saída do lado condensante é mantida em 20°C. As temperaturas do lado do fluido frio são monitoradas e registradas, com escala dos medidores de 0–50°C.

Toda água condensada é recolhida no vaso horizontal V-102, no qual é feita a separação das fases líquida e gasosa. A água é transferida à estação de tratamento da planta, enquanto a corrente gasosa (basicamente ar seco) é enviada ao sistema de abatimento via bomba de vácuo BV-102. O vaso V-102 possui medição de nível com alarmes de alta (70%) e de baixa (10%). A linha de ar conta com medição/indicação/registro de fluxo, faixa de 0–500 kg/h.

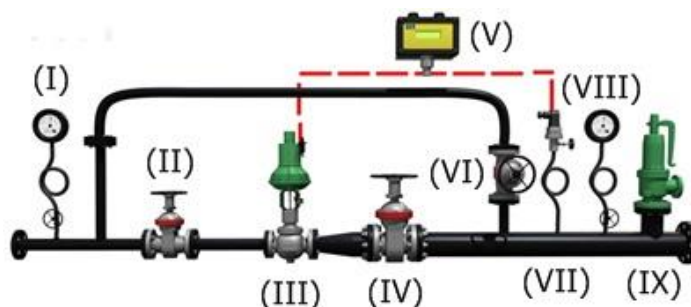
A coluna possui controle de pressão redundante para ser mantida a pressão de operação de 400 mmHg, faixa de trabalho de 0–600 mmHg. Esta malha gera também alarme de alta no painel quando se atinge 500 mmHg.

A T-101 conta com controle de nível no fundo pela bomba centrífuga B-101, mantendo o ponto de trabalho de 60% de nível. Há ainda um visor de nível e alarme de nível baixo em 10%.

A B-101, com motor elétrico setado em 60 kW e monitor de potência com faixa de trabalho de 0–100 KW, trabalha transferindo o produto A seco da T-101 para a seção de acabamento, sendo esta corrente indicada/registrada/quantificada, com medidor de fluxo com faixa de trabalho de 0–2.000 kg/h para controle de inventário da planta. A bomba possui proteção para evitar cavitação a seco ou termodinâmica, em que 20 kW parará esta bomba e soará um alarme de baixa potência em campo. O motor pode ser partido via campo ou painel.”

EXERCÍCIO 4.39

Na figura, está representada uma estação redutora de pressão para vapor de água (*steam*). Os principais instrumentos foram enumerados de I a IX.



Pede-se:

- Relacione os instrumentos enumerados e suas funções.
- Construa um P&ID correspondente a este sistema.
- Por que é importante a presença do desvio (*bypass*)?

ESTUDO DE CASO

UNIDADE DE PRODUÇÃO DE CUMENO

ESTOCAGEM DE REAGENTES

Benzeno puro (C_6H_6) é estocado nos vasos semelhantes V-01A e V-01B a temperatura ambiente ($25^\circ C$) e 1,2 bar (abs). Por apresentar riscos ao meio ambiente e à saúde quando exposto à atmosfera, faz-se a pressão no interior do vaso ser mantida por um “colchão” de nitrogênio acima do nível de líquido; gás inerte que é liberado em lugar do benzeno à atmosfera no momento em que as válvulas de segurança PSV-01A/B são abertas (pressão no vaso excede 2,9 bar (abs)). A pressão do V-01A/B é controlada pela válvula de controle PCV-01, localizada na linha de alimentação de nitrogênio, enquanto o nível de benzeno é controlado pela LCV-01, instalada na descarga da bomba centrífuga P-01.

Propileno líquido (C_3H_6) com 5 mol% de impureza na forma de propano (C_3H_8) (TURTON et al., 2009) é armazenado na esfera S-01 a pressão de 4 bar (abs). Para que a temperatura no interior da S-01 seja mantida em $-13,0^\circ C$, emprega-se um sistema de refrigeração, CH-100, que utiliza R-134a como fluido térmico vaporizando a $-20,0^\circ C$. A temperatura da S-01 é controlada pela TCV-01, localizada na linha de entrada da serpentina, enquanto o nível de propileno é mantido pela LCV-03, instalada na descarga da bomba centrífuga P-03.

ETAPA 1 – ALIMENTAÇÃO

A bomba P-01 transfere benzeno do V-01A/B para o vaso V-02, mantido a 1,2 bar (abs). Neste vaso também é alimentada uma segunda corrente contendo benzeno impuro reciclado do processo a 98,88°C. O reciclo de benzeno é o produto de topo da coluna de fracionamento C-01 e encerra pequena quantidade de propano. O nível do V-02 é controlado pela LCV-02, localizada na descarga da bomba centrífuga P-02.

A bomba centrífuga P-03 é responsável pela transferência de propileno da S-01 para o reator R-01.

Sendo as condições do meio reacional 25 bar (abs), 358,5°C e fase gasosa (LUIBEN, 2011), faz-se necessário que os reagentes sejam pressurizados, vaporizados e aquecidos.

O serviço de elevação da pressão para o valor requerido é essencialmente executado pelas bombas centrífugas P-02 (benzeno) e P-03 (propileno).

A corrente de benzeno enviada pela P-02 é aquecida de 65,9°C até 180,0°C no trocador E-10, cujo calor é proveniente de parte do vapor saturado a 15 bar (abs) gerado no reator. O condensado e a parcela restante de vapor são enviados ao sistema de refrigeração CH-100, de onde partem na forma de água a 40°C de volta à torre de resfriamento. A vaporização do benzeno ocorre a 240,14°C no trocador casco e tubos E-20, sendo o calor recebido da mistura gasosa efluente do R-01, que entra pelo casco a 358,50°C e abandona o mesmo a 248,86°C.

A vaporização do propileno ocorre a 61,1°C no trocador casco e tubos E-30, sendo também a mistura efluente do reator o fluido térmico de aquecimento. Esta mistura entra pelo casco a 248,86°C e abandona o mesmo a 212,90°C. Desta maneira, os trocadores de calor E-10, E-20 e E-30 são recuperadores da energia liberada no reator R-01. A corrente gasosa de propileno tem enfim sua temperatura elevada a 240,14°C no trocador casco e tubos E-40, utilizando-se como fluido de aquecimento vapor superaquecido a 40 bar (abs) e 450°C.

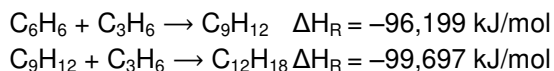
Tanto a linha de benzeno efluente do E-20 (corrente 06) quanto a de propileno gasoso que deixa o E-40 (corrente 10) têm suas temperaturas controladas por válvulas de controle localizadas na alimentação do fluido de aquecimento. Ambas as correntes também possuem controle de vazão e válvulas de retenção, de modo a impedir contra fluxo no ponto de união das mesmas.

Os reagentes gasosos são aquecidos de 240,14°C para 358,0°C no trocador casco e tubos E-50 por vapor de água superaquecido nas mesmas condições do aquecedor E-40. A alimentação de vapor é controlada pela TCV-06. Após este aquecimento, a matéria prima entra no reator.

ETAPA 2 – REAÇÃO

O leito catalítico casco e tubos R-01 é mantido a 358,0°C e 25 bar (abs), sendo as reações decorridas em fase gasosa no interior dos tubos preenchidos pelo catalisador sólido de ácido fosfórico (porosidade de 50%). A alimentação possui razão de 2,1 kmol de benzeno para cada kmol de propileno (LUIBEN, 2011), uma vez que o excesso de benzeno inibe o surgimento de subprodutos indesejáveis. A conversão por passe do propileno é de 99% (LUIBEN, 2011).

No reator R-01 ocorrem duas reações em série - paralelo de alquilação do benzeno, sendo originado não somente cumeno (C_9H_{12}), mas também um subproduto denominado DIPB (diisopropilbenzeno) ($C_{12}H_{18}$). Pelo impedimento espacial provocado pelo radical isopropila do isopropilbenzeno, há maior formação de p-DIPB (para) em relação ao isômero m-DIPB (meta). A seletividade da reação é de 47,9 kmol de cumeno para cada kmol de DIPB (LUYBEN, 2011). Propano admitido ao R-01 como impureza do propileno é inerte no meio reacional. Segue a estequiometria e as entalpias globais das reações a 25 bar (abs) e 358,0°C.



Ambas as reações são muito exotérmicas, o que requer resfriamento para que a temperatura seja mantida constante. Este é promovido por uma corrente de água de resfriamento a 30°C que escoar de baixo para cima através do casco do R-01 e abandona o mesmo na forma de vapor saturado a 15 bar (abs).

A temperatura do reator R-01 é controlada indiretamente pela pressão do vapor saturado, enquanto o nível de água do casco é controlado pela LCV-04, localizada na alimentação de água. Completando o controle, estão instalados na saída do R-01 medidores de vazão, pressão e temperatura; no casco, a válvula de segurança PSV-02, que abre a 19,5 bar (abs).

ETAPA 3 – PURIFICAÇÃO

A corrente gasosa que abandona o reator, a 358,5°C, é constituída por benzeno, propileno, propano, cumeno e DIPB. A separação desta mistura ocorre em três equipamentos na seguinte ordem: despropanizador (V-03), coluna de benzeno reciclado (C-01) e coluna de cumeno (C-02). Como sugerem os nomes, são responsáveis pela separação por diferença de volatilidade da maior quantidade de propano / propileno, benzeno e cumeno, respectivamente.

Após os produtos gasosos serem resfriados até 214,68°C na saída do E-30 (conforme mencionado na etapa 2), a pressão é reduzida para 2,85 bar (abs) através da passagem pela válvula redutora VR-01.

O trocador casco e tubos E-60 promove a condensação dos gases a 90°C e 2,85 bar (abs) em contracorrente com água de resfriamento a 30°C. A mistura líquida é então admitida ao tambor de *flash* V-03 denominado despropanizador.

O tambor de *flash* V-03 opera a 90°C e 1,75 bar (abs) de pressão. Neste vaso ocorre “flasheamento” da alimentação, separando-se um vapor que carrega todo o propileno não reagido, parte do propano inicialmente alimentado (51,1 mol% do vapor) e moderada quantidade de benzeno (39 mol%) (LUYBEN, 2011). A fase gasosa separada é succionada pelo compressor centrífugo J-10 e descarregada a 5,25 bar (abs) para a fornalha. Por sua vez, a fase líquida é transferida pela bomba centrífuga P-04 para a coluna de fracionamento C-01.

A pressão do V-03 é controlada pela PCV-06, localizada na linha de vapor separado; a temperatura é controlada pela

TCV-07, instalada na alimentação de água do E-60 e o nível é controlado pela LCV-05, instalada na descarga da bomba centrífuga P-04.

O líquido separado no V-03 sofre destilação fracionada na coluna de pratos C-01 a 1,75 bar (abs). O vapor de topo encerra benzeno (95,5 mol%) e todo o propano alimentado no equipamento, enquanto o resíduo é constituído de benzeno (0,049 mol%), cumeno e DIPB (TURTON et al., 2009).

A condensação total do vapor ocorre no trocador E-70 a 98,88°C empregando-se água de resfriamento disponível a 30°C. O condensado é recolhido no acumulador V-04. A bomba centrífuga P-05 é responsável pelo refluxo de topo e pelo envio do destilado obtido (benzeno reciclado) ao V-02 (como visto na etapa 2). A razão de refluxo externa é igual a 0,44 (TURTON et al., 2009).

A bomba centrífuga P-06 bombeia parte do produto de fundo para o refeedor E-80 a 174,76°C. Neste trocador é utilizado vapor saturado a 40 bar (abs). A fase vaporizada é reciclada, enquanto a parcela restante do produto de fundo é enviada para a coluna de fracionamento C-02.

A pressão da C-01 é controlada pela PCV-08, localizada na alimentação de água do E-70; o nível de líquido no fundo da coluna é controlado pela LCV-06, instalada na descarga da P-06; o nível no V-04 é mantido pela LCV-07, localizada na descarga da P-05; a vazão de reciclo de topo é controlada pela válvula FCV-05 utilizando-se como parâmetro a vazão de alimentação da coluna (LUYBEN, 2011) e a temperatura da C-01 é mantida pela TCV-08, instalada na alimentação de vapor do E-80.

O produto de fundo separado na C-01 sofre nova destilação na coluna C-02 a 1,0 bar (abs). O vapor de topo encerra cumeno (99,9 mol%) e quantidade equimolar de benzeno e DIPB, enquanto o resíduo é constituído de cumeno (0,1 mol%) e DIPB (TURTON et al., 2009).

A condensação total do vapor ocorre no trocador E-90 a 152,37°C empregando-se água de resfriamento a 30°C. O condensado é recolhido no acumulador T-01. A bomba P-07 é responsável pelo refluxo de topo e pelo envio do destilado obtido (cumeno praticamente puro) aos vasos semelhantes V-05A e V-05B. Antes de ser estocado, o cumeno é resfriado no trocador de calor E-110. A razão de refluxo externa é igual a 0,63 (TURTON et al., 2009).

A bomba centrífuga P-08 bombeia parte do resíduo para o refeedor E-100 a 210,37°C. Neste trocador é utilizado vapor saturado a 40 bar (abs). A fase vaporizada é reciclada e o produto de fundo restante (DIPB puro) é enviado ao tanque T-02. Antes de ser estocado, o DIPB é resfriado no E-120.

A pressão da C-02 é controlada pela PCV-09, localizada na alimentação de água do E-90; o nível de líquido no fundo da coluna é controlado pela LCV-08, instalada na descarga da P-08; o nível no T-01 é mantido pela LCV-09, localizada na descarga da P-07; a vazão de reciclo de topo é controlada pela válvula FCV-06 utilizando-se como parâmetro a vazão de alimentação da coluna (LUYBEN, 2011) e a temperatura da

C-02 é mantida pela TCV-09, instalada na alimentação de vapor do E-100.

ESTOCAGEM DE PRODUTOS

O cumeno obtido como destilado da C-02 é resfriado no trocador casco e tubos E-110 de 152,37°C para 40,0°C – 4,0°C abaixo do seu ponto de fulgor à pressão atmosférica (SCHULZ, VAN OPDORP & WARD 1993) – antes de ser então armazenado nos vasos V-05A e V-05B. Para este serviço, é utilizada água da torre de resfriamento disponível a 30°C, empregando-se uma variação de temperatura igual a 10°C. Como o cumeno sofre oxidação quando exposto ao ar atmosférico, o vaso V-05A/B é fechado e submetido a 1,1 bar (abs). O produto ainda representa riscos ao ambiente e à saúde quando liberado à atmosfera. Assim, faz-se a pressão no interior do vaso ser controlada por uma “camada” de nitrogênio acima do nível de líquido; gás inerte que é liberado em lugar do cumeno à atmosfera no momento em que a válvula de segurança PSV-05A/B é aberta (pressão no vaso excede 2,8 bar (abs)).

O DIPB obtido como resíduo da C-02 é resfriado no trocador duplo-tubo E-120 de 210,37°C para 50°C antes de ser então armazenado no tanque atmosférico T-02. Para este serviço, é utilizada água de resfriamento. O DIPB é utilizado como óleo combustível em outra planta industrial.

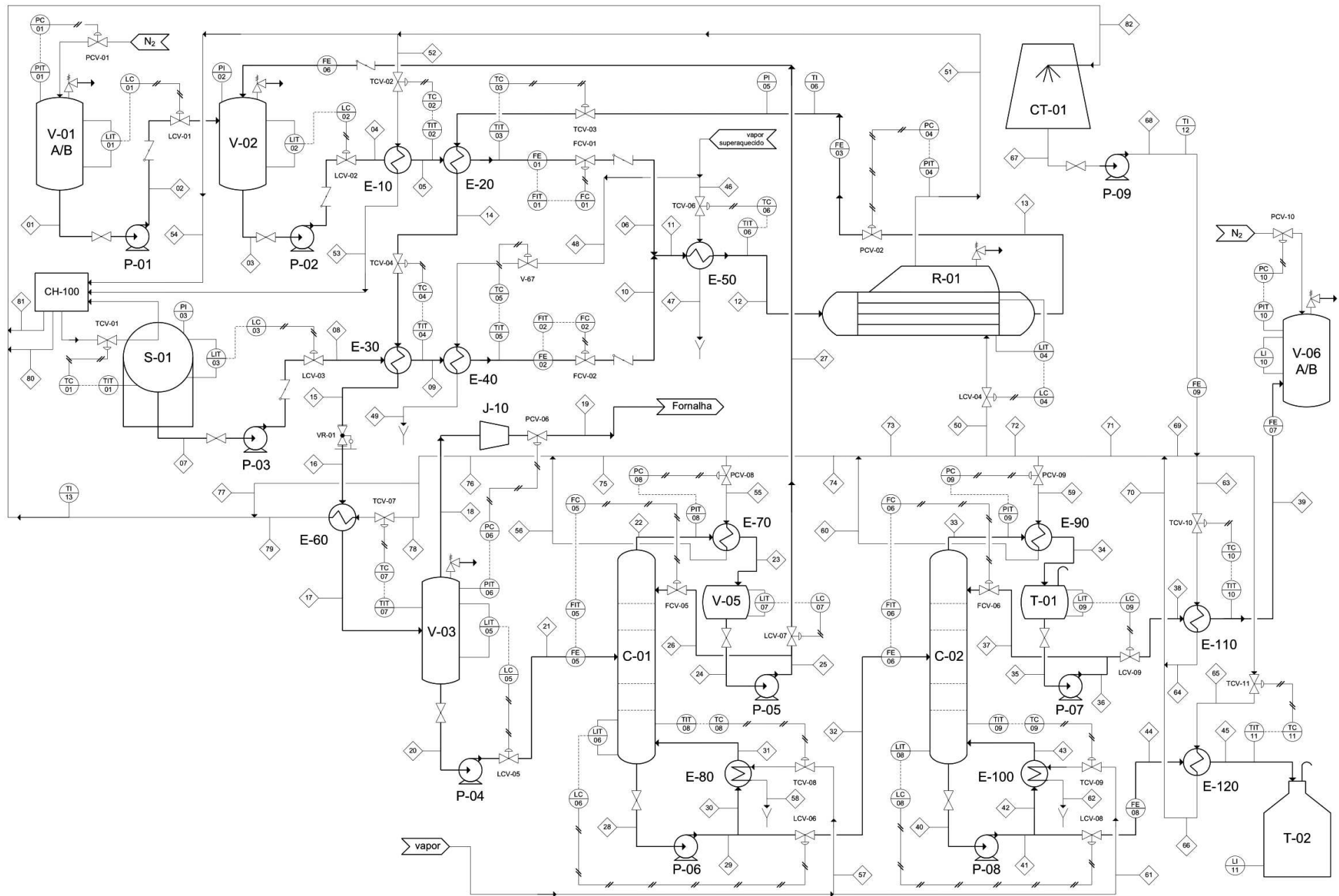
TORRE DE RESFRIAMENTO

A torre de resfriamento de água CT-01 promove a redução da temperatura de 40°C para 30°C. Elementos de temperatura TI-13 e TI-12 estão localizados respectivamente nas linhas de entrada e de saída da torre. A movimentação da água no ciclo é feita pela bomba centrífuga P-09.

Em todos os trocadores de calor, água de resfriamento escoar pelo feixe de tubos a fim de minimizar problemas envolvendo incrustação. No reator R-01, água vaporiza no interior do casco a 15 bar (abs) e retorna ao estado líquido a 40°C em função do resfriamento feito pelo sistema CH-100.

REFERÊNCIAS CITADAS

LUYBEN, W. L. *Principles and Case of Studies of Simultaneous Design* 1ed. New Jersey: Wiley, 2011.
 SCHULZ, R. C.; VAN OPDORP, P. J.; WARD, D. J. (1993) *Cumene*. In: *Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology* 4ed. New York: John Wiley & Sons.
 TURTON et al. *Analysis, Synthesis and Design of Chemical Processes* 3ed. Massachusetts: Prentice Hall, 2009.



5. PLACA DE ORIFÍCIO

Uma placa de orifício é uma fina chapa metálica na qual é perfurado um orifício. Uma das normas que padronizam sua **construção** é a **ISA R.P. 3.2**.

A placa é inserida no interior da tubulação da qual se deseja medir a vazão entre dois flanges, tendo, em geral, o centro do seu orifício alinhado ao centro da tubulação. Outros tipos de orifícios são mostrados na figura 5.1.



Figura 5.1 – Tipos de orifícios.

- **Concêntrico:** tipo mais comum e que fornece o menor erro de medição (em geral, adota-se para placas de orifício $\pm 2\%$). É empregado para fluidos limpos;
- **Excêntrico:** utilizado para fluidos bifásicos (líquido + vapor/gás). Passível de maiores erros de medição e
- **Segmental:** serviços com fluidos que contenham sólidos suspensos. É o tipo de maior faixa de imprecisão.

5.1 PRINCÍPIO DE MEDIÇÃO

Quando o fluxo encontra a restrição imposta pela placa (figura 5.2), seu sentido é alterado bruscamente, o que causa uma elevação da pressão estática no ponto de entrada do orifício. A área de escoamento, antes dada pelo diâmetro interno da tubulação, passa a ser a área do orifício. Esta redução implica no aumento da velocidade e, conseqüentemente, na diminuição da pressão. O ponto em que a velocidade (pressão dinâmica) é máxima e a área e pressão estática são mínimas é denominado “**vena contracta**” (veia contraída).

Após a passagem pela “vena contracta”, o fluido sofre expansão e recupera uma pequena parcela da energia cinética na forma de pressão. Entretanto, a maior parte é perdida na forma de **perda de carga por atrito** (NRPD, non recoverable pressure drop), o que se mostra como desvantagem deste tipo de medidor. Através da pressão diferencial é feita a medição da vazão (medidor **deprimogênio**).

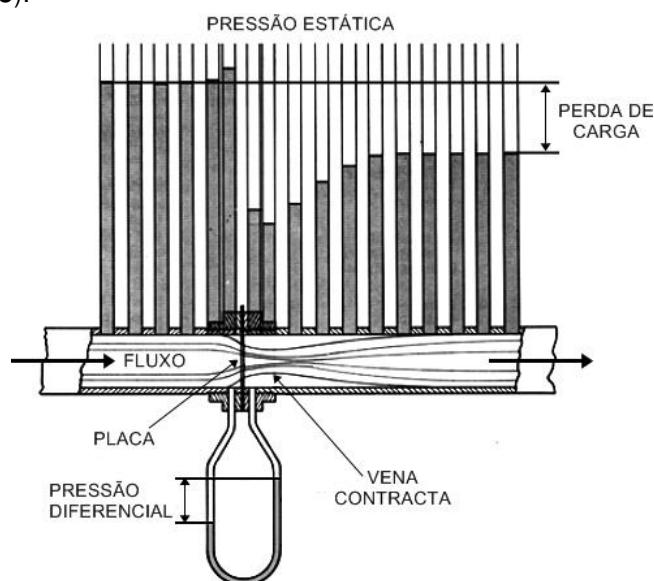


Figura 5.2 – Perfil hidráulico da passagem de um fluido através de uma placa de orifício.

Considere a aplicação da equação de Bernoulli entre um ponto imediatamente antes da perturbação e outro localizado no interior do orifício:

$$\frac{P}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + z = \frac{P_0}{\gamma} + \frac{v_0^2}{2g} + z_0 \quad (5.1)$$

Rearranjando e desprezando desnível entre os pontos:

$$v_0^2 - v^2 = 2g \frac{\Delta P}{\gamma} \rightarrow v_0^2 - v^2 = 2 \frac{\Delta P}{\rho} \quad (5.2)$$

Pode-se ainda aplicar a lei da continuidade:

$$v A = v_0 A_0 \rightarrow v = v_0 \frac{A_0}{A} = v_0 \frac{\frac{\pi d^2}{4}}{\frac{\pi D^2}{4}} \rightarrow v = v_0 \left(\frac{d}{D} \right)^2 \rightarrow v^2 = v_0^2 \left(\frac{d}{D} \right)^4 \quad (5.3)$$

Substituindo 5.3 em 5.2:

$$v_0^2 \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^4 \right] = 2 \frac{\Delta P}{\rho} \rightarrow v_0 = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \sqrt{2 \frac{\Delta P}{\rho}}, \quad \beta = \frac{d}{D} \quad (5.4)$$

Multiplicando-se ambos os membros pela área do orifício, obtemos a vazão:

$$Q_{\text{teórica}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} A_0 \sqrt{2 \frac{\Delta P}{\rho}} \quad (5.5)$$

Entretanto, na equação 5.1 não foi considerada a perda de carga da placa. Logo, assumiremos a correção da vazão por uma constante C_d :

$$Q = \frac{C_d}{\sqrt{1 - \beta^4}} A_0 \sqrt{2 \frac{\Delta P}{\rho}} \rightarrow Q = C A_0 \sqrt{2 \frac{\Delta P}{\rho}}, \quad C = \frac{C_d}{\sqrt{1 - \beta^4}} \quad (5.6)$$

- A vazão é **diretamente proporcional** à raiz quadrada da pressão diferencial;
- β é a razão entre o diâmetro do orifício, d , e o diâmetro da tubulação, D ;
- O valor $\sqrt{1 - \beta^4}$ é denominado **fator de aproximação**;
- C_d é o **coeficiente de descarga** e
- C é o **coeficiente de escoamento** (ou fluxo), definido como a razão entre C_d e $\sqrt{1 - \beta^4}$.

5.2 DIMENSIONAMENTO DE PLACAS PARA LÍQUIDOS

Limitações do método [Norma ISO 5167-2 (2003)]:

- $d \geq 0,5''$
- $2'' \leq D \leq 40''$
- $0,1 \leq \beta \leq 0,75$
- $Re \geq 5000$
- $Re \geq 4,318 D \beta^2$

Roteiro de cálculo para placa de orifício com tomadas nos flanges (flange taps, figura 5.4)

1º) Arbitrar um valor para a razão β e calcular o diâmetro do orifício através da equação 5.7:

$$d = \beta D \quad (5.7)$$

d diâmetro do orifício, em in.

D diâmetro interno da tubulação (tabela IPS, APÊNDICE 3), em in.

2º) Calcular o número adimensional de Reynolds, Re , através da equação 5.8:

$$Re = 50,6 \cdot \frac{Q}{D} \cdot \frac{\rho}{\mu} \quad (5.8)$$

Q vazão volumétrica de líquido, em gpm

D diâmetro interno da tubulação, em in.

ρ massa específica do líquido, em lb/ft³

μ viscosidade absoluta do líquido, em cP

3º) Obter o coeficiente de fluxo, C , através da figura 5.3, em função de β e Re . Exemplo: para $\beta = 0,65$ e $Re = 100000$, lê-se $C = 0,68$. Uma alternativa analítica é a aplicação da equação de Reader-Harris/Gallagher (5.9), determinando-se o coeficiente de descarga e , posteriormente, o de fluxo através da equação 5.11.

$$C_d = 0,5961 + 0,0261 \beta^2 - 0,216 \beta^8 + 0,000521 \left(\frac{10^6 \beta}{Re} \right)^{0,7} + (0,0188 + 0,0063 A) \beta^{3,5} \left(\frac{10^6}{Re} \right)^{0,3} +$$

$$+ (0,043 + 0,080 e^{-10/d} - 0,123 e^{-7/d}) (1 - 0,11 A) \left(\frac{\beta^4}{1 - \beta^4} \right) -$$

$$- 0,031 \left\{ \frac{2}{d(1 - \beta)} - 0,8 \left[\frac{2}{d(1 - \beta)} \right]^{1,1} \right\} \beta^{1,3} \quad (5.9)$$

$$A = \frac{19000 \beta}{Re}$$

Para $d \leq 2,8$ in., acrescentar a parcela $+ 0,011 (0,75 - \beta) (2,8 - d)$ à equação 5.9.

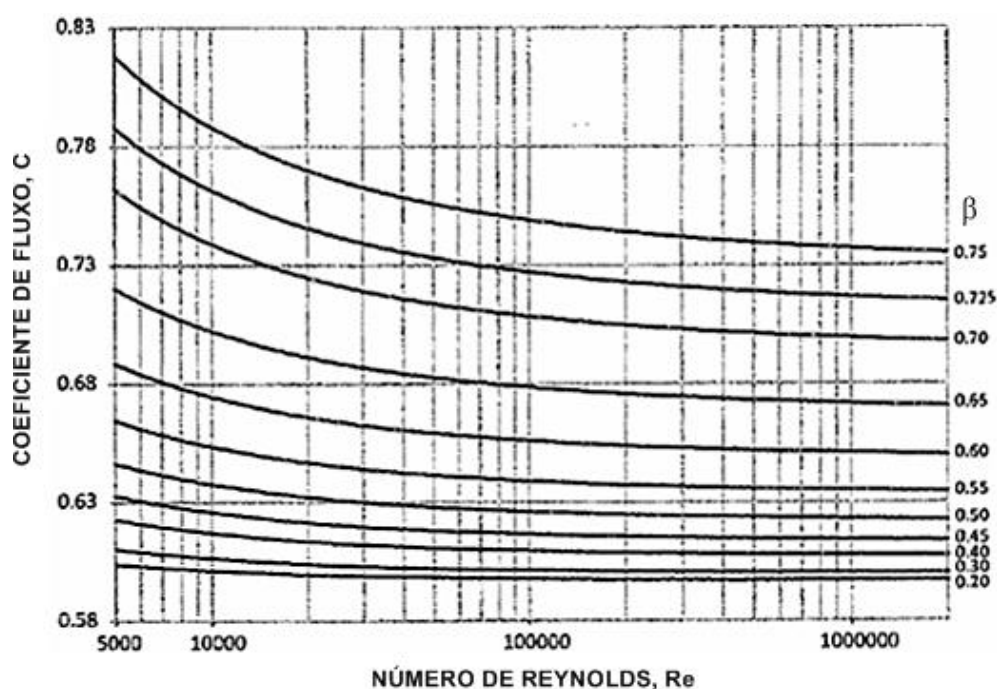


Figura 5.3 – Coeficiente de fluxo em função do número de Reynolds e da razão β .

4º) Calcular a pressão diferencial, ΔP , através da equação de projeto 5.10:

$$Q = 235,6 \cdot d^2 \cdot C \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \quad (5.10)$$

Q vazão volumétrica de líquido, em gpm

d diâmetro do orifício, em in.

C coeficiente de fluxo, adimensional

ΔP pressão diferencial, em psi

ρ massa específica do líquido, em lb/ft³

5º) Calcular o coeficiente de descarga, C_d , através da equação 5.11:

$$C_d = C \sqrt{1 - \beta^4} \quad (5.11)$$

6º) Calcular a perda de carga por atrito da placa, NRPD, utilizando a equação 5.12:

$$NRPD = h_{f,PLACA} = \Delta P \cdot \left[\frac{\sqrt{1 - \beta^4(1 - C_d^2)} - C_d\beta^2}{\sqrt{1 - \beta^4(1 - C_d^2)} + C_d\beta^2} \right] \quad (5.12)$$

7º) Caso a perda de carga por atrito esteja entre 1 e 4 psi, a mesma é razoável e a placa é adequada ao serviço. Do contrário, arbitrar novo valor de β e repetir os 7 passos apresentados.

Nota: a pressão diferencial, ΔP , é a diferença entre as pressões estáticas medidas 1 in. à montante e 1 in. à jusante da placa. A perda de carga, h_f , é a diferença entre as pressões estáticas medidas 1 D à montante e 6 D à jusante da placa (teoricamente).

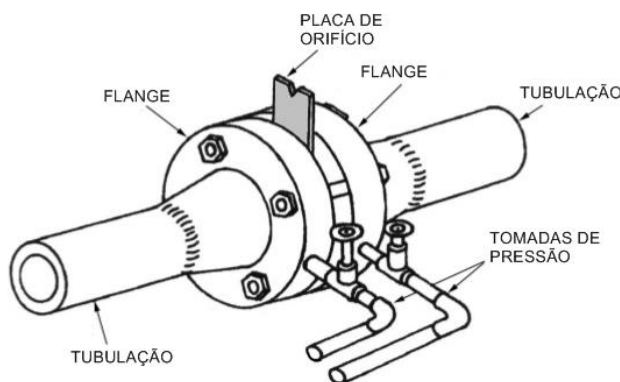


Figura 5.4 – Placa de orifício com tomadas nos flanges (flange taps).

EXERCÍCIO 5.1

Água de resfriamento escoar através de uma tubulação de aço de diâmetro nominal 2" Sch 40 a vazão de 20 ton/h. Considere a massa específica e a viscosidade da água na temperatura de escoamento iguais a 1 kg/L e 0,9 cP. Dispondo-se de duas placas, A e B, cujos diâmetros dos orifícios são, nesta ordem, 26,251 mm e 34,126 mm, qual delas você selecionaria para a realizar a medição desta corrente de água? Justifique.

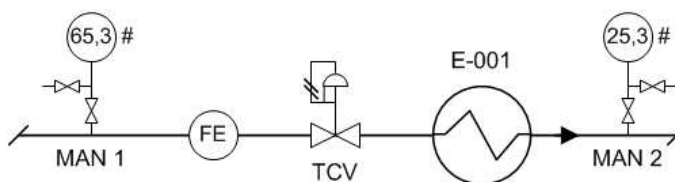
EXERCÍCIO 5.2

Dimensione uma placa de orifício para resina epoxy (tubulação Sch 40), de modo que a perda de carga por atrito seja inferior a 5 psi. Dados para projeto:

- | | |
|---|-------|
| a) Vazão de projeto (kg/h): | 70000 |
| b) Massa específica (kg/m ³): | 1050 |
| c) Viscosidade (mPa.s): | 25 |
| d) Velocidade recomendada (m/s): | 4 |

EXERCÍCIO 5.3

Uma mistura de 7000 kg/h de benzeno ($\rho = 879 \text{ kg/m}^3$; $\mu = 0,65 \text{ cP}$) e 13000 kg/h de tolueno ($\rho = 866 \text{ kg/m}^3$; $\mu = 0,50 \text{ cP}$) escoam no sistema ilustrado abaixo. Considere a leitura dos manômetros e diâmetro de 3" Sch 40.



Determine o valor do diâmetro do orifício da placa FE de modo a atender às seguintes perdas de carga por atrito: trechos retos de tubulação – entre MAN 1 e FE: 10 ft; entre FE e TCV: 5 ft; entre TCV e E-001: 15 ft; entre E-001 e MAN 2: 4,5 ft; trocador E-001: 10 psi e válvula de controle TCV: 15 psi.

5.3 DIMENSIONAMENTO DE PLACAS PARA GASES

Limitações do método [Norma ISO 5167-2 (2003)]:

- $d \geq 0,5''$
- $2'' \leq D \leq 40''$
- $0,1 \leq \beta \leq 0,75$
- $Re \geq 5000$
- $Re \geq 4,318 D \beta^2$
- $0,80 \leq P_2 / P_1 < 1,00$
- $\Delta P \leq 36,31 \text{ psi}$

Roteiro de cálculo para placa de orifício com tomadas nos flanges

- 1º) Arbitrar um valor para a razão β e calcular o diâmetro do orifício através da equação 5.7.
- 2º) Calcular o número adimensional de Reynolds, Re , através da equação 5.8.
- 3º) Obter o coeficiente de fluxo, C , através da figura 5.3, em função de β e Re , ou pelo método analítico (equações 5.9 e 5.11).
- 4º) Calcular a pressão diferencial, ΔP , através da equação de projeto 5.13:

$$Q = 0,525 \cdot Y \cdot d^2 \cdot C \cdot \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \quad (5.13)$$

Q vazão volumétrica de líquido, em acfs

d diâmetro do orifício, em in.

C coeficiente de fluxo, adimensional

ΔP pressão diferencial, em psi

ρ massa específica do gás, em lb/ft³

Y fator de expansão, adimensional (obtido pela equação 5.14 ou pela figura 5.5)

$$Y = 1 - (0,351 + 0,256 \beta^4 + 0,93 \beta^8) \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{k}} \right] \quad (5.14)$$

Na equação 5.14, k é a constante isoentrópica, definida como a razão entre os calores específicos molares a pressão e a volume constantes.

$$k = \frac{M_{Cp}}{M_{Cv}} \quad (5.15)$$

O calor específico molar a volume constante de um gás é obtido pela equação 5.16.

$$M_{Cv} = M_{Cp} - R \quad (5.16)$$

A constante universal dos gases, R , pode assumir, por exemplo, os valores:

$$1,987 \text{ kcal} / (\text{kmol} \cdot \text{K}) = 1,987 \text{ Btu} / (\text{lbmol} \cdot ^\circ\text{R})$$

$$8,314 \text{ kJ} / (\text{kmol} \cdot \text{K})$$

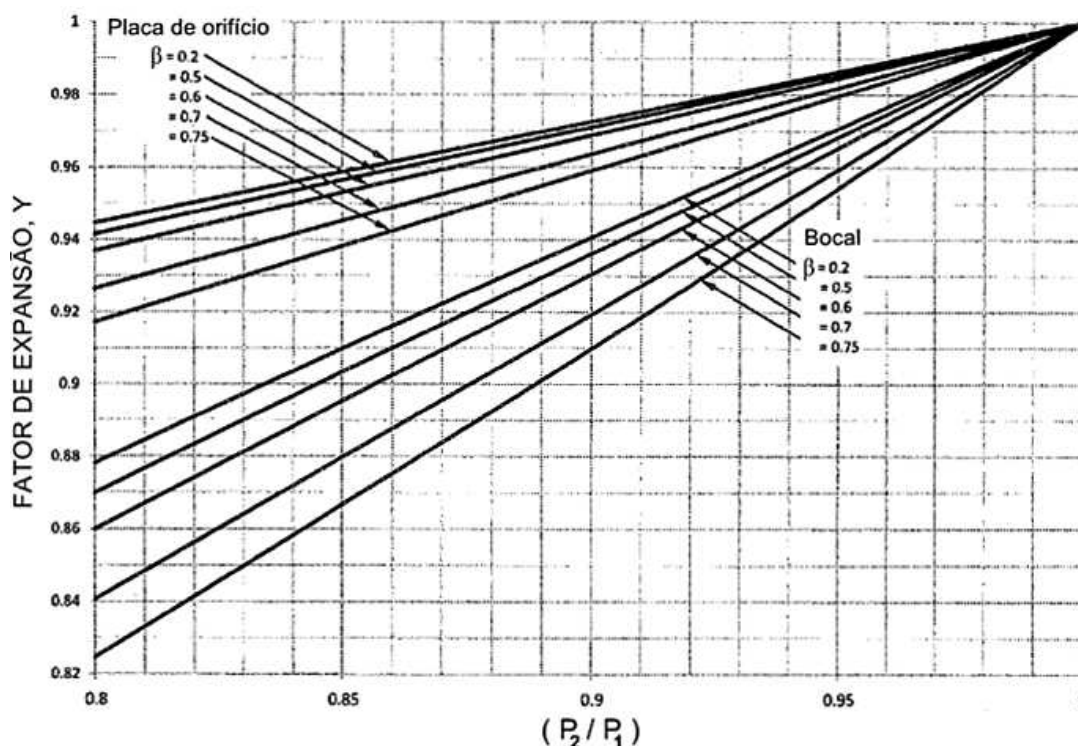


Figura 5.5 – Fator de expansão em função das razões P_2 / P_1 e β .

- 5º) Calcular o coeficiente de descarga, C_d , através da equação 5.11.
- 6º) Calcular a perda de carga por atrito da placa, $NRPD$, utilizando a equação 5.12.
- 7º) Caso a perda de carga por atrito esteja entre 1 e 2 psi, a mesma é razoável e a placa é adequada ao serviço. Do contrário, arbitrar novo valor de β e repetir os 7 passos apresentados.

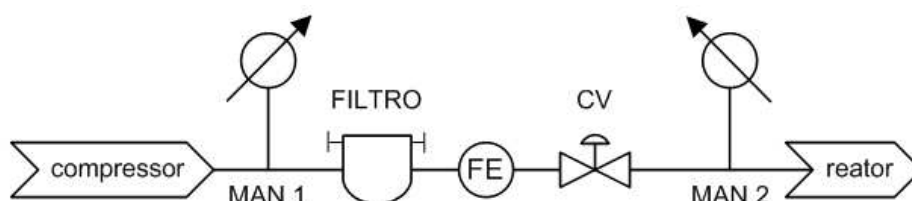
EXERCÍCIO 5.4

Cloro gasoso a 77°F e vazão de $785,7 \text{ scfm}$ é transferido por um compressor até um reator de alquilação, conforme o sistema a seguir. O instrumento FE é uma placa de orifício com tomadas nos flanges com $\beta = 0,75$. As perdas de carga do filtro e da válvula de controle são iguais a 10 lbf/in.^2 e as perdas por atrito com a tubulação são desprezíveis. A leitura do manômetro MAN 1 é 100 lbf/in.^2 . Determine:

- a) o diâmetro interno da tubulação Sch 40, adotando velocidade de 20 m/s e
- b) a leitura do manômetro MAN 2, em psi.

Propriedades físicas da corrente gasosa:

Pressão crítica	76,1 atm (abs)
Temperatura crítica	417,2 K
Viscosidade dinâmica	0,015 cP
Calor específico (c_p)	8,14 kcal/kmol.K
Massa molar	71 kg/kmol



EXERCÍCIO 5.5

Um processo de combustão de uma planta química exige 398,409 Nm³/h de ar seco. Para isto, ar úmido (U.R. = 75%) é admitido a 7 barg e 30°C em uma coluna de absorção, sendo lavado em contracorrente com solução aquosa de ácido sulfúrico a 98%. Dimensione uma placa de orifício para medição da vazão de ar úmido empregando perda de carga por atrito igual a 1 psi. A tubulação de ar úmido deve ser projetada com velocidade de 23,6 ft/s (adote Sch40). Determine também a vazão de ácido sulfúrico necessária ao serviço, considerando que o mesmo abandona a coluna com composição 11,8% em água.

Propriedades físicas para o projeto:

	Ar seco	Vapor d'água
Massa molar	28,96	18,02
Calor específico (c_p), kcal/kg.°C	0,25	0,45
Viscosidade, cP	0,014	0,012
Temperatura crítica, K	132	647
Pressão crítica, psia	543,7	3208
Pressão de vapor (30°C), atm	–	0,042

EXERCÍCIO 5.6

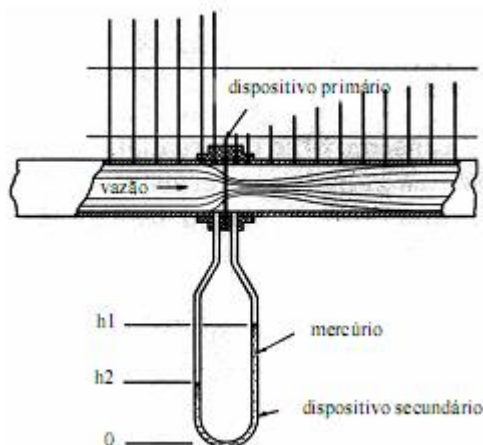
Etano e propano gasosos são alimentados a uma fornalha na razão mássica 1:1, sofrendo combustão completa com ar seco em excesso de 80%. Os gases de combustão têm vazão volumétrica igual a 288000 scfm. A mistura de combustíveis gasosos encontra-se a 5 barg e 40°C. Dimensione uma placa de orifício para medição da vazão volumétrica desta mistura, admitindo perda de carga por atrito igual a 1 psi. Utilize velocidade de 4000 fpm para dimensionamento da tubulação.

Propriedades físicas para o projeto:

	Etano	Propano
Massa molar	30	44,1
Calor específico (c_p), kcal/kg.°C	0,30	0,28
Viscosidade, cP	0,010	0,012
Temperatura crítica, K	305,15	370,00
Pressão crítica, ata	48,80	49,68

EXERCÍCIO 5.7

(Petrobras) Uma placa de orifício produz uma pressão diferencial, cujo valor está relacionado com a vazão na tubulação. Um manômetro tipo coluna U pode ser utilizado como dispositivo secundário para obter-se uma medida da vazão nessa tubulação, conforme ilustrado no esquema a seguir.

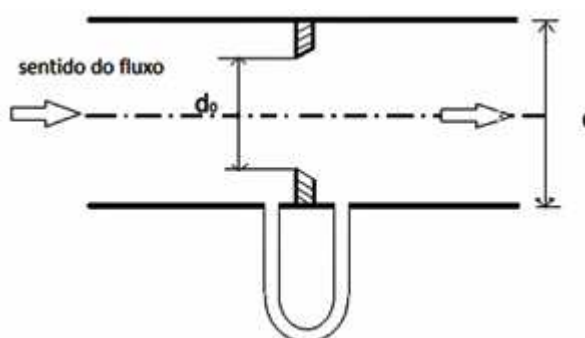


Com relação a esse processo de medição da vazão, é correto afirmar que a vazão na tubulação é

- a) diretamente proporcional à raiz quadrada da diferença entre h_1 e h_2 .
- b) diretamente proporcional à raiz quadrada da soma das alturas h_1 e h_2 .
- c) diretamente proporcional à média das alturas h_1 e h_2 .
- d) inversamente proporcional à média das alturas h_1 e h_2 .
- e) inversamente proporcional ao quadrado da diferença entre h_1 e h_2 .

EXERCÍCIO 5.8

(IFSC) A água à temperatura de 20°C flui com uma velocidade média de $1,3\text{ m/s}$ através de um tubo liso horizontal com diâmetro interno de 152 mm . Uma placa interna foi transversalmente instalada e apresenta um orifício circular e concêntrico ao tubo com $83,5\text{ mm}$ de diâmetro. Foi instalado um manômetro diferencial de mercúrio para a leitura do efeito da placa, conforme esquema abaixo, no qual não são mostradas as colunas do mercúrio.



Com base nessas informações, assinale a alternativa CORRETA.

- a) A taxa de fluxo é de $2,36\text{ m}^3/\text{s}$ e a coluna de mercúrio no lado direito do manômetro está no mesmo nível de elevação que a coluna de mercúrio no lado esquerdo.
- b) A taxa de fluxo é de $2,36\text{ m}^3/\text{s}$ e a coluna de mercúrio no lado direito do manômetro é mais elevada que a coluna de mercúrio no lado esquerdo.
- c) A taxa de fluxo é de $0,0236\text{ m}^3/\text{s}$ e a coluna de mercúrio no lado direito do manômetro é menos elevada que a coluna de mercúrio no lado esquerdo.
- d) A taxa de fluxo é de $2,36\text{ m}^3/\text{s}$ e a coluna de mercúrio no lado direito do manômetro é menos elevada que a coluna de mercúrio no lado esquerdo.
- e) A taxa de fluxo é de $0,0236\text{ m}^3/\text{s}$ e a coluna de mercúrio no lado direito do manômetro é mais elevada que a coluna de mercúrio no lado esquerdo.

EXERCÍCIO 5.9

(Petrobras) A utilização da placa de orifício para medição de vazão é bastante conhecida na indústria. Analise os itens abaixo, que apresentam características desse tipo de instrumento de medição.

I – As placas de orifício concêntricas são utilizadas somente para fluidos carregados com impurezas.

II – Os tipos mais comuns de tomadas de pressão são flange taps, radius taps, corner taps e pipe taps.

III – As placas de orifício podem ser concêntricas, excêntricas ou segmentais.

IV – Esses tipos de medidores são também chamados de primogênios.

É(São) correta(s) APENAS a(s) característica(s):

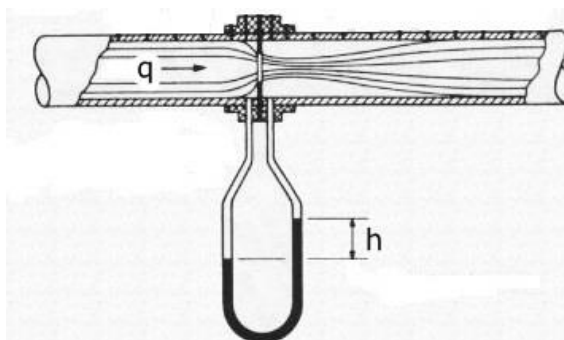
- a) I.
- b) I e II.
- c) II e III.
- d) III e IV.
- e) II, III e IV.

EXERCÍCIO 5.10

O manômetro em "U" com tomadas de pressões nos flanges de uma placa de orifício concêntrico apresenta desnível h de 64,8 cm. O duto possui diâmetro interno de 4" Sch 40 enquanto o diâmetro do furo da placa corresponde a 70% deste valor. A massa específica e a viscosidade do fluido de processo transportado valem, respectivamente, 1550 kg/m³ e 0,40 mPa.s. O peso específico do fluido manométrico do tubo em "U" é 13600 kgf/m³.

Calcular:

- a) A pressão diferencial (ΔP) da placa, lida no manômetro, em psi;
- b) A vazão mássica do fluido de processo, em kg/h;
- c) A perda de carga (h_f) por passagem através da placa, em psi.



6. VÁLVULA DE CONTROLE

Em uma malha de controle típica, um **medidor** fornece valores de determinada variável a um **controlador** com auxílio de um **transmissor**. O controlador, por sua vez, compara os valores recebidos com o *set point* e envia um sinal de correção ao elemento final: a **válvula de controle**.

A válvula de controle altera o fluxo através de mudanças na sua área de escoamento, dissipando energia nas formas de calor, som, vibração e atrito (perda de carga).

6.1 COMPONENTES DA VÁLVULA DE CONTROLE

Uma válvula de controle é composta de duas partes:

- **Atuador**
- **Corpo**

Além disso, diversos acessórios podem compor o conjunto final. Exemplos: posicionador, transdutor, operador manual, regulador de pressão etc.

a) Atuador

O atuador (*actuator*) é o elemento responsável pela **movimentação da haste da válvula** e, consequentemente, pela abertura ou fechamento (total ou parcial) da mesma. Pode funcionar através de ar comprimido (pneumático), óleo (hidráulico) ou eletricidade (elétrico).

O atuador pneumático de **mola e diafragma** é o mais empregado no meio industrial, tendo baixo custo, fácil manutenção e não necessitando de posicionador para operar. Todavia possui limitações referentes à temperatura e torque.

A figura 6.1 apresenta o corte de um atuador pneumático de mola e diafragma. Neste tipo de equipamento, a força motriz é derivada da pressão exercida sobre uma **membrana flexível** (diafragma) por ar comprimido. O atuador é dimensionado de modo que o produto entre a pressão do ar e a área do diafragma (**força**) supere a força contrária exercida pela mola. Em função da localização da entrada de ar, o atuador pode ser classificado como de **ação direta** ou **inversa**, o que influencia no tipo de falha da válvula (falhas **aberta** e **fechada**, respectivamente).

b) Corpo

O corpo (*body*) é uma **carcaça com uma ou duas sedes** nas quais se assenta um elemento vedante (**obturador**, *plug*) que altera a área de escoamento interna da válvula. Esta peça de fechamento pode ser cilíndrica, esférica, um disco ou ter outra forma característica. A parte superior removível do corpo, que permite acesso ao seu interior, é denominada **castelo** (*bonnet*).

A figura 6.2 mostra o corte de um corpo tipo **válvula de globo**, o mais empregado na construção de válvulas de controle. Os corpos das válvulas podem ser classificados quanto ao tipo de deslocamento da haste do obturador:

- **Linear**
- **Rotativo**

Destacam-se as válvulas:

- De gaveta
- De globo
- De esfera
- Borboleta
- Macho
- Diafragma

A figura 6.3 ilustra os tipos de corpos supracitados, evidenciando o sentido de escoamento, o tipo de deslocamento e a configuração dos obturadores.

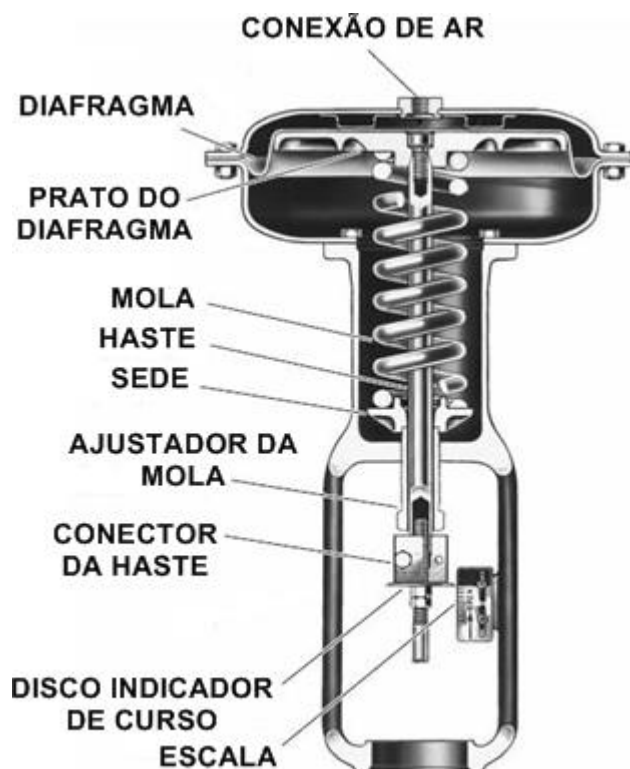


Figura 6.1 – Atuador pneumático de mola e diafragma (ação direta) (PERRY & GREEN, 2008).

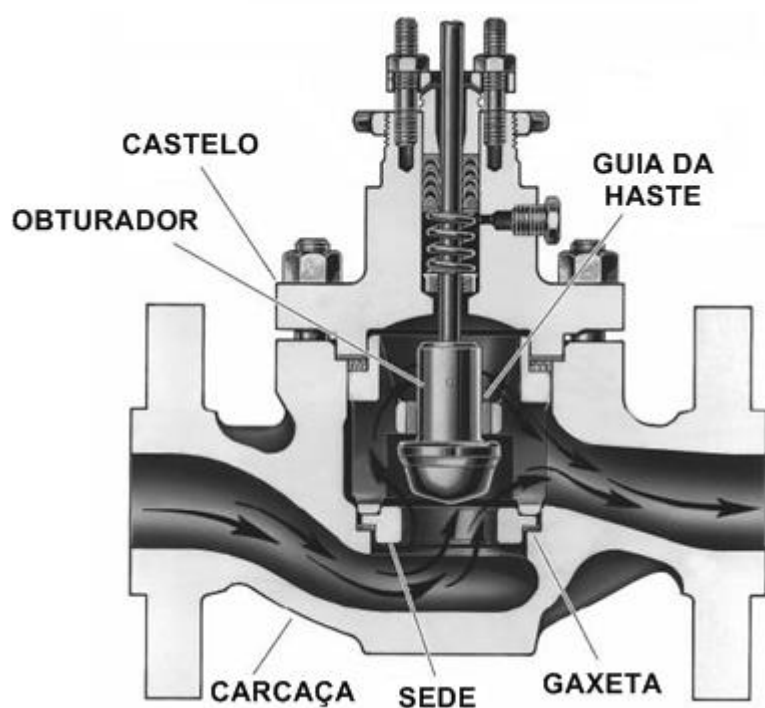


Figura 6.2 – Corpo da válvula de controle tipo globo. Ela deve ser instalada de modo que o fluido escoe de baixo para cima em relação ao obturador (PERRY & GREEN, 2008).

c) Posicionador

Para muitas aplicações, o sinal de pressão padronizado entre **3 e 15 psig** do controlador não é suficiente para vencer as forças contrárias à pressão do ar comprimido. Nestes casos, bem como quando é necessário um ajuste mais fino do posicionamento da haste, é aconselhável a instalação de um acessório adicional à válvula de controle: o **posicionador**.

O posicionador (figura 6.4) relaciona o sinal de entrada, **obtido do controlador**, e a **posição da válvula**, provendo a **pressão de saída do ar** para o atuador que satisfaça esta relação. Por este motivo, o posicionador possui uma alimentação própria de ar comprimido e funciona como um

amplificador de sinal. Por exemplo, para um sinal do controlador de 3 a 15 psig (padrão), o posicionador pode operar de 6 a 30 psig (fator multiplicativo). Esta alteração de sinal garante que a válvula atinja a posição desejada e aumenta a velocidade de resposta da mesma. Além disso, o posicionador garante a linearidade entre o sinal (elétrico ou de pressão) obtido do controlador e a posição de abertura da válvula de controle. Alguns modelos podem conter um conversor eletropneumático que faz a tradução do sinal elétrico do controlador (**4 a 20 mA**) para pneumático (**3 a 15 psig**).

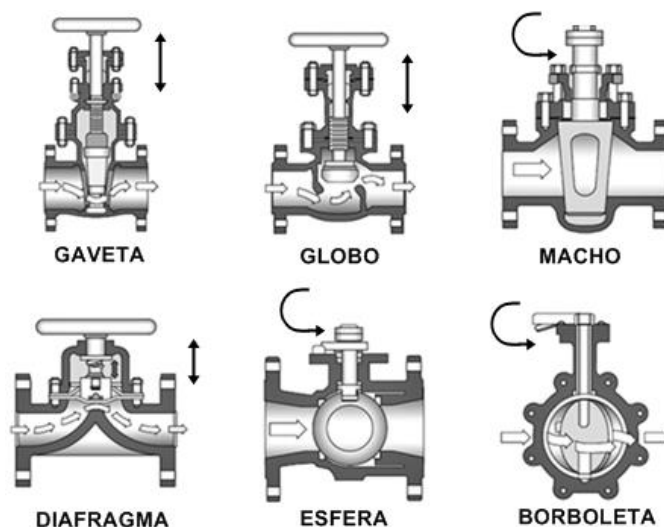


Figura 6.3 – Tipos de corpos mais comuns.

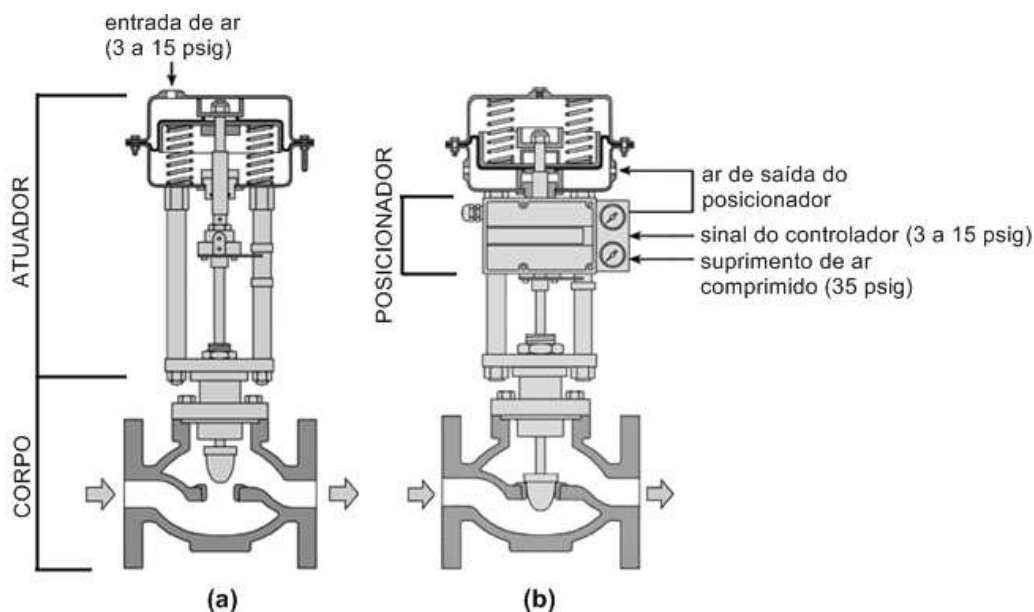


Figura 6.4 – Válvulas de controle com atuador pneumático tipo mola e diafragma.
(a) Sem posicionador e (b) com posicionador.

6.2 VAZÃO CARACTERÍSTICA DA VÁLVULA DE CONTROLE

A vazão característica de uma válvula de controle é definida como a relação entre o **curso da válvula** e a **vazão volumétrica** que escoar pela mesma (ambos expressos em porcentagem). Entende-se por curso da válvula a posição relativa entre o obturador e a sede. Logo, a geometria do obturador influencia no perfil da vazão característica, visto que duas válvulas com diferentes *plugs*

terão áreas de escoamento diferentes para o mesmo curso. A figura 6.5 apresenta os três tipos mais comuns de vazões características associadas ao formato do obturador para válvula de globo: **abertura rápida, linear e igual porcentagem**.

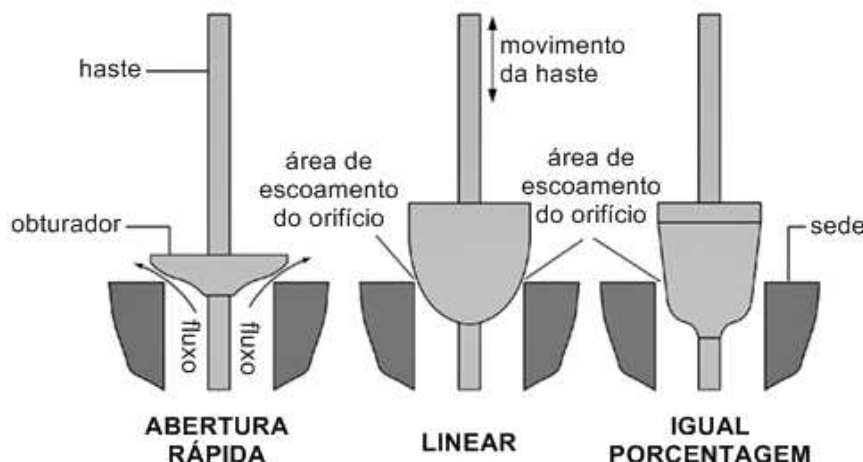


Figura 6.5 – Tipos de vazões características associadas ao formato dos obturadores.

A vazão característica pode ser estudada sob dois aspectos:

- **Vazão característica inerente:** é a relação teórica entre vazão e curso obtida mantendo-se a pressão diferencial constante, isto é, a diferença entre as pressões a montante e a jusante da válvula. É fornecida pelos fabricantes.
- **Vazão característica instalada:** é a relação entre vazão e curso em condição operacional “real”, obtida variando-se a pressão diferencial. Seu levantamento depende da construção de curvas de perda de carga (curva do sistema) e altura manométrica (curva da bomba).

6.2.1 VAZÃO CARACTERÍSTICA INERENTE

A figura 6.6 mostra as principais curvas de vazão característica inerente (pressão diferencial constante) para válvulas de controle tipo globo. A relação destas com a geometria do obturador foi apresentada na figura 6.5.

- **Abertura rápida:** uma pequena variação no curso (ou abertura) da válvula provoca uma grande variação na vazão. Em geral, **25%** de abertura provêm a totalidade da vazão nominal. É utilizada em sistemas de **controle ON/OFF** (válvula 100% aberta ou fechada).
- **Linear:** a relação entre a abertura da válvula e a vazão é diretamente proporcional, ou seja, a **alteração** ocorrida no **curso** é **igual** à **alteração** consequente sobre a **vazão**. O coeficiente angular da curva, denominado ganho da válvula, é constante e unitário. Este é o comportamento buscado na malha de controle, uma vez que a operação torna-se mais estável.
- **Igual porcentagem:** para dada variação no curso da válvula de controle o fluxo aumenta uma porcentagem correspondente. Como o aumento da vazão é uma porcentagem da vazão tida no momento, na posição totalmente fechada a válvula ainda permite passagem de fluido. Segue uma **relação exponencial** dependente do alcance de faixa, isto é, uma família de curvas. Para válvulas tipo globo convencionais, o alcance de faixa é 50:1, interpretado como 100% de vazão para 100% de curso e 2% de vazão para 0% de curso.

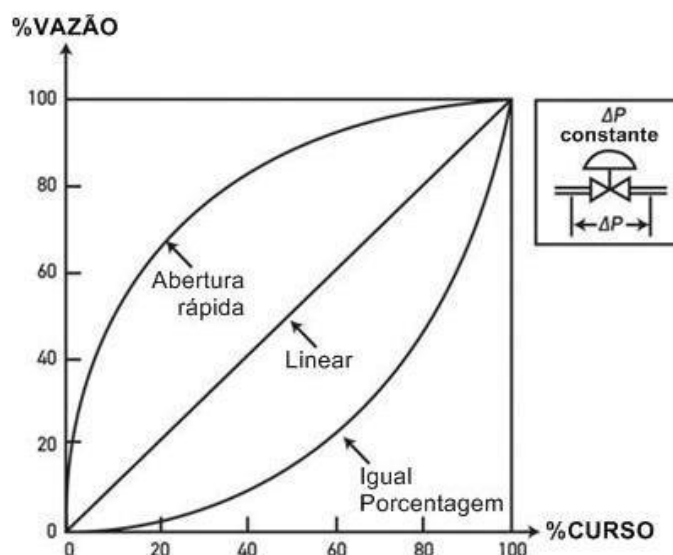


Figura 6.6 – Vazões características inerentes para válvula tipo globo.

6.2.2 VAZÃO CARACTERÍSTICA INSTALADA

Seja o sistema de bombeamento da figura 6.7. Tem-se:

- P_1 pressão estática no vaso à sucção da bomba;
- P_2 pressão estática no vaso à descarga da bomba;
- z_1 nível do vaso à sucção da bomba;
- z_2 nível do vaso à descarga da bomba;
- $h_{f,1}$ perda de carga por atrito nas tubulações à montante da válvula de controle;
- $h_{f,2}$ perda de carga por atrito na tubulação à jusante da válvula de controle e
- ΔP_v pressão diferencial da válvula de controle

À medida que a **vazão da bomba aumenta**, as **perdas de carga por atrito** $h_{f,1}$ e $h_{f,2}$ **aumentam** e, conseqüentemente, a **queda de pressão através da válvula diminui**. Este fenômeno pode ser analisado pelas curvas da bomba e das perdas de carga do sistema (figura 6.8).

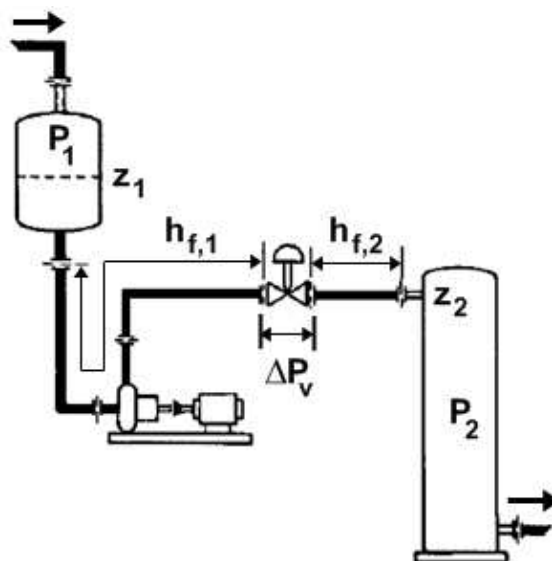


Figura 6.7 – Sistema de bombeamento com válvula de controle.

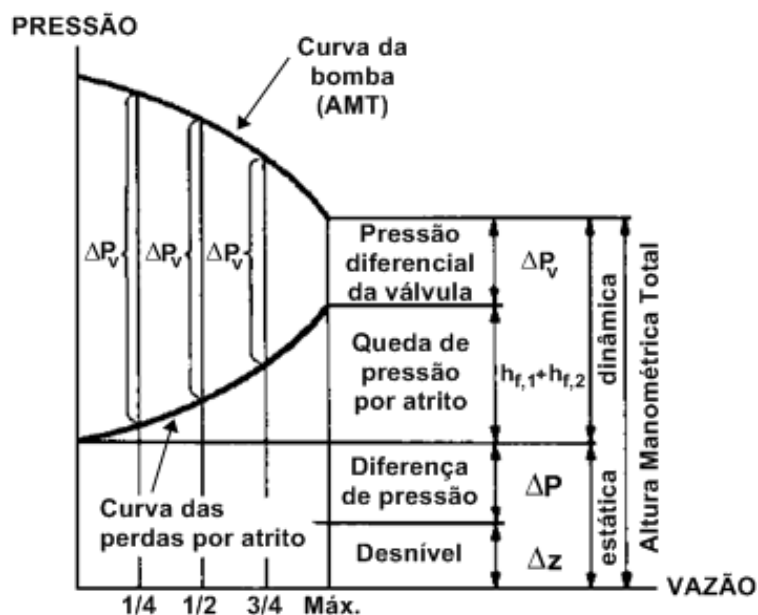


Figura 6.8 – Curva da bomba e curva das perdas por atrito do sistema da figura 6.7.

Esta **variação de pressão diferencial desloca as curvas teóricas**, como pode ser visto na figura 6.9. Nestes gráficos, o parâmetro PR representa a fração que a perda de carga através da válvula de controle corresponde das perdas dinâmicas do sistema. Para vazão característica linear, a tendência em operação é o comportamento de abertura rápida, enquanto a curva **igual porcentagem** tende a **linearização** ($PR \cong 0,33$), o que é ideal ao controle do processo. Por esta razão este tipo de vazão característica é o mais empregado.

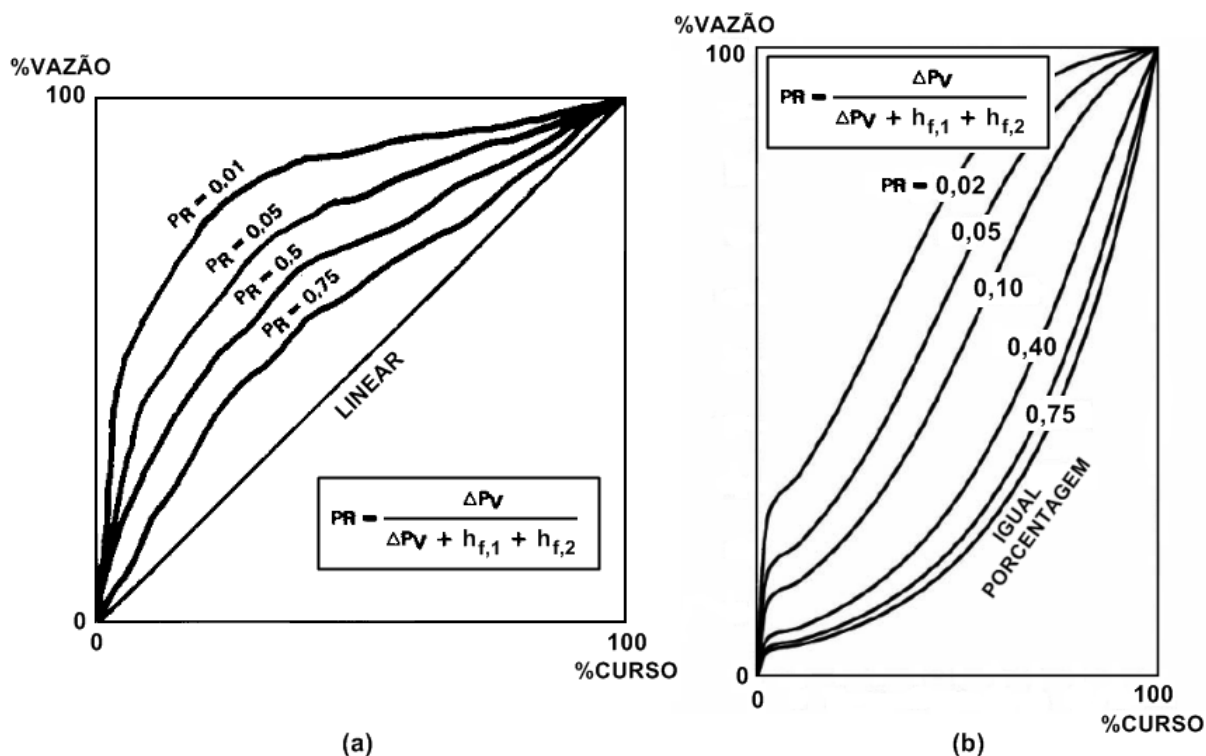


Figura 6.9 – Vazão característica instalada. (a) Linear e (b) Igual Porcentagem.

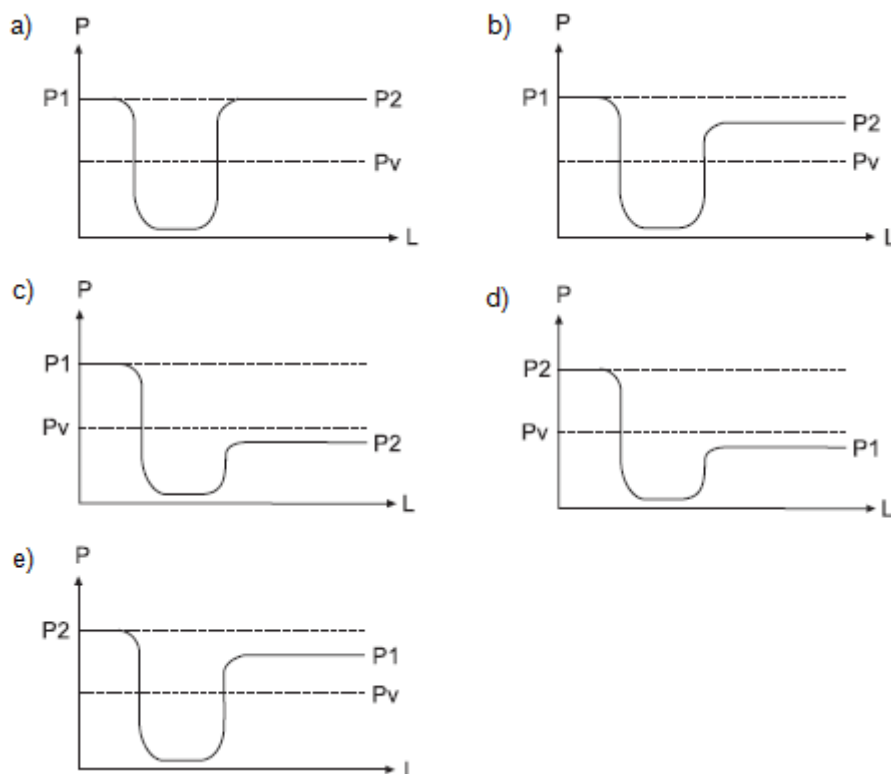
Couper et al. (2012) recomendam perda de carga da válvula de controle entre **25% e 30% das perdas dinâmicas**, estabelecendo um **valor mínimo de 15 psi**. Também é prática industrial calcular-se a perda da válvula sobre o valor da altura manométrica total desconsiderando a mesma.

EXERCÍCIO 6.1

(Petrobras) O fluxo através de uma válvula de controle causa uma perda de carga, cujo valor mínimo da pressão ocorre na chamada *vena-contracta*, que volta a subir a jusante da válvula. Considere:

- P a pressão na linha;
- L a distância da linha;
- P1 a pressão a montante;
- P2 a pressão a jusante;
- Pv a pressão de vapor.

Nesse contexto, qual o gráfico que esboça uma condição de cavitação?

**EXERCÍCIO 6.2**

(Petrobras) A válvula de controle desempenha um papel fundamental no controle automático de processos industriais, sendo responsável pela manipulação do fluxo e, conseqüentemente, na correção do valor da variável controlada. Nessa perspectiva, analise as afirmativas abaixo.

I. Um atuador de ação direta, no qual a válvula de controle fecha com o aumento da pressão de ar, assume a posição totalmente aberta em caso de falha de suprimento de ar de acionamento, e o atuador de ação inversa assume, neste caso, a posição totalmente fechada.

II. Tanto no caso dos atuadores pneumáticos do tipo pistão com retorno por mola, como nos cilindros de dupla ação, o comando para mudança na posição da válvula se efetiva por meio de uma válvula acionada por um solenoide instalada na linha de ar para o atuador.

III. As válvulas acionadas por atuadores do tipo retorno por mola utilizam solenoides pilotos de três vias.

IV. Para o comando de atuadores do tipo cilindro de dupla ação, as válvulas solenoide normalmente aplicadas são as de quatro vias, podendo também ser de cinco vias.

Está correto o que se afirma em

- | | |
|----------------------|--------------------------|
| a) I, apenas. | b) I e II, apenas. |
| c) III e IV, apenas. | d) II, III e IV, apenas. |
| e) I, II, III e IV. | |

EXERCÍCIO 6.3

(Petrobras) Para melhorar o desempenho das válvulas, alguns acessórios opcionais podem ser adicionados. Dentre eles, considere os apresentados abaixo, com suas respectivas funções.

I) Posicionador: compara o sinal de saída do controlador com a posição da haste da válvula para corrigir sua abertura ou fechamento, caso seja necessário.

II) Booster: amplifica o sinal pneumático que entra no atuador da válvula para melhorar sua resposta.

III) Volante manual: utilizado para fechamento ou abertura da válvula de forma remota.

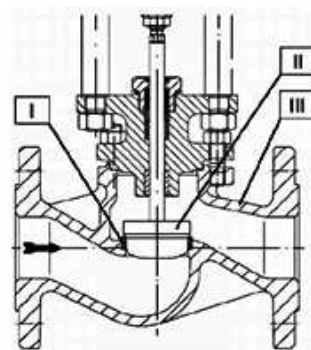
É(são) correto(s) APENAS o(s) acessório(s) e descrição(ões) de função(ões):

- a) I. b) II. c) I e II. d) I e III. e) II e III.

EXERCÍCIO 6.4

(Petrobras) A figura ao lado apresenta partes de uma válvula de controle, na qual são destacados os itens I, II e III, que correspondem respectivamente a:

- a) I – atuador, II – obturador e III – corpo.
 b) I – castelo, II – posicionador e III – sede.
 c) I – corpo, II – gaxetas e III – castelo.
 d) I – fole de vedação, II – guia superior e III – atuador.
 e) I – sede, II – obturador e III – corpo.

**EXERCÍCIO 6.5**

(IFRS) As válvulas de controle dificilmente são instaladas de forma isolada num processo, mas sim acompanhadas de acessórios cujas funções dependem das necessidades do processo. O dispositivo servo-amplificador cuja função é assegurar a correta localização da haste da válvula é denominado:

- a) Posicionador.
 b) Volante.
 c) Transmissor de posição.
 d) Modulador.
 e) Difusor.

EXERCÍCIO 6.6

(IFRS) As válvulas de controle desempenham papel fundamental como elemento final de controle em processos industriais. Com relação às válvulas de controle, assinale a alternativa incorreta.

- a) Para fluidos limpos, as válvulas globo são as mais utilizadas. Quando se trata de fluidos que contêm sólidos em suspensão, lamas e fluidos pastosos ou fibrosos, as válvulas esfera encontram maior aplicação.
 b) O atuador é um servo-amplificador cuja função é assegurar o correto posicionamento da haste da válvula, de acordo com o sinal de comando correspondente, enviado pelo controlador.
 c) A característica igual porcentagem perde sua característica inerente quando instalada no processo, aproximando-se da linear. Por isso, e também devido à sua alta rangeabilidade, é a característica mais utilizada em controle de processos.
 d) O castelo é a parte da válvula que conecta o atuador ao corpo da válvula, guiando a haste da mesma, alojando também o sistema de selagem do fluido de processo.
 e) Por definição, o coeficiente de vazão de uma válvula de controle é a vazão de água em gal por minuto que passa pela válvula, quando a queda de pressão através da mesma for de 1 psi.

6.3 DIMENSIONAMENTO DE VÁLVULAS DE CONTROLE PARA LÍQUIDOS

Roteiro de cálculo para válvula de controle tipo globo igual porcentagem [ISA-75.01.01 (2007)]

- 1ª) Determinar o coeficiente da válvula, C_v , partindo-se da premissa de que os fatores de geometria, cavitação e Reynolds são unitários (equação 6.1).

$$Q = F_P \cdot F_R \cdot F_Y \cdot C_v \sqrt{\frac{\Delta P_v}{\delta}} \rightarrow C_v = Q \sqrt{\frac{\delta}{\Delta P_v}} \quad (6.1)$$

Q vazão volumétrica de líquido, em gpm
 F_P fator de geometria da tubulação, adimensional
 F_R fator do número de Reynolds, adimensional
 F_Y fator de fluxo crítico de líquido (ou cavitação), adimensional
 C_v coeficiente da válvula, adimensional
 ΔP_v pressão diferencial da válvula, em psi
 δ densidade relativa do líquido, adimensional

- 2ª) Calcular o coeficiente da válvula de projeto, $C_{v,proj}$, de modo a prever curso de 75% nas condições de operação (equação 6.2):

$$C_{v,proj} = \frac{C_v}{0,75} \quad (6.2)$$

- 3ª) Em um catálogo do fabricante, selecionar um coeficiente de válvula (**100% de curso**) próximo ao coeficiente de projeto, porém atentando-se à **flexibilidade do modelo** em relação a futuras expansões de capacidade. A figura 6.10 é uma tabela retirada do catálogo de válvulas de controle da fabricante *Masoneilan*.

Contoured Trim

Body Rating: ANSI Class 150 to 600
 Sizes: DN 20 to DN 150 - .75" to 6"

Flow Characteristic: EQUAL PERCENTAGE

Percent of Travel						10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
F_L						0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.92	0.92	0.91	0.91	0.9
Valve Size	Orifice Diameter		Travel			Rated C_v									
	inches	mm	inches	mm											
.75 & 1.00	20 & 25	0.375	9.5	0.8	20.32	0.11	0.17	0.25	0.40	0.66	1.1	1.8	2.5	3.3	3.8
		0.500	12.7	0.8	20.3	0.18	0.27	0.40	0.63	1.0	1.8	2.8	4.0	5.2	6
		0.812	20.6	0.8	20.3	0.43	0.61	0.84	1.3	2.3	4.3	6.8	8.9	11	12
1.50	40	0.375	9.5	0.8	20.3	0.11	0.17	0.25	0.40	0.66	1.1	1.8	2.5	3.3	3.8
		0.500	12.7	0.8	20.3	0.18	0.27	0.40	0.63	1.05	1.8	2.8	4.0	5.2	6
		0.812	20.6	0.8	20.3	0.39	0.58	0.86	1.36	2.3	3.9	6.1	8.6	11	13
		1.250	31.8	0.8	20.3	0.90	1.28	1.76	2.8	4.7	9.0	14	19	22	25
2	50	0.375	9.5	0.8	20.3	0.11	0.17	0.25	0.40	0.66	1.1	1.8	2.5	3.3	3.8
		0.500	12.7	0.8	20.3	0.18	0.27	0.40	0.63	1.0	1.8	2.8	4.0	5.2	6
		0.812	20.6	0.8	20.3	0.45	0.67	0.99	1.6	2.6	4.5	7.0	9.9	13	15
		1.250	31.8	0.8	20.3	0.77	1.2	1.7	2.7	4.5	7.7	12	17	23	26
		1.625	41.3	0.8	20.3	1.7	2.3	3.2	5.1	8.7	17	26	34	41	46
3	80	1.250	31.8	1.5	38.1	0.92	1.4	2.0	3.2	5.4	9.2	15	20	27	31
		1.625	41.3	1.5	38.1	1.4	2.1	3.1	4.9	8.2	14	22	31	41	47
		2.625	66.7	1.5	38.1	4.0	5.6	7.7	12	21	40	62	82	98	110
4	100	1.625	41.3	1.5	38.1	1.5	2.2	3.2	5.1	8.5	15	23	32	43	49
		2.625	66.7	1.5	38.1	3.4	5.0	7.5	12	20	34	53	75	99	113
		3.500	88.9	1.5	38.1	7.1	10.0	13.7	22	37	70	110	145	174	195
6	150	2.625	66.7	2.0	50.8	3.8	5.6	8.3	13	22	38	59	83	110	126
		3.500	88.9	2.0	50.8	6.2	9.3	14	22	36	62	97	137	181	208
		5.000	127.0	2.0	50.8	14	20	28	44	76	144	226	298	357	400

Figura 6.10 – Modelos de válvulas da *Masoneilan* (vazão característica Igual Porcentagem).

4º) Calcular o fator de geometria, F_P , através da equação 6.3:

$$F_P = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\Sigma k}{890} \cdot \frac{C_v^2}{d^4}}} \quad , \quad \Sigma k = 1,5 \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right]^2 \quad (6.3)$$

d diâmetro nominal da válvula (figura 6.10), in.

D diâmetro nominal da tubulação, in.

Obs.: quando os diâmetros da válvula e do tubo forem **iguais**, o fator de geometria é **unitário**.

5º) Calcular o número de Reynolds modificado da válvula de controle (equação 6.4) e determinar o fator de Reynolds, F_R , através da figura 6.11.

$$Re_v = \frac{17300 F_d \cdot Q}{\nu \sqrt{C_v \cdot F_L \cdot F_P}} \cdot \left(\frac{C_v^2 \cdot F_L^2 \cdot F_P^2}{890 D^4} + 1 \right)^{0,25} \quad (6.4)$$

Re_v número de Reynolds modificado da válvula, adimensional

Q vazão volumétrica de líquido, em gpm

F_d fator modificador da válvula (para globo, $F_d = 1,0$), adimensional

F_L fator de recuperação da pressão do líquido (figura 6.10), adimensional

ν viscosidade cinemática, em cSt

D diâmetro nominal da tubulação, em in.

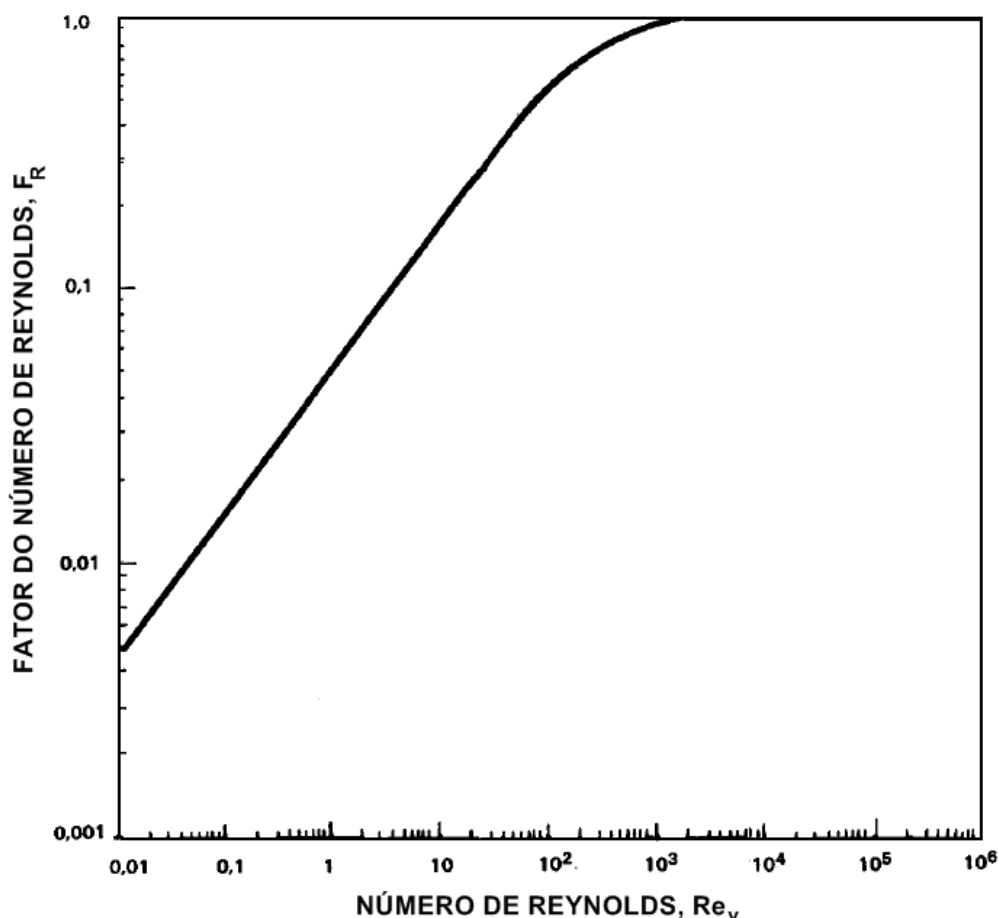


Figura 6.11 – Fator do número de Reynolds em função do número de Reynolds da válvula.

Obs.: da figura 6.11, interpreta-se que para $Re_v \geq 1000$, o fator de Reynolds é **unitário**.

6º) Calcular o fator da razão de pressão crítica do líquido, F_F , empregando a equação 6.5:

$$F_F = 0,96 - 0,28 \sqrt{\frac{p_v}{P_c}} \quad (6.5)$$

p_v pressão máxima de vapor do líquido na temperatura de escoamento, em psia
 P_c pressão crítica do líquido, em psia

7º) Calcular o fator de cavitação, F_Y , pela equação 6.6. Caso F_Y seja igual ou maior que 1, não é necessária sua introdução na equação de projeto 6.1, isto é, **adota-se $F_Y = 1,0$** . Do contrário, o valor calculado deverá ser empregado na equação 6.7 e a válvula sofrerá **cavitação** (a pressão na restrição provocada pelo obturador será menor que a pressão de vapor do fluido).

$$F_Y = F_L \sqrt{\frac{P_1 - F_F \cdot p_v}{\Delta P_v}} \quad (6.6)$$

P_1 pressão estática na entrada da válvula, em psia
 p_v pressão máxima de vapor do líquido na temperatura de escoamento, em psia
 ΔP_v pressão diferencial da válvula, em psi

8º) No caso da premissa ser invalidada, isto é, algum dos **fatores** da equação 6.1 **ser diferente de 1**, **corrigir** o coeficiente da válvula (equação 6.7).

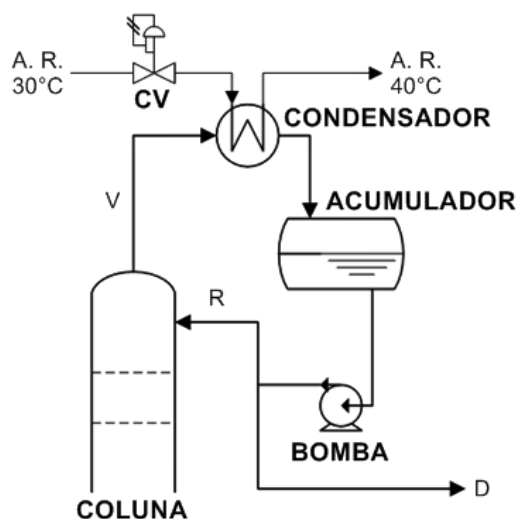
$$C_{v, \text{corrigido}} = \frac{C_v}{F_P \cdot F_R \cdot F_Y} \quad (6.7)$$

9º) Verificar a **abertura** que a válvula de controle terá em condições operacionais normais. Caso o valor encontrado esteja entre **25% e 85%**, a válvula é **aceitável**. Do contrário, escolher outro modelo e seguir novamente os passos de 4 a 9. Na equação 6.8, $C_{v, \text{selecionado}}$ é o valor fornecido pelo fabricante (figura 6.10) e $C_{v, \text{corrigido}}$ será igual a C_v caso os fatores de correção forem 1,0.

$$\% \text{abertura} = \frac{C_{v, \text{corrigido}}}{C_{v, \text{selecionado}}} \cdot 100 \quad (6.8)$$

EXERCÍCIO 6.7

O vapor de benzeno, V, do topo de uma coluna de destilação é condensado por água de resfriamento, A.R., cujas temperaturas de entrada e de saída são



respectivamente 30°C e 40°C. A razão entre as vazões de refluxo, R, e de destilado, D, é igual a 1,8. Dimensione a válvula de controle tipo globo CV, considerando uma vazão de 2145 kg/h de benzeno removido como destilado.

Dados para o projeto:

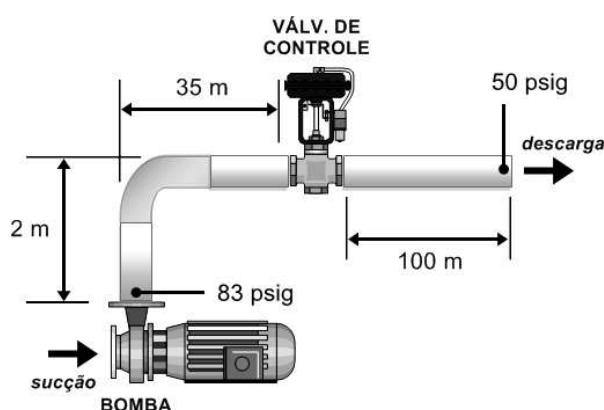
Calor latente do benzeno	94,5 cal/g
Pressão à entrada da válvula	75 psia
Pressão à saída da válvula	65 psia
Diâmetro da linha de água	101,6 mm
Pressão de vapor da água	0,25 psia
Pressão crítica da água	3206 psia

EXERCÍCIO 6.8

No sistema abaixo, uma válvula de controle tipo globo igual porcentagem está instalada à descarga de uma bomba cuja vazão é 384 m³/dia. Considerando as pressões e as dimensões das tubulações (SS 3 in. Sch 40) apresentadas (comprimento equivalente da curva de 90° incluso), dimensione esta válvula.

Propriedades físicas do fluido:

Densidade	$\rho = 1050 \text{ kg/m}^3$
Viscosidade absoluta	$\mu = 50 \text{ cP}$
Pressão de vapor	$p_v = 0,6 \text{ psia}$
Pressão crítica	$P_c = 1200 \text{ psia}$



EXERCÍCIO 6.9

Cem galões por minuto de NaOH a 50% em peso e 25°C é bombeada pela P-110 do tanque atmosférico TK-10 ao reator R-10, que trabalha a 50 psig (figura 6.12). As tubulações de descarga e de sucção são de aço carbono com diâmetro 4 in. Sch 40. O instrumento FE é uma placa de orifício com tomadas nos flanges ($d = 1,81 \text{ in.}$ e $C = 0,647$) e a perda de carga do trocador de calor E-110 é igual a 15 psi. Pede-se:

- a perda de carga da válvula FCV-01 adotando 30% das perdas dinâmicas;
- a potência do motor da bomba P-110, adotando rendimento de 35% e
- os coeficientes da válvula de controle FCV-01 calculado e selecionado.

Propriedades físicas:

$\rho = 1,52 \text{ kg/L;}$
$\mu = 50 \text{ cP;}$
$p_v = 0,25 \text{ psia}$
$P_c = 3206 \text{ psia.}$

Comprimentos de tubulação (em pés):

Trecho a = 235; b = 2605; c = 1185; d = 1185; e = 2370.

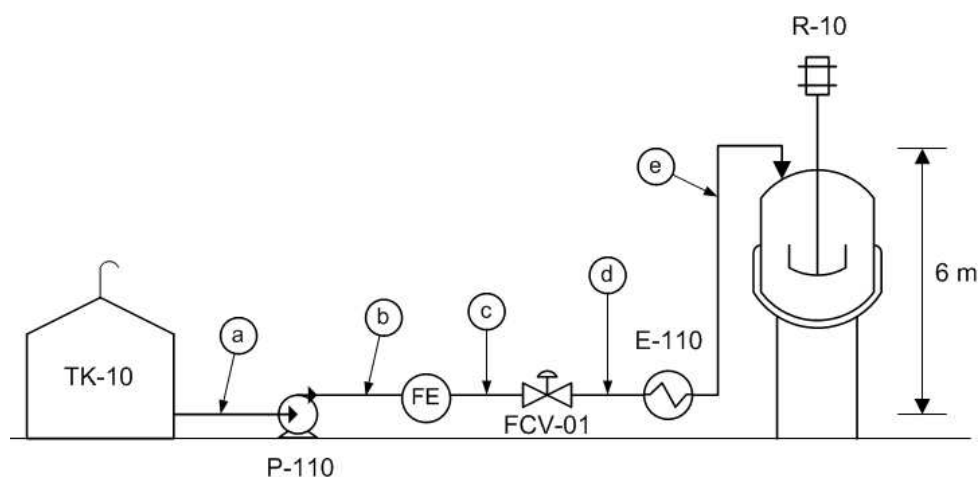


Figura 6.12 – Sistema de bombeamento do exercício 6.9.

6.4 DIMENSIONAMENTO DE VÁLVULAS DE CONTROLE PARA GASES

Um fluido compressível (gases e vapores) apresenta em geral densidade 1000 vezes inferior à densidade de um fluido incompressível. Por esta razão, a perda de carga por atrito de uma corrente gasosa pode ser muitas vezes negligenciada. Assim, a válvula de controle será responsável por praticamente toda perda de carga do sistema de tubulação gasosa e a curva teórica da vazão característica é **mantida**, mesmo mediante a variações da pressão diferencial da válvula. Portanto, a melhor seleção para **fluxo gasoso** é a vazão **característica linear**.

Roteiro de cálculo para válvula de controle tipo globo linear [ISA-75.01.01 (2007)]

- 1º) Determinar o coeficiente da válvula, C_v , partindo-se da premissa de que o fator de geometria, é unitário (equação 6.9).

$$Q = 1360 F_p \cdot Y \cdot P_1 \cdot C_v \sqrt{\frac{X}{G \cdot T_1 \cdot Z}} \quad (6.9)$$

$$X = \frac{\Delta P_v}{P_1} \quad (6.10)$$

$$F_K = \frac{k}{k_{ar}} = \frac{k}{1,4} \quad (6.11)$$

$$Y = 1 - \frac{X}{3 F_K \cdot X_T} \quad (6.12)$$

$$G = \frac{MW}{MW_{ar}} = \frac{MW}{28,96} \quad (6.13)$$

Q	vazão volumétrica de gás, em scfh
F_p	fator de geometria da tubulação, adimensional
X	razão da queda de pressão (vide equação 6.10), adimensional
ΔP_v	pressão diferencial da válvula, em psi
P_1	pressão absoluta à entrada da válvula, psia
X_T	fator da razão da queda de pressão (para globo, $X_T = 0,75$), adimensional
F_K	fator da razão dos calores específicos (vide equação 6.11), adimensional
k	constante isoentrópica do gás, adimensional

Y	fator de expansão (vide equação 6.12), adimensional
G	densidade relativa do gás, adimensional
MW	massa molar do gás, massa / massa-mol
C_v	coeficiente da válvula, adimensional
T_1	temperatura absoluta à entrada da válvula, °R
Z	fator de compressibilidade, adimensional

2º) Calcular o coeficiente da válvula de projeto, $C_{v,proj}$, de modo a prever curso de 75% nas condições de operação (equação 6.2).

3º) Em um catálogo do fabricante, selecionar um coeficiente de válvula (**100% de curso**) próximo ao coeficiente de projeto, porém atentando-se à **flexibilidade do modelo** em relação a futuras expansões de capacidade. A figura 6.13 é uma tabela retirada do catálogo de válvulas de controle da fabricante *Masoneilan*.

Contoured Trim

Body Rating: ANSI Class 150 to 600

Sizes: DN 20 to DN 150 - .75" through 6"

Flow Characteristic: **LINEAR**

Percent of Travel						10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
F _L						0.93	0.93	0.92	0.92	0.91	0.91	0.91	0.90	0.90	0.90
Valve Size		Orifice Diameter		Travel		Rated C _v									
Inches	mm	Inches	mm	Inches	mm										
.75 & 1	20 & 25	0.250	6.4	0.8	20.3	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.10	0.11
						0.03	0.06	0.08	0.11	0.13	0.16	0.19	0.23	0.27	0.3
						0.06	0.12	0.17	0.22	0.27	0.32	0.38	0.45	0.54	0.6
						0.15	0.31	0.46	0.60	0.77	0.94	1.1	1.3	1.5	1.7
		0.375	9.5	0.8	20.3	0.34	0.68	1.0	1.3	1.7	2.1	2.5	2.9	3.3	3.8
		0.500	12.7	0.8	20.3	0.54	1.1	1.6	2.1	2.7	3.3	4.0	4.6	5.3	6
0.812	20.6	0.8	20.3	1.1	2.2	3.2	4.3	5.4	6.7	7.9	9.2	11	12		
1.5	40	0.250	6.4	0.8	20.3	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.10	0.11
						0.03	0.06	0.08	0.11	0.13	0.16	0.19	0.23	0.27	0.3
						0.06	0.12	0.17	0.22	0.27	0.32	0.38	0.45	0.54	0.6
						0.15	0.31	0.46	0.60	0.77	0.94	1.1	1.3	1.5	1.7
		0.375	9.5	0.8	20.3	0.34	0.68	1.0	1.3	1.7	2.1	2.5	2.9	3.3	3.8
		0.500	12.7	0.8	20.3	0.54	1.1	1.6	2.1	2.7	3.3	4.0	4.6	5.3	6
		0.812	20.6	0.8	20.3	1.2	2.3	3.5	4.6	5.9	7.2	8.6	10	11	13
		1.250	31.8	0.8	20.3	2.3	4.5	6.8	8.9	11	14	17	19	22	25
1.625	41.3	0.8	20.3	3.2	6.3	9.5	12	16	19	23	27	31	35		
2	50	0.250	6.4	0.8	20.3	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.10	0.11
						0.03	0.06	0.08	0.11	0.13	0.16	0.19	0.23	0.27	0.3
						0.06	0.12	0.17	0.22	0.27	0.32	0.38	0.45	0.54	0.6
						0.15	0.31	0.46	0.60	0.77	0.94	1.1	1.3	1.5	1.7
		0.375	9.5	0.8	20.3	0.34	0.68	1.0	1.3	1.7	2.1	2.5	2.9	3.3	3.8
		0.500	12.7	0.8	20.3	0.54	1.1	1.6	2.1	2.7	3.3	4.0	4.6	5.3	6
		0.812	20.6	0.8	20.3	1.4	2.7	4.1	5.3	6.8	8.3	9.9	12	13	15
		1.250	31.8	0.8	20.3	2.3	4.7	7.0	9.2	12	14	17	20	23	26
1.625	41.3	0.8	20.3	4.1	8.3	12	16	21	26	30	35	40	46		
3	80	1.250	31.8	1.5	38.1	2.8	5.6	8.4	11	14	17	20	24	27	31
		1.625	41.3	1.5	38.1	4.2	8.5	13	17	21	26	31	36	41	47
		2.625	66.7	1.5	38.1	9.9	20	30	39	50	61	73	85	97	110
4	100	1.625	41.3	1.5	38.1	4.4	8.8	13	17	22	27	32	38	43	49
		2.625	66.7	1.5	38.1	10	20	31	40	51	63	75	87	99	113
		3.500	88.9	1.5	38.1	18	35	53	69	88	108	129	150	172	195
6	150	1.625	66.7	2.0	50.8	11	23	34	45	57	70	83	97	111	126
		3.500	88.9	2.0	50.8	19	37	56	74	94	115	137	160	183	208
		5.000	127.0	2.0	50.8	36	72	108	142	180	222	264	308	352	400

Figura 6.13 – Modelos de válvulas da *Masoneilan* (vazão característica Linear).

4º) Calcular o fator de geometria, F_P , através da equação 6.3. No caso particular em que os diâmetros da válvula e da tubulação são **iguais**, o **fator é unitário**.

5º) No caso da premissa ser invalidada, isto é, o fator de geometria ser diferente de 1, corrigir o coeficiente da válvula através da equação 6.14:

$$C_{v,\text{corrigido}} = \frac{C_v}{F_p} \quad (6.14)$$

6º) Verificar a abertura que a válvula de controle terá em condições operacionais normais. Caso o valor encontrado esteja entre **25% e 85%**, a válvula é **aceitável**. Do contrário, escolher outro modelo e seguir novamente os passos de 4 a 6. Na equação 6.15, $C_{v,\text{selecionado}}$ é o valor fornecido pelo fabricante (figura 6.11) e $C_{v,\text{corrigido}}$ será igual a C_v caso a premissa seja válida.

$$\%abertura = \frac{C_{v,\text{corrigido}}}{C_{v,\text{selecionado}}} \cdot 100 \quad (6.15)$$

EXERCÍCIO 6.10

Metano gasoso a 1500 am³/h necessita de uma válvula de controle tipo globo nos parâmetros de processo abaixo. Dimensione esta válvula.

Pressão de entrada	8 bar (abs)
Pressão de saída	6 bar (abs)
Temperatura	27 °C
Diâmetro da linha	6 in.
Calor específico molar	8,2 kcal/kmol.°C
Temperatura crítica	191 K
Pressão crítica	45,8 atm (abs)

APÊNDICE

1. CONVERSÃO DE UNIDADES

GRANDEZA	RELAÇÕES ENTRE UNIDADES
Tempo	1 h = 60 min = 3600 s 1 dia = 24 h = 1440 min = 86400 s
Massa	1 kg = 1000 g = 2,205 lb = 0,001 ton
Comprimento	1 m = 100 cm = 1000 mm = 0,001 km = 3,28 ft 1 ft = 12 in. = 0,3048 m 1 in. = 2,54 cm = 25,4 mm
Vazão volumétrica	1 gpm = 8,02 ft ³ /h = 0,227 m ³ /h
Volume	1 m ³ = 1000 L = 10 ⁶ mL = 35,32 ft ³ 1 ft ³ = 1728 in. ³ = 7,48 gal
Energia, trabalho	1 kJ = 0,23901 kcal = 0,9486 Btu 1 kcal = 4,187 kJ = 3,968 Btu
Potência	1 HP = 1,013 c.v. = 0,746 kW
Pressão	1 atm = 101,325 kPa = 1,01325 bar = 1,033 kgf/cm ² = 14,696 psi = 760 mmHg
Viscosidade	1 cP = 0,01 P = 0,001 Pa s = 2,42 lb/(h ft)
Densidade	1 kg/L = 1000 kg/m ³ = 62,4 lb/ft ³
Taxa de calor	1 W = 1 J/s = 3,412 Btu/h
Coeficiente de troca térmica	1 W/(m ² K) = 1 W/(m ² °C) = 0,1761 Btu/(h ft ² °F)
Vazão mássica	1 kg/s = 7936,6 lb/h
Calor específico	1 kJ/(kg K) = 1 kJ/(kg °C) = 0,23886 Btu/(lb °F)
Temperatura	T(K) = T(°C) + 273,15 T(°F) = 1,8 T(°C) + 32 T(°R) = T(°F) + 459,67 T(°R) = 1,8 T(K)
Variação de temperatura	ΔT(°C) = ΔT(K) ΔT(°F) = ΔT(°R) ΔT(°C) = 1,8 ΔT(°F)
Condutividade térmica	1 W/(m °C) = 0,57782 Btu/(h ft °F) = 0,8599 kcal/(h m °C)
Entalpia	1 Btu/lb = 0,5555 kcal/kg = 2,326 kJ/kg

APÊNDICE

2. CÁLCULO DE PROPRIEDADES FÍSICAS MÉDIAS

2.1 FLUIDO INCOMPRESSÍVEL – LÍQUIDOS

Densidade de misturas $\bar{\rho} = \frac{1}{\frac{w_1}{\rho_1} + \dots + \frac{w_n}{\rho_n}}$, w_i é a fração mássica do componente i

Viscosidade de misturas $\bar{\mu} = \exp(x_1 \ln \mu_1 + \dots + x_n \ln \mu_n)$, x_i é a fração molar do comp. i

Densidade relativa $\delta = \frac{\rho}{1000}$, ρ é a densidade em kg/m³

2.2 FLUIDO COMPRESSÍVEL – VAPORES E GASES

Densidade $\rho = \frac{P \overline{MW}}{Z R T}$, para misturas, empregar $\overline{MW}$

Massa molar média $\overline{MW} = y_1 MW_1 + \dots + y_n MW_n$, y_i é a fração molar do comp. i

Valores de R (constante universal dos gases):

0,08206 atm m ³ / kmol K	8,314 kPa m ³ / kmol K
1,987 kcal / kmol K	1,987 Btu / lbmol °R
0,7302 atm ft ³ / lbmol °R	10,72 psia ft ³ / lbmol °R

Fator de compressibilidade (GOMIDE,1984) $\frac{1}{Z} \left(\frac{Z}{Z-A} - \frac{B}{Z+A} \right) = 1$

$$A = 0,0867 \frac{P_r}{T_r} \quad e \quad B = 0,4278 \frac{P_r}{T_r^{2,5}}$$

$$P_r = \frac{P}{P_c} \quad e \quad T_r = \frac{T}{T_c}$$

Pressão crítica média $\bar{P}_c = y_1 P_{c,1} + \dots + y_n P_{c,n}$

Temperatura crítica média $\bar{T}_c = y_1 T_{c,1} + \dots + y_n T_{c,n}$

Calor específico médio $\overline{Mcp} = y_1 MW_1 cp_1 + \dots + y_n MW_n cp_n$

Constante isoentrópica $k = \frac{Mcp}{Mcv} = \frac{Mcp}{Mcp - R}$

Viscosidade média $\bar{\mu} = \frac{y_1 \mu_1 \sqrt{MW_1} + \dots + y_n \mu_n \sqrt{MW_n}}{y_1 \sqrt{MW_1} + \dots + y_n \sqrt{MW_n}}$

Condições padrões de temperatura e pressão (P^0 e T^0):

CNTP	1 atm	e	0°C (273,15 K)
Standard	14,7 psia (1 atm)	e	60°F (288,70 K)

Relação entre vazões mássica e volumétrica padrão $m = \frac{P^0 Q^0 \overline{MW}}{R T^0}$

APÊNDICE

3. DIMENSIONAMENTO DE TUBULAÇÕES

Diâmetro da tubulação $D[\text{in.}] = \sqrt{0,408 \frac{Q[\text{gpm}]}{v_{\text{rec}}[\text{ft/s}]}}$

Fator de atrito de Darcy

$$f = \frac{64}{\text{Re}} \quad (\text{Re} \leq 2100, \text{ laminar})$$

$$f = 1,6364 \left[\ln \left(0,135 \frac{\varepsilon}{D} + \frac{6,5}{\text{Re}} \right) \right]^{-2} \quad (\text{Re} > 2100, \text{ turbulento})$$

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 1,14 - 0,869 \ln \left(\frac{\varepsilon}{D} + \frac{9,38}{\text{Re} \sqrt{f}} \right) \quad (\text{Re} > 2100, \text{ turbulento})$$

Perda de carga por atrito $h_f = f \frac{L}{D} \frac{v^2}{2g}$, $g = 9,81 \text{ m/s}^2 = 32,17 \text{ ft/s}^2$

Rugosidade absoluta Aço carbono, $\varepsilon = 0,00015 \text{ ft}$ Aço inox, $\varepsilon = 0,00005 \text{ ft}$

Diâmetros internos de tubulações comerciais (IPS, Sch 40):

DN – Nominal (in.)	DI – Interno (in.)	DN – Nominal (in.)	DI – Interno (in.)
1/4	0,364	3	3,068
1/2	0,622	4	4,026
1	1,049	6	6,065
1 1/4	1,380	8	7,981
1 1/2	1,610	10	10,020
2	2,067	12	12,000

Conversão da perda de carga: pressão ↔ coluna de líquido

fluido incompressível (líquido): $[\text{psi}] = \frac{\delta}{2,31} [\text{ft}]$

fluido compressível (vapor e gás): $[\text{psi}] = \frac{\delta}{1882} [\text{ft}]$

para fluido compressível: $\delta = \frac{\rho [\text{lb/ft}^3]}{0,0765}$

4. DIMENSIONAMENTO DE BOMBAS

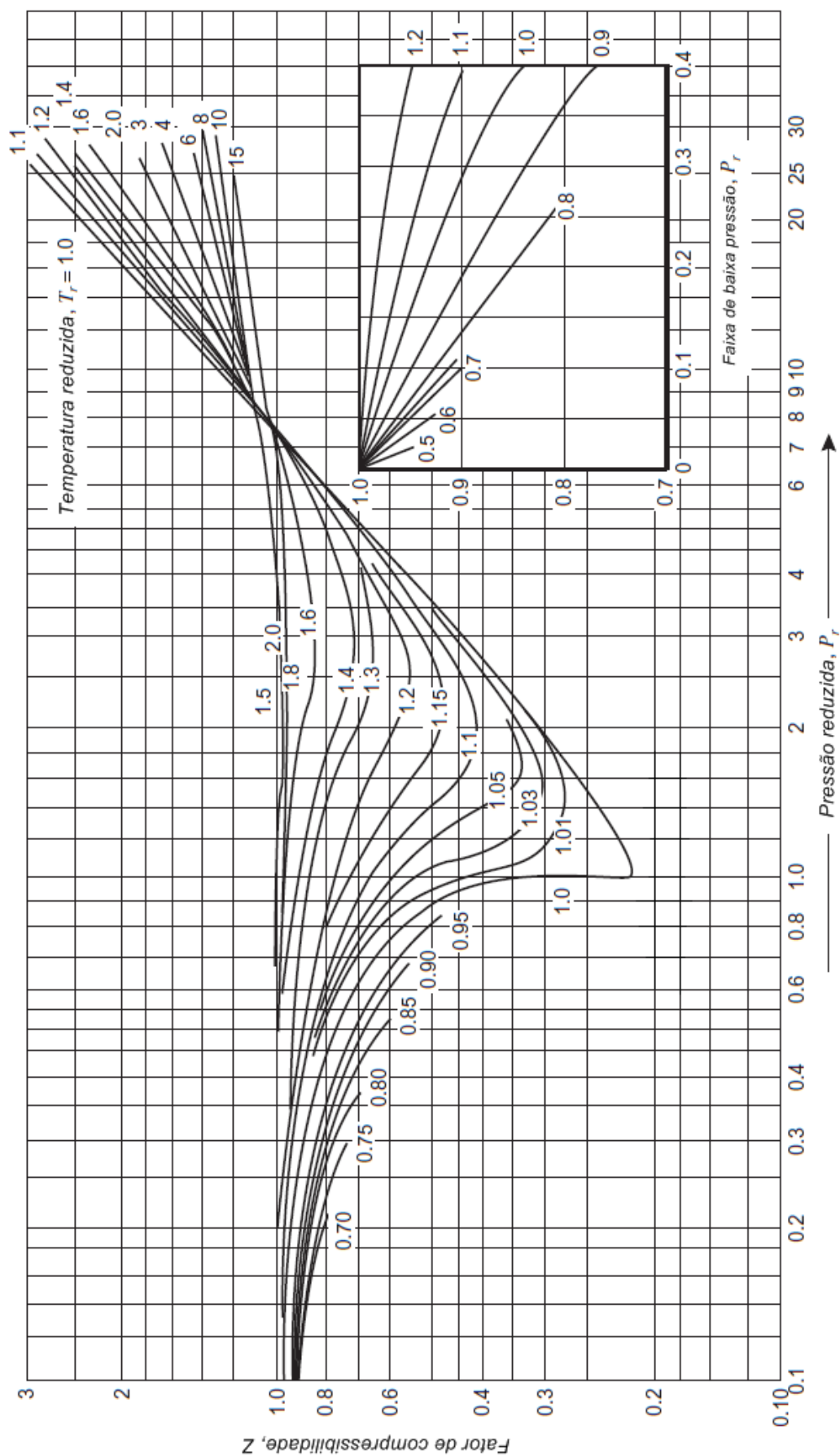
Altura manométrica total $\text{AMT} = \frac{\Delta P}{\gamma} + \frac{\Delta v^2}{2g} + \Delta Z + h_{f,\text{total}}$

Motor elétrico $\text{BHP} [\text{HP}] = \frac{\text{AMT} [\text{ft}] \cdot Q[\text{gpm}] \cdot \delta}{3960 \eta}$

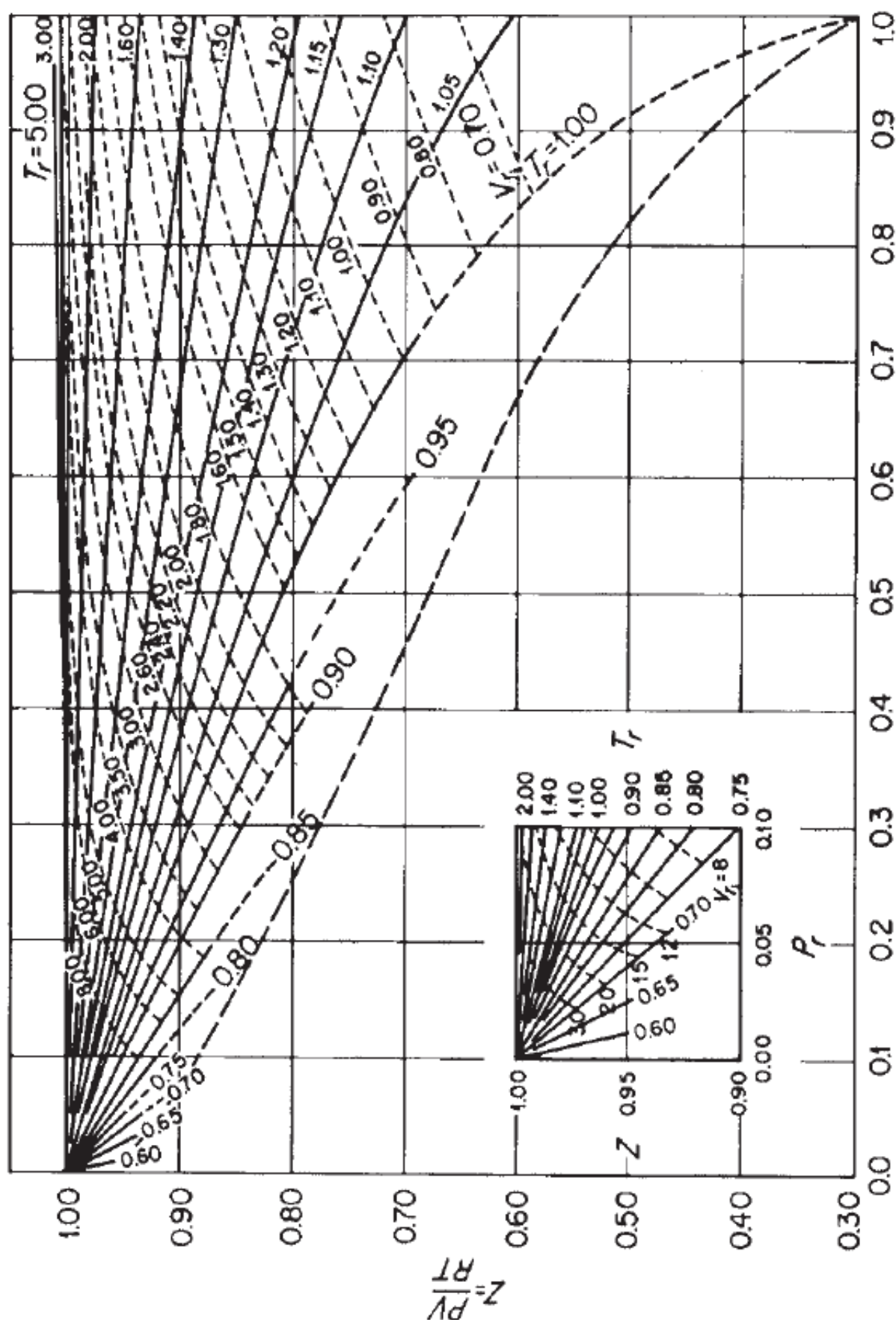
Carga Positiva da Sucção $\text{NPSH}_{\text{disponível}} = P_{\text{suc}} - p_v$

Equação de Antoine $\log p_v = A - \frac{B}{T + C}$

ANEXO 1 – DIAGRAMA DE OBERT (PRESSÕES MODERADAS)



ANEXO 2 – DIAGRAMA DE OBERT (PRESSÕES BAIXAS)



RESPOSTAS DOS TESTES DE CONCURSOS PÚBLICOS

1.4	C	2.4	D	4.11	D	4.28	E	6.6	B
1.5	D	3.1	B	4.12	D	4.29	A		
1.6	B	3.3	B	4.13	B	4.30	D		
1.7	D	3.9	B	4.14	D	4.31	D		
1.8	B	3.10	D	4.15	C	4.32	D		
1.9	A	3.11	C	4.16	C	4.33	D		
1.10	D	3.12	A	4.17	A	4.34	D		
1.12	C	3.13	B	4.18	E	4.35	E		
1.13	E	3.14	A	4.19	B	4.36	A		
1.14	D	3.16	C	4.20	A	5.7	A		
1.15	A	3.17	B	4.21	E	5.8	E		
1.16	D	3.18	D	4.22	C	5.9	E		
1.17	B	3.19	B	4.23	E	6.1	B		
1.18	A	3.20	D	4.24	C	6.2	E		
1.19	C	3.21	A	4.25	C	6.3	C		
1.20	B	4.1	D	4.26	B	6.4	E		
1.21	C	4.10	D	4.27	B	6.5	A		

BIBLIOGRAFIA

- AUSTIN, D.G. *Chemical engineering drawing symbols*. New York: John Wiley & Sons, 1979.
- BEGA, E.A.; DELMÉE, G.J.; COHN, P.E.; BULGARELLI, R.; KOCH, R.; FINKEL, V.S. *Instrumentação industrial*. 3 ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011.
- BEQUETTE, B.W. *Process control: modeling, design and simulation*. New Jersey: Pearson Education, 2003.
- COUGHANOWR, D.R.; KOPPEL, L.B. *Análise e controle de processos*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1978.
- COULSON, J.M.; RICHARDSON, J.F. *Tecnologia química*. trad. C.R. Carlos. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1985. V3.
- COUPER, J.R.; PENNEY, W.R.; FAIR, J.R.; WALAS, S.M. *Chemical process equipment: selection and design*. 3 ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012.
- CRANE Co. *Flow of fluids through valves, fittings and pipe - Technical Paper 410 Metric Version*. Chicago: Crane Co., 2009.
- FRANCHI, C.M. *Controle de processos industriais*. São Paulo: Érica, 2011.
- GOMIDE, R. *Estequiometria industrial*. 3 ed. São Paulo: Edição do autor, 1984.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 10628: Flow diagrams for process plants - General rules*. Geneva, 1997.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 5167-2: Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular-cross sections conduits running full - Part 2: orifice plates*. Geneva, 2003.
- INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION. *ANSI/ISA-5.1-1984 (R 1992): Instrumentation symbols and identification*. North Carolina, 1992.
- INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION. *ISA-75.01.01-2007: Flow equations for sizing control valves*. North Carolina, 2007.
- KWONG, W.H. *Introdução ao controle de processos químicos com MATLAB*. São Carlos: EdUFSCar, 2002. v. 1 & 2.
- LUYBEN, W.L.; LUYBEN, M.L. *Essentials of process control*. New York: McGraw-Hill, 1997.
- LUYBEN, W.L. *Process modeling, simulation and control for chemical engineers*. 2 ed. New York: McGraw-Hill, 1990.
- MAYA, P.A.; LEONARDI, F. *Controle essencial*. 2 ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014.
- MORAES Jr., D.; MORAES, M.S. *Laboratório de operações unitárias III*. São Paulo: Edição do autor, 2015.
- NUNES, G.C.; MEDEIROS, J.L.; ARAÚJO, O.Q.F. *Modelagem e controle na produção de petróleo: aplicações em MATLAB*. São Paulo: Blücher, 2010.
- OGATA, K. *Engenharia de controle moderno*. 5 ed. trad. H.C. Souza. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2010.
- PEREIRA, F.N.; SEGUIM, M.C. *Projetos químicos e petroquímicos: movimentação de fluidos*. 1 ed. São Paulo: Comunicar, 2010.
- PERRY, R.H. & GREEN, D. *Perry's chemical engineers' handbook*. 8 ed. New York: McGraw-Hill, 2008.
- SEBORG, D.E.; EDGARD, T.F.; MELLICHAMP, D.A. *Process dynamics and control*. New York: John Wiley & Sons, 1989.
- STEPHANOPOULOS, G. *Chemical process control: an introduction to theory and practice*. New Jersey: Prentice-Hall, 1984.
- THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P.U.B. *Sensores industriais*. São Paulo: Érica, 2011.