

169536 - Tópicos em Controle e Automação:  
*Controle de Processos*

LISTA DE EXERCÍCIOS 1

Para os exercícios abaixo considere (exceto se especificado ao contrário):

- Variáveis que variam no tempo são indicados com o respectivo argumento ( $f(t)$ , por exemplo);
- Os processos em estado não-estacionário (regime transiente) encontram-se em estado estacionário (regime permanente) em  $t = 0$  ( $f(0) = \bar{f}$ ,  $T(0) = \bar{T}$ , ...);
- Para padrão de notação, denote as variáveis de desvio ou incrementais como  $\tilde{f}(t) = f(t) - \bar{f}$ ,  $\tilde{T}(t) = T(t) - \bar{T}$ , etc;
- Os líquidos nos tanques com agitação (conforme ilustração) encontram-se bem misturados e portanto os fluxos de saída possuem as mesmas propriedades do líquido do tanque (temperatura, concentração);
- As perdas de calor para a vizinhança são consideradas desprezíveis;
- Os tanques são abertos e as saídas são livres para a atmosfera;
- Considere como conhecidos a área ou o volume dos reservatórios (tanques).

1. No diagrama P&ID mostrado na Figura 1.

- (a) Identifique todos os instrumentos.
- (b) Quais são as medições efetuadas no Tanque 1?
- (c) Quais são as medições efetuadas no Tanque 2?
- (d) Quais malhas de controle são observadas?

2. O fluxograma de recuperação de um produto farmacêutico é apresentado na Figura 2. Trata-se de um processo de múltiplas unidades, com reciclo e sem reação química no estado estacionário. Denominando o produto farmacêutico como  $F$  e a água como  $A$ , calcule os valores das variáveis indicadas com “?” na Tabela 1.

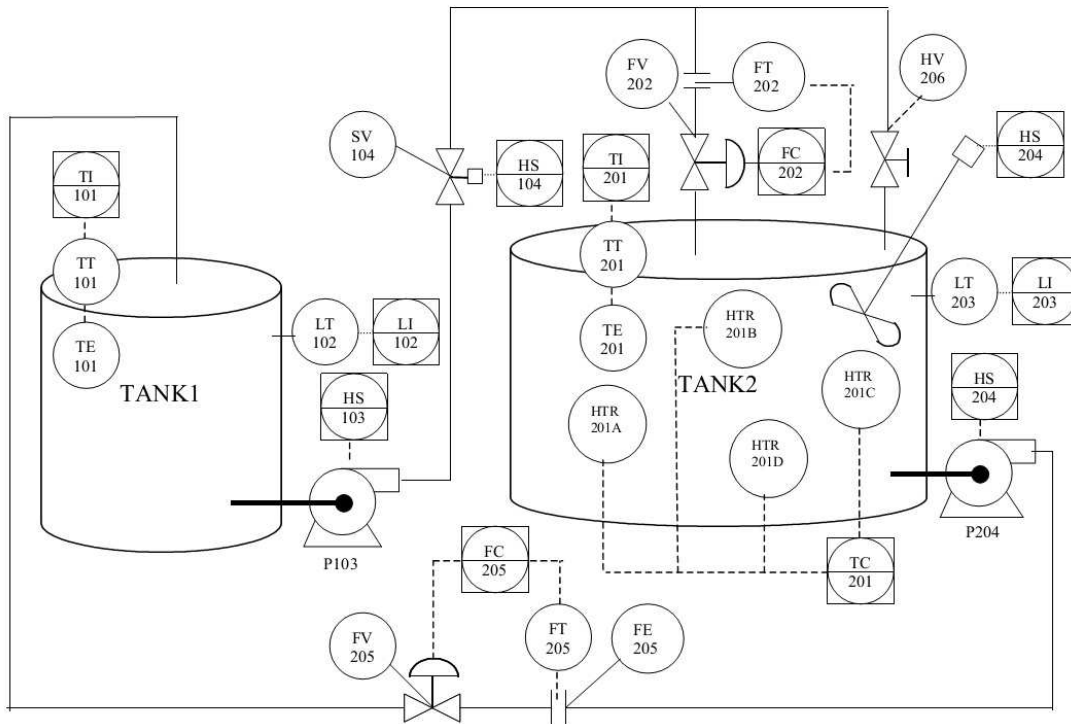


Figura 1: Diagrama de tubulação e instrumentação (P&ID) de dois tanques segundo simbologia e terminologia da norma ISA 5.1.

Tabela 1: Valores das correntes de fluxos.

Corrente F	Corrente C	Corrente P	Corrente R	Corrente W
$F = 120 \text{ Kg/h}$	$C = ? \text{ Kg/h}$	$P = ? \text{ Kg/h}$	$R = ? \text{ Kg/h}$	$W = ? \text{ Kg/h}$
Composição mássica (x): 25% em F 75% em A	Composição mássica (x): 70% em F 30% em A	Composição molar (y): 70% em F 30% em A	Relação mássica ( $x_F/x_A$ ): $\frac{0,4 \text{ Kg } F}{\text{Kg } A}$	Composição mássica (x): 100% em A
MM(F)=60			MM(A)=18	

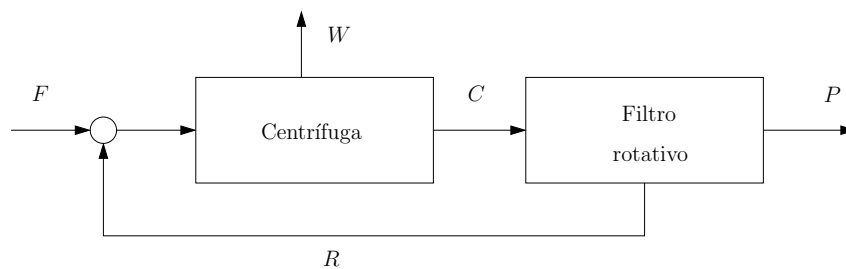


Figura 2: Fluxograma de recuperação de produto farmacêutico.

Observação:

- Massa molar de um produto A:  $MM(A) = \text{massa de 1 mol de A}$
- Composição ou fração mássica de um produto A numa mistura:

$$x_A = \frac{\text{massa de A}}{\text{massa total}}$$

- Composição ou fração molar de um produto A numa mistura:

$$y_A = \frac{\text{mols de A}}{\text{mols total}}$$

- Relação mássica de um produto A em relação a um produto B numa mistura:

$$\frac{x_A}{x_B} = \frac{\text{massa de A}}{\text{massa de B}}$$

3. Trocadores de calor são equipamentos muito utilizados na indústria de controle de processos. Considere o reservatório de aquecimento mostrado na Figura 3. Um fluxo de processo esta sendo aquecido no reservatório por um aquecedor elétrico. A proporção da transferência calorífica,  $\dot{Q}(t)$ , para o fluido de processo está relacionado ao sinal,  $m(t)$ , por

$$\dot{Q}(t) = am(t).$$

Você pode supor que o reservatório de aquecimento esta bem isolado (não troca calor com as vizinhanças), que o fluido esta bem misturado no reservatório e que a capacidade calorífica,  $c_p$ , e a densidade do fluido,  $\rho$ , são constantes. Desenvolva o modelo matemático que descreve como a temperatura de entrada,  $T_e(t)$ , o fluxo de processo,  $f(t)$ , e o sinal,  $m(t)$ , afetam a temperatura de saída,  $T(t)$ . Depois determine as funções de transferência e desenhe o diagrama de blocos para este processo. O volume do reservatório é  $V$ .

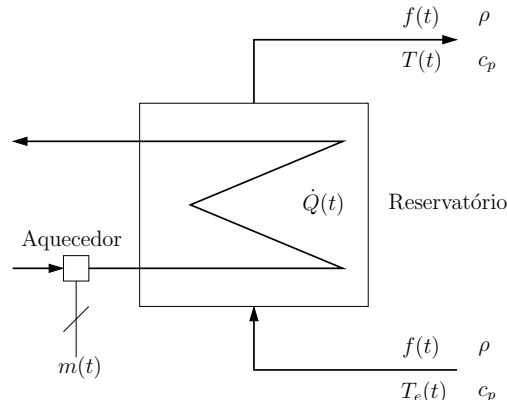


Figura 3: Trocador de calor.

4. Considere o processo de mistura mostrado na Figura 4. Deseja-se entender como os fluxos ( $f_1(t)$  e  $f_2(t)$ ) e as concentrações do produto A ( $c_{a1}(t)$  e  $c_{a2}(t)$ ) de entrada afetam o nível do tanque ( $h(t)$ ) e a concentração de saída ( $c_a(t)$ ). Desenvolva o modelo matemático (equações diferenciais) que descreve o processo e determine as funções de transferência relacionando  $H(s)$  e  $C_a(s)$  com as demais variáveis do problema ( $F_1(s)$ ,  $F_2(s)$ ,  $F(s)$ ,  $C_{a1}(s)$  e  $C_{a2}(s)$ ). Em geral as densidades são funções da concentração e temperatura mas usualmente (mas nem sempre) essa dependência é fraca. Assuma que as densidades são similares e constantes ( $\rho_1 = \rho_2 = \rho$ ).

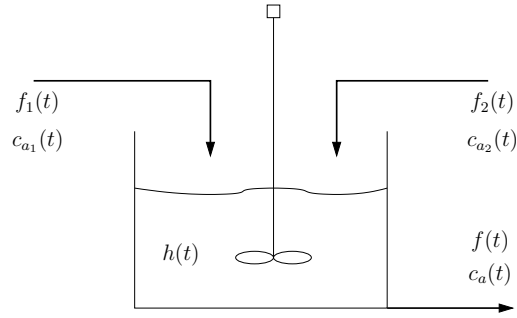


Figura 4: Tanque de mistura com agitação.

5. Considere o mesmo processo de mistura do exercício anterior considerando as válvulas de controle e a bomba conforme mostrados na Figura 5. Para uma dada vazão fixa da bomba  $f_b$ , considerando a corrente 2 contendo somente o produto A e supondo que é possível a leitura somente do nível  $h(t)$  e da concentração  $c_a(t)$ , explique como seria possível implementar estratégias de controle do do nível  $h(t)$  e da concentração de saída  $c_a(t)$  de forma que funcionem concomitantemente. Fundamente sua explicação com base nas funções de transferência obtidas no exercício anterior.

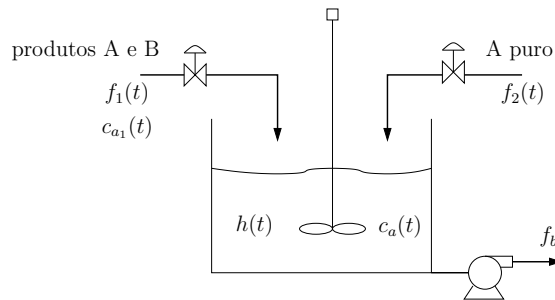


Figura 5: Controle de tanque de mistura com agitação.

6. Considere o tanque com fluxo de reciclo (recirculação) mostrado na Figura 6. Objetiva-se estudar a dinâmica do nível,  $h(t)$ , de acordo com o fluxo de entrada,  $f_e(t)$ , e a abertura das válvulas,  $m(t)$ . Considere a densidade,  $\rho$ , a área do tanque,  $A$ , e a vazão da bomba,  $f_b$ , como sendo conhecidas e constantes. A abertura das válvulas é determinada por  $m(t) \in [0, 1]$ .

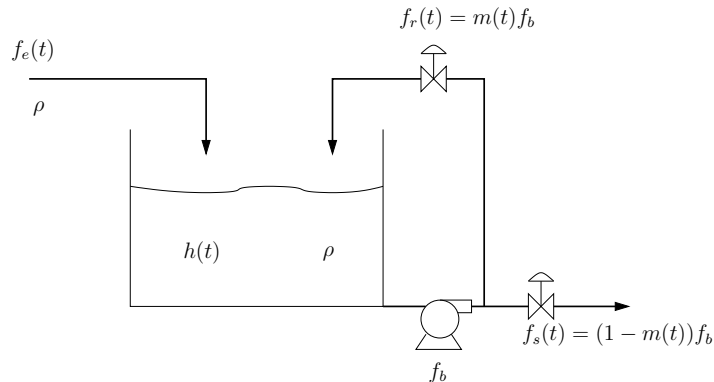


Figura 6: Tanque de nível com recirculação.

- (a) Obtenha o modelo matemático do processo (equações diferenciais).

- (b) Obtenha as funções de transferência relacionando o nível  $H(s)$  com o fluxo de entrada  $F_e(s)$  e o sinal das válvulas  $M(s)$ . do processo.
- (c) Desenhe o diagrama de blocos.
- (d) Calcule os graus de liberdade do processo.
- (e) Em relação a malha de controle de nível do tanque  $h(t)$ :
- Proponha uma estratégia de controle por realimentação.
  - Desenhe os transmissores, elementos finais de controle e controladores da estratégia de controle proposta usando a simbologia e terminologia da norma ISA 5.1.
  - Quais seriam as variáveis medidas, as variáveis manipuladas e as variáveis de distúrbio para essa estratégia? Recalcule os graus de liberdade.
7. Considere o tanque aquecido com agitação mostrado na Figura 7. Objetiva-se estudar a dinâmica do nível ( $h(t)$ ) e da temperatura ( $T(t)$ ). Considere como sendo conhecidos e constantes: a densidade ( $\rho$ ), a área do tanque ( $A$ ), a capacidade calorífica à pressão constante ( $c_p$ ) (em líquidos  $c_p \approx c_v$ , capacidade calorífica à volume constante) do tanque, a capacidade calorífica à pressão constante ( $c_{pv}$ ) do líquido que troca calor, a condutância térmica ( $U$ ,  $\dot{Q} = U(T_v(t) - T(t))$ ), a constante de vazão da válvula ( $C'_v$ ).

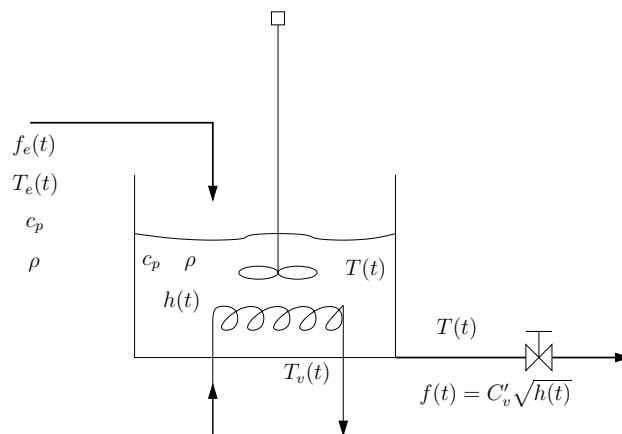


Figura 7: Tanque de aquecimento com agitação.

- Obtenha as equações diferenciais do processo (escreva o balanço de energia completo, com todos os termos, e mostre quais termos podem ser desprezados)
- Ache as funções de transferência relacionando  $H(s)$  e  $T(s)$  com as demais variáveis do problema.
- Desenhe o diagrama de blocos.
- Calcule os graus de liberdade do processo.
- Indique quem são as variáveis de estado (menor conjunto de variáveis que determina o estado de um sistema dinâmico).
- Quais poderiam ser os objetivos de controle e quem seriam as variáveis controladas (CV's).
- Em relação a malha de controle de temperatura do tanque ( $T(t)$ ):

- i. Proponha uma estratégia de controle por realimentação e uma estratégia de controle antecipatório.
  - ii. Desenhe os transmissores, elementos finais de controle e controladores de cada estratégia de controle proposta usando a simbologia e terminologia da norma ISA 5.1.
  - iii. Quais seriam as variáveis medidas, as variáveis manipuladas e as variáveis de distúrbio em cada estratégia? Recalcule os graus de liberdade.
  - iv. Considerando a estratégia de controle antecipatório (assuma  $T_v(t)$  como a única variável manipulada), qual seria a equação que fornece a temperatura necessária de  $T_v(t)$  em função dos valores de  $T_e(t)$  e  $f_e(t)$  para manter a temperatura  $T(t)$  em  $\bar{T}$ ?
- (h) Em relação a malha de controle de nível do tanque ( $h(t)$ ):
- i. Proponha uma estratégia de controle por realimentação.
  - ii. Desenhe os transmissores, elementos finais de controle e controladores da estratégia de controle proposta usando a simbologia e terminologia da norma ISA 5.1.
  - iii. Quais seriam as variáveis medidas, as variáveis manipuladas e as variáveis de distúrbio para essa estratégia? Recalcule os graus de liberdade.
  - iv. Considerando  $f(t) = mC'_v\sqrt{h(t)}$ , em que  $m \in [0, 1]$  é dado pela abertura da válvula, qual seria o valor mínimo que a constante de vazão da válvula ( $C'_v$ ) teria que assumir considerando o valor máximo de fluxo de entrada como sendo  $f_{e_{max}}$  e o valor mínimo de controle do tanque como sendo  $h_{min}$ ?
- (i) Escreva o balanço de energia do líquido refrigerante (ou aquecedor) que troca calor com o reservatório? Considere o fluxo como sendo  $f_v(t)$ , a densidade como  $\rho_v$ , a capacidade calorífica  $c_{p_v}$ , a temperatura de entrada como  $T_{v_e}$  e a temperatura de saída  $T_v(t)$  (considere  $T_v(t)$  para a troca de calor com o reservatório,  $\dot{Q} = U(T_v(t) - T(t))$ ).

8. Considere o processo mostrado na Figura 8. A velocidade do fluxo de massa de líquido através dos reservatórios é constante ( $\dot{m}_e$ ). São considerados constantes a densidade  $\rho$ , os volumes dos tanques  $V$  e as capacidades caloríficas dos tanques e dos fluxos  $c_p$ . Deseja-se saber como a temperatura de entrada  $T_e(t)$  e a transferência de calor  $\dot{Q}(t)$  afetam a temperatura de saída  $T_3(t)$ . Para esse processo, desenvolva o modelo matemático, determine as funções de transferência relacionando  $T_3(t)$  a  $T_e(t)$  e  $\dot{Q}(t)$ , e desenhe o diagrama de blocos.

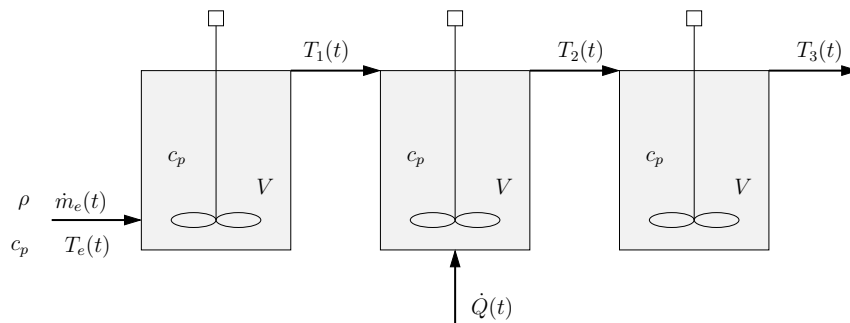


Figura 8: Tanques em série.

9. Desenvolva o modelo matemático para o sistema de tanques mostrados na Figura 9. As densidade do fluido  $\rho$  é constante e são conhecidas as áreas dos tanques  $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$ . O fluxo da bomba,  $f_5$ , é contante e independe do nível  $h_3(t)$ . O fluxo  $f_1(t)$  é determinado pelo ambiente externo. Os demais fluxos,  $f_2(t)$ ,  $f_3(t)$  e  $f_4(t)$ , são proporcionais às correspondentes pressões hidrostáticas da coluna de líquido (considere os coeficientes de vazão  $C_{v_2}$ ,  $C_{v_3}$  e  $C_{v_4}$  para as válvulas respectivas aos fluxos  $f_2(t)$ ,  $f_3(t)$  e  $f_4(t)$ ). Apresente a função de transferência relacionando o nível  $H_3(s)$  com o fluxo de entrada  $F_1(s)$ .

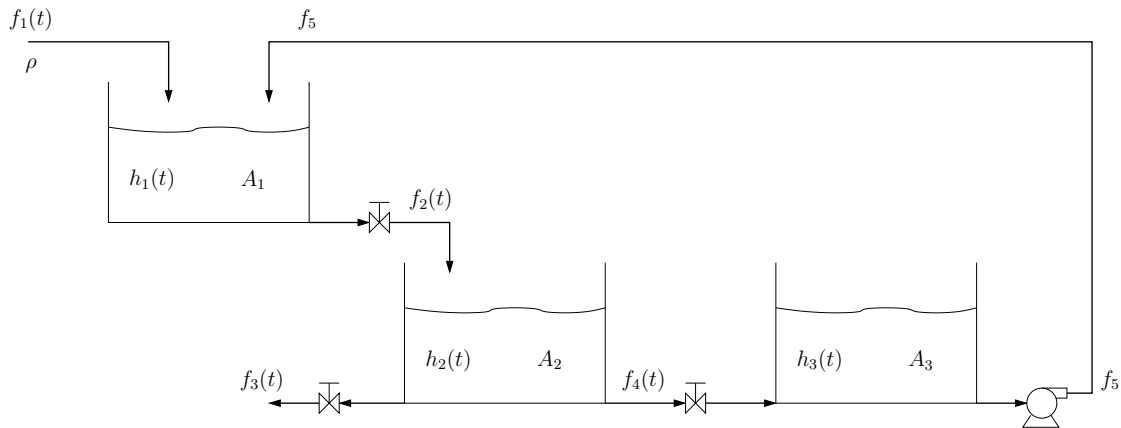


Figura 9: Tanques de nível em série.

10. Desenvolva o modelo matemático (equações diferenciais) para o sistema de tanques com aquecimento mostrados na Figura 10. As densidade do fluido  $\rho$ , as capacidades caloríficas à pressão constante  $c_p$ , as áreas dos tanques  $A_1$ ,  $A_2$  e  $A_3$ , são constantes e conhecidas. O fluxo  $f_e(t)$  e a temperatura  $T_e(t)$  são determinados pelo ambiente externo. Os demais fluxos,  $f_1(t)$ ,  $f_2(t)$  e  $f_3(t)$ , são proporcionais às correspondentes pressões hidrostáticas da coluna de líquido (considere os coeficientes de vazão  $C_{v_1}$ ,  $C_{v_2}$  e  $C_{v_3}$  para as válvulas respectivas aos fluxos  $f_1(t)$ ,  $f_2(t)$  e  $f_3(t)$ ). (Obs.: para este exemplo não é necessário encontrar as funções de transferência).

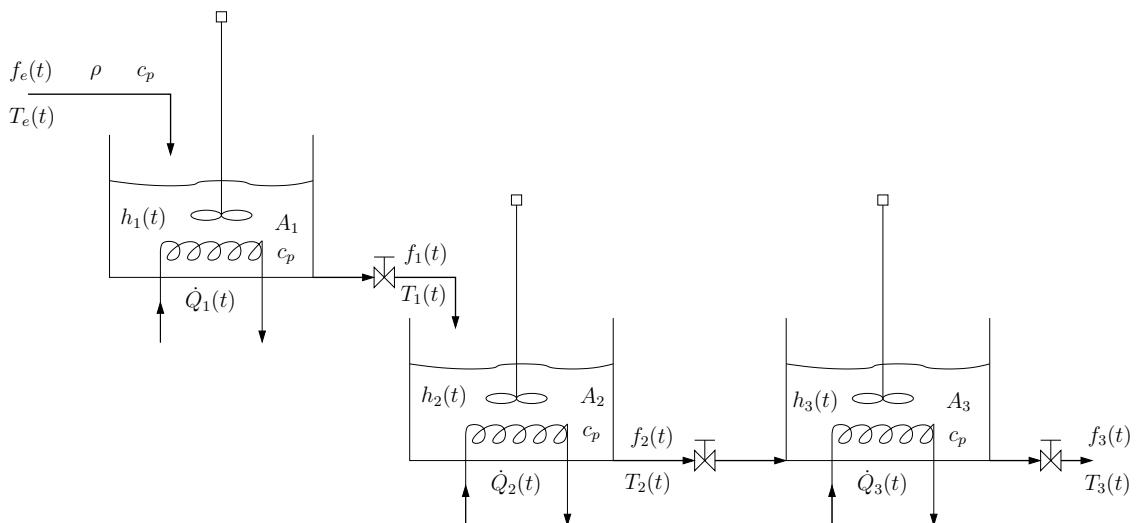


Figura 10: Tanques com aquecimento em série.