

PREFÁCIO

SEM PROBLEMAS ... é uma compilação de cem problemas de Controle de Processos aplicados nas provas do curso "IT-359-Controle de Processos" nos últimos cinco anos na UFRRJ. Vários desses problemas foram adaptados de livros citados nas referências bibliográficas.

Objetiva-se que este texto sirva como uma referência de auto-ajuda para os alunos de IT-359, que deverão tentar resolver os problemas baseados nas explicações das aulas e na consulta às referências indicadas.

Finalmente, o autor gostaria de agradecer e dedicar esta apostila aos alunos que neste período enfrentaram estas questões e o curso de Controle sem problemas.

MAURÍCIO B. DE SOUZA Jr.

SEM PROBLEMAS ...

	PÁGINA
1. INTRODUÇÃO AO CONTROLE DE PROCESSOS	1
2. DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO MATEMÁTICO	3
3. USO DE TRANSFORMADAS DE LAPLACE	10
4. FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DE PRIMEIRA ORDEM	12
5. FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DE SEGUNDA ORDEM	22
6. SISTEMAS DE ORDEM MAIS ELEVADA	32
7. CONTROLE POR REALIMENTAÇÃO NEGATIVA ("FEEDBACK")	35
8. ESTABILIDADE DE SISTEMAS "FEEDBACK"	45
9. CRITÉRIOS DE PROJETO E AJUSTE	51
10. ANÁLISE E RESPOSTA DE FREQUÊNCIA DE PROCESSOS LINEARES	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

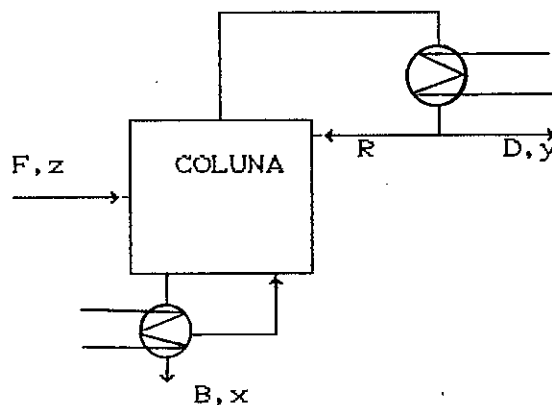
CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO AO CONTROLE DE PROCESSOS

I.1. A coluna de destilação mostrada abaixo é usada para destilar uma mistura binária. Os símbolos x , y e z denotam frações molares do componente mais volátil, enquanto B , D , R e F representam fluxos molares. Todos os fluxos podem ser medidos e manipulados, com exceção de F , que só pode ser medido. Um cromatógrafo provê medidas de y .

(a) Sugira um método de controle "feedback" e esboce um diagrama esquemático.

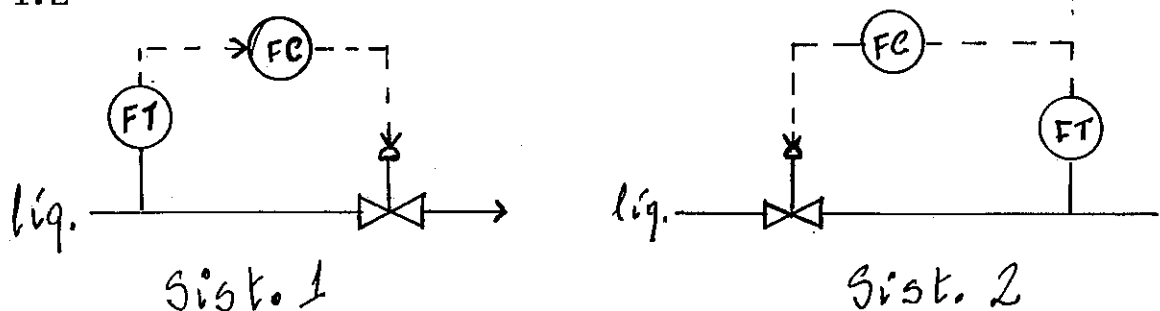
(b) Sugira um método de controle "feedforward" e esboce um diagrama esquemático.

FIGURA I.1



I.2. Dois laços de controle são mostrados no desenho. Indique se cada sistema é feedback ou feedforward. Justifique sua resposta. Pode-se supor que a distância entre o transmissor de fluxo e a válvula de controle é bastante pequena em cada sistema.

FIGURA I.2



I.3. Seja uma frase de um anúncio de jornal:

"EMAGRECER (...) EXIGE UM CONTROLE EFICIENTE".

a) Uma pessoa quer se manter em 60 Kgs. Todos os dias, ela se pesa, compara o peso medido com o desejado e, baseada nesta comparação, ela decide comer mais ou menos, naquele dia, do que sua alimentação diária básica.

b) Uma pessoa quer se manter nos seus 60 Kgs. Ela tem uma alimentação diária básica e não se pesa. No entanto, ela dispõe de uma tabela de valor calórico dos alimentos. Sempre que ela consome algo extra, ela calcula quanto aquilo vai lhe engordar e compensa imediatamente consumindo menos do que a sua alimentação básica diária.

Nos itens a) e b), em que classificação de controle você situa a estratégia adotada: "FEEDBACK" ou "FEEDFOWARD"? Por quê?

c) Usando seus conhecimentos de controle de processos, responda que estratégia de controle lhe parece mais adequada neste caso: FB, FF ou uma combinação das duas? Por quê?

CAPÍTULO II: DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO MATEMÁTICO

"A modelagem matemática de fenômenos químicos e físicos, encontrados em sistemas de processo de interesse para os engenheiros químicos, é uma forma de ARTE CIENTÍFICA. Como todo tipo de arte, ela não obedece claramente a regras e receitas. Ela é uma extensão de toda a experiência educacional prévia e da experiência prática prévia do modelador. Portanto, se os assuntos abordados lhe geraram mais perguntas que respostas, você não deve se desesperar. Uma modelagem boa e eficiente é adquirida lentamente, com habilidade crescente". Stephanopoulos, p. 80.

II.1. Nos itens a seguir, escreva os balanços solicitados:

a) Considere o tanque com líquido perfeitamente misturado exibido abaixo, onde entra uma corrente com uma vazão volumétrica F_i (ft^3/s) e uma densidade ρ_i (lb_m/ft^3).

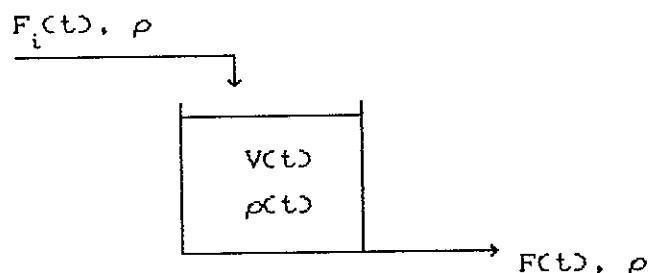
A retenção volumétrica no tanque é V (ft^3) e a densidade ρ (lb_m/ft^3).

A vazão volumétrica de saída é F (ft^3/s) e sua densidade também ρ (lb_m/ft^3) (admitiu-se mistura perfeita).

O sistema para o qual nós queremos escrever a equação de balanço de massa total é toda a fase líquida no tanque (sistema macroscópico).

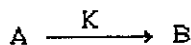
Escreva o balanço de massa para o tanque completo. Cheque as unidades.

FIGURA II.1.a.



b) Considere o mesmo tanque de líquido perfeitamente misturado usado acima, com a diferença que agora uma reação química ocorre no líquido no tanque. O sistema é agora um CSTR, como mostrado na FIGURA II.1.b..

Um componente A reage irreversivelmente e a uma velocidade específica de reação K para formar um produto, componente B.



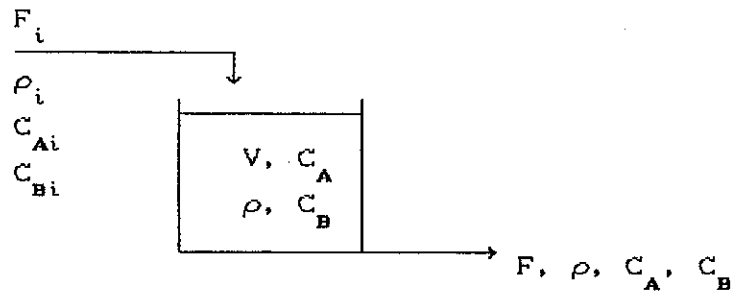


FIGURA II.1.b.

Seja a concentração do componente A na corrente de entrada C_{Ai} (lbmol de A/ft³) e no reator C_A .

Supondo uma reação simples de primeira ordem, a taxa de consumo do reagente A por unidade de volume será diretamente proporcional à concentração de A no tanque naquele momento. Ou seja:

$$r = -K C_A \quad (1/s)(\text{lbmol de A/ft}^3)$$

Escreva as equações de balanço de massa para o componente A e para o componente B.

c) Suponha que se tenha o mesmo sistema macroscópico que o descrito acima, com a diferença que agora reações consecutivas ocorrem.

O reagente A produz B a uma velocidade específica de reação K_1 , mas B pode reagir para formar o componente C a uma velocidade específica de reação K_2 .

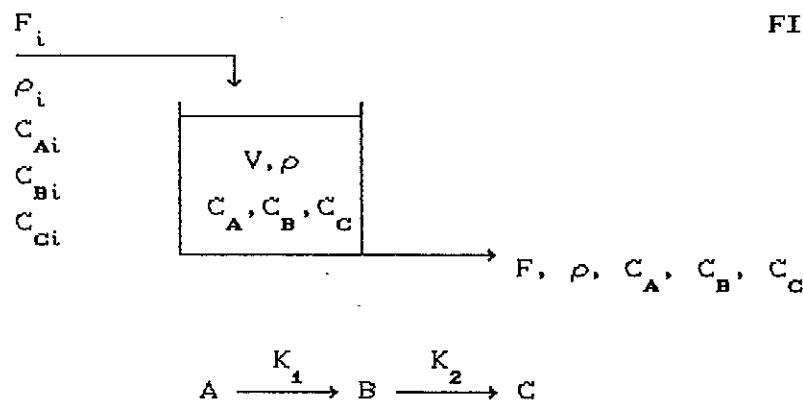
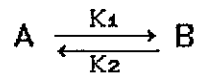


FIGURA II.1.c.

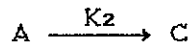
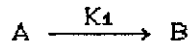
Considere reações de primeira ordem.

Escreva as equações de balanço de massa para os componentes A, B e C.

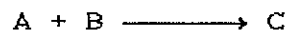
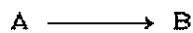
d) Refaça o item b) para a seguinte reação (reversível, primeira ordem, simultânea):



e) Refaça o item c) para as seguintes reações simultâneas (primeira ordem, isotérmicas):



II.2. A sequência de reações químicas:



ocorre isotermicamente em um reator contínuo do tipo tanque agitado. Estudos cinéticos em batelada indicaram que a primeira reação é de segunda ordem com respeito a c_A , enquanto a taxa de reação para a segunda reação é primeira ordem com respeito a c_A e c_B :

$$\left. \begin{aligned} r_1 &= k_1 c_A^2 \\ r_2 &= k_2 c_A c_B \end{aligned} \right\} r_1, r_2 \text{ [=] } \frac{\text{mol}}{(\text{ft}^3)(\text{h})}$$

Pode-se supor que o reator tem um volume constante V e uma vazão volumétrica de alimentação constante q e que a alimentação contém traços de B, mas não contém C.

Desenvolva um modelo não estacionário que dê as concentrações de A, B e C para variações na concentração de B na alimentação (considere a concentração de entrada de A constante).

II.3. Considere os dois sistemas exibidos nas FIGURAS II.3.a. e b.. O sistema 1 difere do sistema 2 pelo fato de que o nível de líquido no tanque 2 não afeta o fluxo efluente do tanque 1, como o faz para o sistema 2.

a) Desenvolva o modelo matemático para cada um dos dois sistemas.

b) Quais são as variáveis de estado para cada sistema? Que tipo de

equações de balanço você usou?

c) Que modelo é mais fácil de resolver? (o 1?; ou o 2?). Por quê?

Considere que a vazão volumétrica de saída de um tanque é proporcional à pressão hidrostática do líquido que causa a vazão do líquido. A área da seção transversal do tanque 1 é A_1 (ft^2) e do tanque 2 é A_2 (ft^2) (para ambos sistemas). As vazões volumétricas F_1 , F_2 e F_3 estão em ft^3/min .

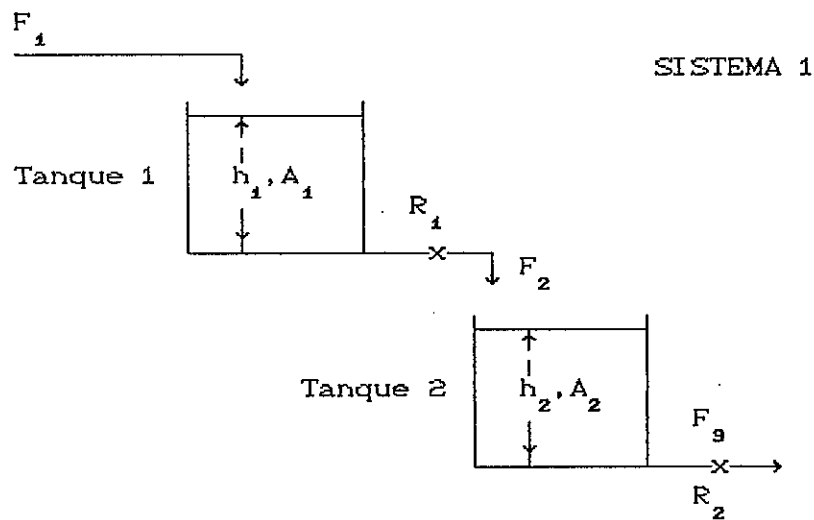


FIGURA II.3.a.

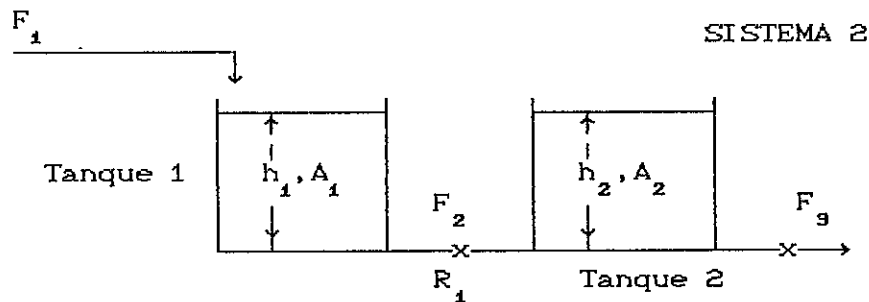


FIGURA II.3.b.

II.4. Desenvolva o modelo matemático para o sistema mostrado abaixo. Quais são as variáveis de estado para este sistema e que tipos de equações de balanço você usou? Todas as vazões são volumétricas e as áreas das seções transversais dos três tanques são A_1 , A_2 e A_3 (ft^2).

respectivamente. A vazão volumétrica F_5 é constante e não depende de h_3 , enquanto todas as outras vazões volumétricas efluentes são proporcionais às pressões hidrostáticas do líquido correspondentes que causam a vazão.

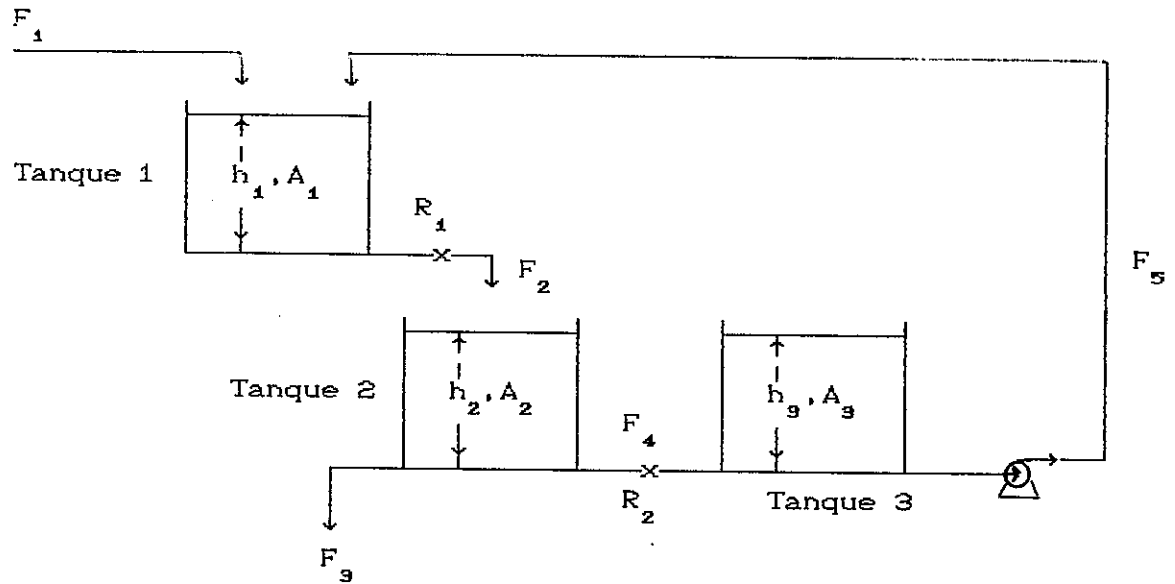


FIGURA II.4.

II.5. Um aquecedor doméstico é esquematicamente mostrado na FIGURA II.5..

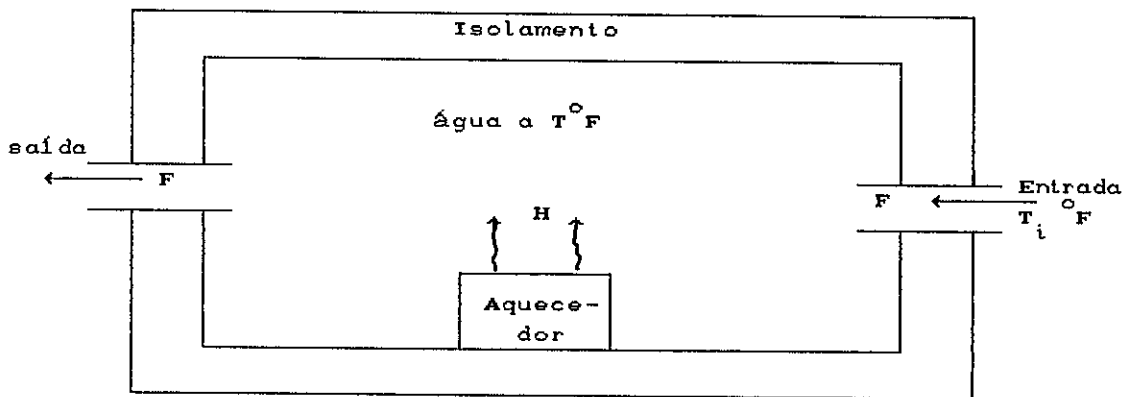


FIGURA II.5. - aquecedor de água doméstico

Água a uma temperatura T_i °F flui para dentro do tanque a uma taxa F libras por segundo. Água a uma temperatura T °F flui para fora do tanque a uma mesma razão. O tanque está cercado por isolamento com uma resistência térmica R - graus por (Btu por segundo). A temperatura do

ambiente na sala onde o aquecedor está localizado é T_r °F. O elemento de aquecimento do aquecedor, de água adiciona energia calorífica à água a uma taxa H Btu por segundo. O tanque contém W libras de água [O calor específico da água é 1 Btu por (libra °F)]. As seguintes simplificações são feitas:

(i) não há armazenamento de calor no isolamento;

(ii) há um pequeno uso constante de água; ou seja, f é uma constante não negativa pequena.

(iii) o tanque é projetado de tal modo que a temperatura da água dentro do tanque é uniforme (i.e., mistura perfeita).

Pede-se:

- escrever uma equação diferencial para $T(t)$ que descreva o balanço do fluxo de calor.

II.6. As seguintes equações diferenciais fornecem modelos matemáticos para vários processos. Quais deles são lineares e quais são não lineares?

Processo I:
$$y \frac{dy}{dt} + y = 10t + 5$$

Processo II:
$$a_1 \frac{dy_1}{dt} + a_2 \frac{dy_2}{dt} = m_1(t) + d_1(t)$$

$$b_1 \frac{dy_1}{dt} + b_2 \frac{dy_2}{dt} = m_2(t) + d_2(t)$$

a_1 , a_2 , b_1 e b_2 são constantes.

Processo III:
$$a_1 \frac{dy_1}{dt} + y_1 \frac{dy_2}{dt} = m_1(t)$$

$$b_1 \frac{dy_1}{dt} + b_2 \frac{dy_2}{dt} = \cos \omega t$$

a_1 , b_1 , b_2 e ω são constantes.

II.7. Retome a QUESTÃO II.1.a.. Recorde que o balanço de massa para o

componente A é descrito por:

$$\frac{d(C_A V)}{dt} = F_i C_{Ai} - F C_A - K C_A V$$

Considere V (a retenção — "hold-up" — volumétrica constante) e as seguintes funções do tempo:

$$F_i = F_i(t) \quad (\text{valor estacionário: } F_{i,e})$$

$$C_{Ai} = C_{Ai}(t) \quad (\text{valor estacionário: } C_{Ai,e})$$

$$F = F(t) \quad (\text{valor estacionário: } F_e)$$

$$T = T(t) \quad (\text{valor estacionário: } T_e)$$

$$C_A = C_A(t) \quad (\text{valor estacionário: } C_{A,e})$$

Considere também que se tem a expressão de Arrhenius para a velocidade específica:

$$K = K_o e^{-E/RT}$$

Faça as suposições acima e linearize as expressões resultantes.

CAPÍTULO III: USO DE TRANSFORMADAS DE LAPLACE

III.1. Um processo segue o seguinte modelo de equação diferencial:

$$\frac{d^3 y'}{dt^3} + 5 \frac{d^2 y'}{dt^2} + 8 \frac{dy'}{dt} + 4 y' = 2 \frac{dx'}{dt} + 3 x'$$

Ache a expressão relacionando $\bar{y}'(s)$ a $\bar{x}'(s)$. Ambos x' e y' são variáveis-desvio com valores iniciais das funções e das derivadas nulos

III.2. O procedimento de "start-up" para um reator batelada inclui um passo de aquecimento onde a temperatura do reator é gradualmente elevada até chegar à temperatura nominal de operação de 75 °C. A temperatura desejada do perfil $T(t)$ é mostrada no desenho. Qual é $\bar{T}'(s)$? Use a definição de Transformada de Laplace.

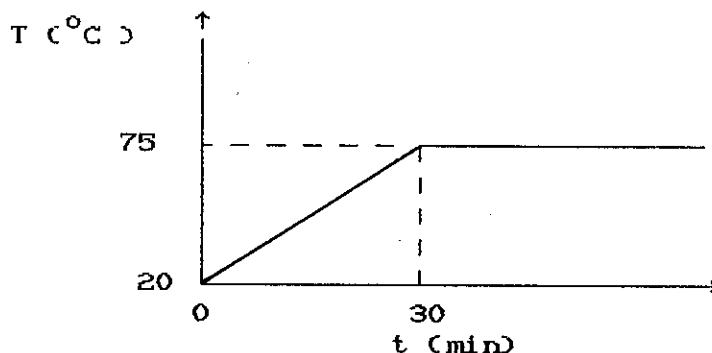


FIGURA III.2.

III.3. Define-se uma função rampa na forma:

$$f'(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ K \cdot t & t \geq 0 \end{cases}$$

onde K é uma constante. Calcule $\bar{f}'(s)$.

III.4. Repita a QUESTÃO III.2, definindo $T'(t)$ como a diferença entre duas funções rampas e usando o resultado obtido na questão anterior.

III.5. Admita que a concentração de alimentação de um reagente A para um reator é, inicialmente, 1 lbmol/ft³. Esta concentração é então aumentada de 10 % do seu valor inicial por 1 hora, em seguida cai para 10 % do seu valor inicial por 1 hora e finalmente retorna ao seu valor original,

conforme exibido na FIGURA III.5. abaixo:

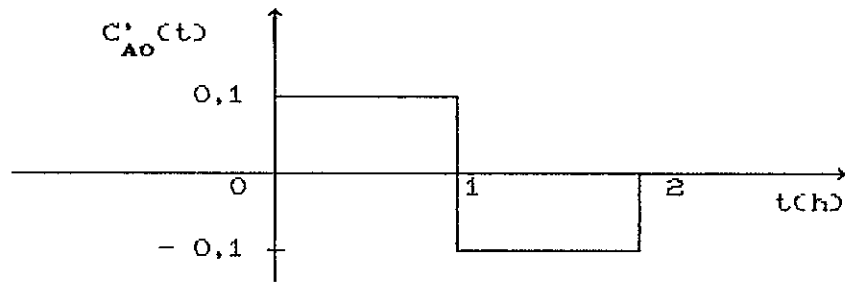


FIGURA III.5.

Aplicando a definição de Transformada de Laplace, calcule $\bar{C}'_{AO}(s)$.

CAPÍTULO IV: FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DE PRIMEIRA ORDEM

IV.1. Um aquecedor do tipo tanque agitado com retenção volumétrica constante é usado para pré-aquecer uma mistura reagente, contendo um catalisador sólido em suspensão, com fluxo mássico constante de 1000 Kg/h. O volume no tanque é 2 m^3 e a densidade e o calor específico da mistura em suspensão são, respectivamente, 900 Kg/m^3 e $1 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$. O processo inicialmente está operando com temperaturas de entrada de 100 e $130 \text{ }^\circ\text{C}$. Sejam as seguintes perguntas sobre a operação do processo:

- a) Qual é a entrada de calor proveniente do aquecedor no EE inicial?
- b) Se a entrada de calor é aumentada de +30%, quanto tempo vai levar para o processo alcançar a temperatura de saída do novo EE (99% do valor final) e qual será esta nova temperatura?
- c) Se a temperatura de entrada é repentinamente aumentada de 100 para $120 \text{ }^\circ\text{C}$, quanto tempo vai levar antes que a temperatura de saída mude de 130 para $135 \text{ }^\circ\text{C}$ (supondo as condições originais de EE, ou seja, não houve mudança na entrada de calor)?
- d) Admita que a temperatura de entrada seja aumentada bruscamente de 100 para $130 \text{ }^\circ\text{C}$, ao mesmo tempo que $Q(t)$ é aumentado 10 % em relação ao seu valor estacionário inicial. Quanto é $T(t)$ depois de um tempo suficientemente grande?

IV.2. Um tanque agitado com aquecimento está operando com uma vazão mássica de 180 lb/min de um líquido com capacidade calorífica específica e densidade iguais a $0,32 \text{ Btu} / \text{lb } ^\circ\text{F}$ e $62,4 \text{ lb} / \text{ft}^3$, respectivamente. O volume do tanque é constante e vale $2,4 \text{ ft}^3$.

Suponha que uma entrada de calor de $2000 \text{ Btu} / \text{min}$ e uma temperatura de entrada de $80 \text{ }^\circ\text{F}$ produziram um estado estacionário.

- a) Calcule a temperatura de saída estacionária T_e .

O aquecimento do líquido ocorre devido a uma serpentina, dentro da qual vapor condensa. Chame $Q(t)$ a taxa de adição de calor ao líquido no tanque. $Q(t)$ é função de uma lei de controle, onde o controlador ajusta a posição da válvula de controle na linha de vapor.

Subitamente, por falta de ar para instrumentação, a válvula que controla a passagem de vapor para a serpentina ficou totalmente fechada e o calor cedido foi a zero ($Q(t) = 0$, para todo $t \geq 0$).

b) Escreva uma expressão para $T(t)$. Qual a nova temperatura do tanque depois de um tempo longo ?

c) Quanto tempo vai levar para $T'(t)$ alcançar 63,21 % do seu valor final?

IV.3. Um tanque agitado com retenção volumétrica constante e aquecedor elétrico é usado para pré-aquecer uma mistura reagente com fluxo volumétrico constante $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$. O volume no tanque é $2,5 \text{ m}^3$ e a densidade e o calor específico da mistura são, respectivamente, 800 Kg/m^3 e $1,2 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$. O processo inicialmente está operando com temperaturas de entrada e saída de 90°C e 120°C .

a) Admita que $Q(t)$ é mantido constante, mas que $T'_i(t)$ varia conforme a FIGURA IV.3. abaixo:

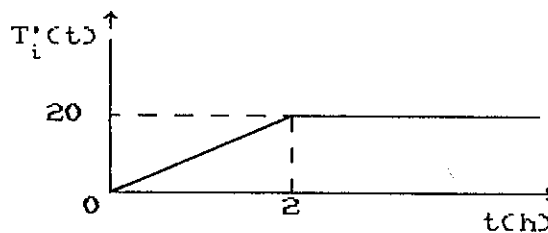


FIGURA IV.3.

Escreva expressões para $T(t)$ e calcule $T(t)$ para $t \leq 2$ e $t \geq 2$. Quanto é $T(t)$ depois de um tempo suficientemente grande ?

b) Se $Q(t)$ é mantido constante, mas a temperatura de entrada começa a aumentar linearmente, a partir de $t = 0$, a uma taxa de $10^\circ\text{C}/\text{h}$, calcule uma expressão para a temperatura de saída em função do tempo.

c) Para as perturbações dos itens a) e b), plote as curvas $T'(t)$ e $T'_i(t)$ no mesmo gráfico (um para cada perturbação).

IV.4. Um aquecedor do tipo tanque agitado com retenção volumétrica constante é usado para pré-aquecer uma mistura reagente com vazão

mássica constante de 2400 Kg/h. O volume no tanque é 1,6 m³ e a densidade e o calor específico da mistura em suspensão são, respectivamente, 800 Kg/m³ e 1 cal/g °C. O processo inicialmente está operando com temperaturas de entrada e de saída de 80 e 120 °C, respectivamente. Sejam as seguintes perguntas sobre a operação do processo:

Se a temperatura de entrada cai subitamente para 64 °C e permanece neste valor, pergunta-se:

- De que percentual deverá aumentar a taxa de calor cedida à mistura reagente de modo a que a temperatura de saída volte aos 120 °C ?
- Admitindo que a modificação no calor cedido é imediata, quanto tempo levará para a temperatura de saída retornar aos 120 °C ?

IV.5. O conteúdo de um aquecedor tipo tanque agitado é aquecido a uma taxa constante Q (Btu/h) usando um aquecedor elétrico. A vazão w (lbm/h) e o volume V (ft³) são constantes, mas a perda de calor para o meio ambiente Q_L (Btu/h) varia com a velocidade do vento $v(t)$, de acordo com as expressões:

$$Q_L = U(t) A (T - T_a)$$

$$U(t) = U_0 + b v(t)$$

onde U_0 , A , b e T_a são constantes. Desenvolva a função de transferência entre a temperatura de saída (em variáveis-desvio) \bar{T}' e a velocidade do vento \bar{v}' .

A temperatura de entrada não varia com o tempo, nem há variações na taxa de calor Q cedida ao conteúdo do tanque pelo aquecedor elétrico.

Suponha que em $t = 0$ todas as variáveis estão no estado estacionário.

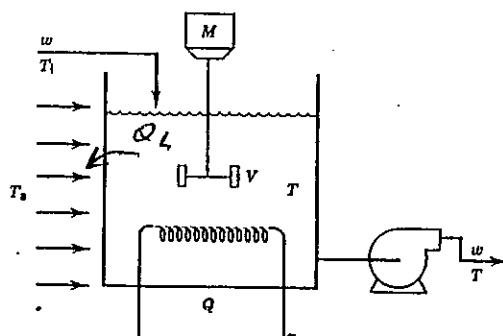


FIGURA IV. 5.

IV.6. $T =$ temperatura do meio

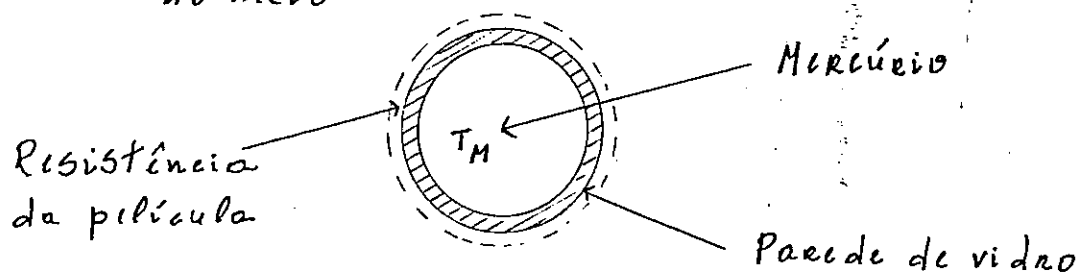


FIGURA IV.6.

A figura acima exibe a visão de uma seção transversal do bulbo de um termômetro de mercúrio. Seja T a temperatura do fluido em torno do termômetro e seja T_m a leitura do termômetro. Suponha que o coeficiente de filme de transferência de calor, h_f ($\text{cal} / \text{h ft}^2 \text{ } ^\circ\text{F}$), determina a quantidade de calor transferida do fluido para o mercúrio do bulbo (isto é, a resistência da parede de vidro à transferência de calor é desprezível). Suponha também que a capacidade calorífica do mercúrio é muito maior que a do tubo de vidro. Finalmente, supõe-se que a parede não se expande nem se contrai.

a) Mostre que a leitura do termômetro segue um comportamento de primeira ordem para qualquer mudança na temperatura do fluido ambiente.

b) Deduza a função de transferência entre T_m e T .

c) Desenvolva as equações que definem a constante de tempo e o ganho estático.

d) Esboce a resposta qualitativa de T_m a mudança degrau em T para vários valores do coeficiente de filme h_f . Usando argumentos físicos explique o comportamento observado.

e) Um termômetro com constante de tempo de 1 min está em equilíbrio com um banho a $100 \text{ } ^\circ\text{F}$. Repentinamente, este termômetro é colocado em um outro banho a $110 \text{ } ^\circ\text{F}$ e deixado lá por 1 minuto, depois do qual ele é imediatamente retornada ao banho a $100 \text{ } ^\circ\text{F}$. Calcule a leitura do termômetro em $t = 0,5 \text{ min}$ e $t = 2,0 \text{ min}$.

f) Um termômetro tendo constante de tempo de 0,2 minutos é colocado em um banho, e após atingido o equilíbrio térmico com o banho, a

temperatura deste cresce linearmente com o tempo, a uma velocidade de $1^\circ/\text{min}$. Qual é a diferença entre as temperaturas indicadas e a do banho: (i) a 0,1 min, (ii) 1,0 min após o início da variação da temperatura? (iii). Qual é o desvio entre a temperatura indicada e a do banho e quando ocorre? (iv). Plotar a função perturbação e a resposta em um mesmo gráfico. Após transcorrido um tempo suficientemente longo, de quantos minutos a resposta do sistema está em atraso em relação à entrada?

IV.7. O comportamento dinâmico de um reator tanque agitado pode ser representado pela função de transferência:

$$\frac{\bar{C}'(s)}{\bar{C}_f'(s)} = \frac{0,3}{4s + 1}$$

onde C' é concentração (gmol/l) na saída do reator em variáveis desvios, C'_f é a concentração (gmol/l) na alimentação. Obtenha a resposta $C'(t)$ para a perturbação em C'_f mostrada no desenho.

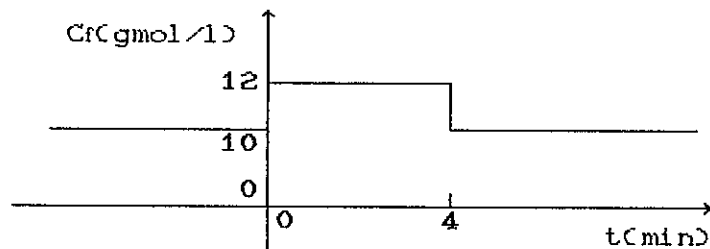


FIGURA IV.7.

IV.8. Um sistema apresenta função de transferência de 1^{a} ordem:

$$G(s) = \frac{\bar{y}'(s)}{\bar{f}'(s)} = \frac{K_p}{\tau_p s + 1}$$

De modo a se identificar o sistema, aplicou-se um degrau unitário em $f(t)$ (ou seja, $f'(t) = 1$) e observou-se a saída $y'(t)$ exibida na FIGURA IV.8.a.. A FIGURA IV.8.a. apresenta também a reta tangente à curva em $t=0$.

a. Quais os parâmetros K_p e τ_p ? Como você os obteve?

b. Admita agora que o mesmo sistema (K_p e τ_p calculados no item a.) é submetido à perturbação $f'(t)$ exibida na FIGURA IV.8.b..

b.1 Escreva a expressão matemática que descreve $y'(t)$ resultante.

b.2 Plote $y'(t)$ na FIGURA IV.8.b..

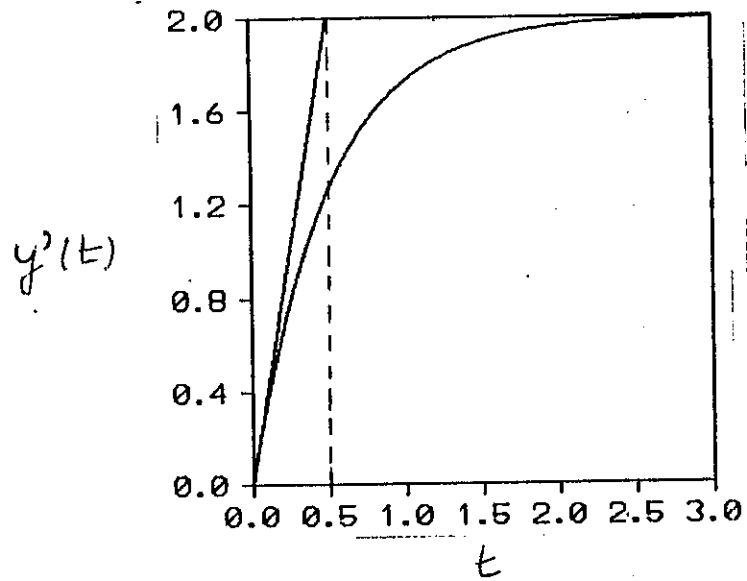


FIGURA IV.8. a.

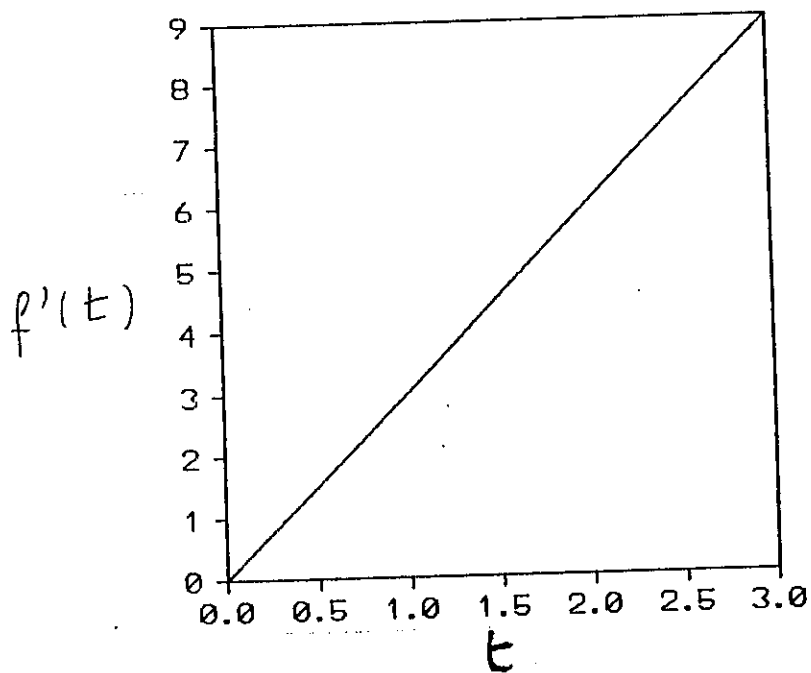


FIGURA IV.8. b.

IV.9. Um tanque cilíndrico com resistência linear — vide FIGURA IV.9.a. — está operando no estado estacionário com uma vazão de 1 cfm e um nível de líquido de 1 ft.

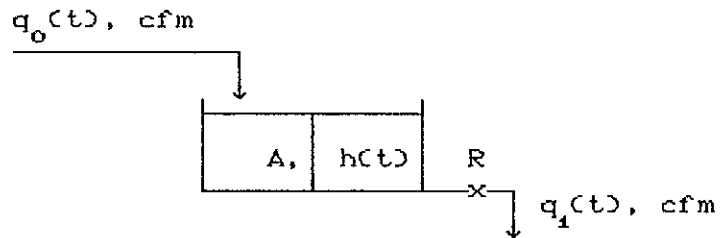


FIGURA IV.9.a.

a) Sabe-se que se a vazão de entrada fosse duplicada, o nível de líquido aumentaria 0,632 ft em 2 minutos. Escreva a função de transferência entre a vazão de entrada e o nível de líquido.

b) Suponha agora que a vazão $q_0(t)$ varia como mostrado na FIGURA IV.9.b.. Determine $q'_0(t)$ e $\bar{q}'_0(s)$. Note que q'_0 é a vazão em variáveis desvios;

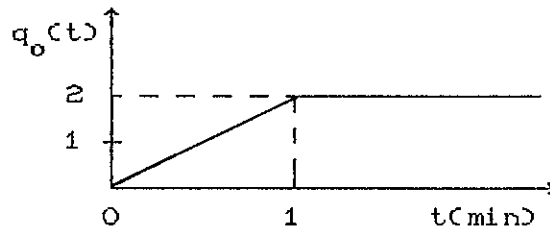


FIGURA IV.9.b.

c) Supondo que $q_0(t)$ varia conforme o item b), escreva expressões para $h'(t)$ nos intervalos: i. $0 \leq t < 1$; ii. $1 \leq t$; iii. $t \rightarrow \infty$.

IV.10. Seja o tanque:

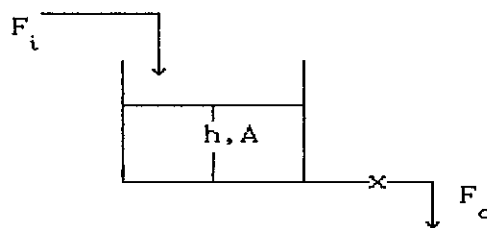


FIGURA IV.10.

onde:
$$\begin{cases} F_o = 3h \\ A = \text{área da seção transversal} = 10 \text{ ft}^2 \end{cases}$$

Se no EE inicial o tanque está cheio pela metade para uma vazão volumétrica de entrada de $6 \text{ ft}^3/\text{min}$, calcular qual o maior valor de degrau em F_i que provoca o transbordamento do tanque.

IV.11. Seja o tanque abaixo, com área da seção de 2 ft^2 , inicialmente em EE com nível de 3 ft e vazões de entrada e saída de $10 \text{ ft}^3/\text{min}$. Subitamente, a vazão de entrada é aumentada para $11 \text{ ft}^3/\text{min}$ por 2 minutos, quando é retornada ao seu valor inicial. Calcule expressões para $h(t)$ e faça um gráfico $h(t)$ vs. t .

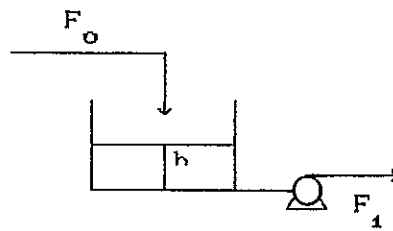


FIGURA IV.11.

IV.12. Dois sistemas de armazenamento de líquido são mostrados na FIGURA IV.12 abaixo. Cada tanque tem 4 pés de diâmetro. Para o Sistema 1, a válvula atua como uma resistência linear com a relação $F_1 = h/R$ ($R = 0,90 \text{ min}/\text{ft}^2$), onde F_1 é dado em ft^3/min e h , em ft . Para o Sistema II, variações no nível de líquido h não afetam o fluxo de saída F_1 . Suponha que cada sistema esteja inicialmente no estado estacionário com $h_e = 6 \text{ ft}$ e $F_{o,e} = 6,67 \text{ ft}^3/\text{min}$ e que, no tempo $t = 0$, o fluxo de entrada repentinamente muda de $6,67$ para $9,36 \text{ ft}^3/\text{min}$.

Se cada tanque tem 8 ft , qual tanque transborda primeiro? Quando?

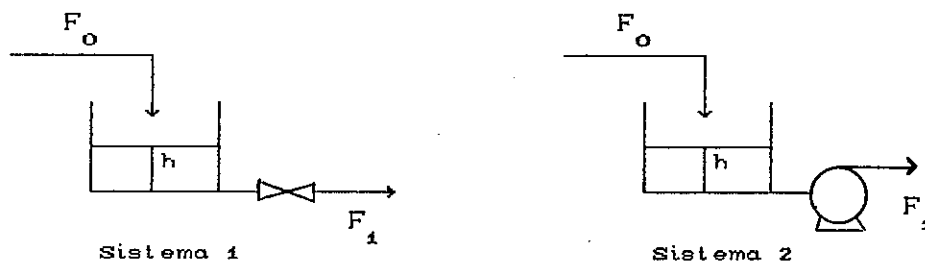


FIGURA IV.12

IV.13. Seja um tanque de nível, cilíndrico, com diâmetro de 5 ft e capacidade máxima de 10 ft , apresentado na FIGURA IV.13. abaixo:

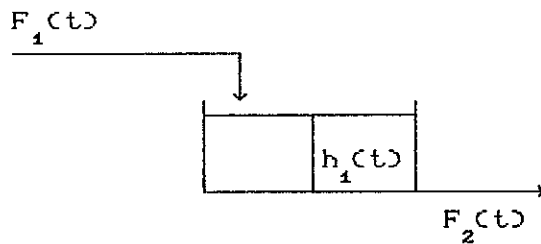


FIGURA IV.13.

onde as vazões são medidas em gal/h e $F_2(t) = 8000 [h(t)]^{0,7}$.

Suponha que este tanque está operando com uma vazão estacionária inicial de 20000 gal/h. A vazão de alimentação é então aumentada, em $t = 0$ h, para + 10 % acima desse valor inicial, por 1 h. Em seguida, a vazão é reduzida para 10 % abaixo do valor inicial, por 1 h. Finalmente, a vazão é retornada ao valor inicial de 20000 gal/h.

a) Calcular a resposta $h(t)$ aproximada do tanque, para:

- i. $0 \leq t < 1$
- ii. $1 \leq t < 2$
- iii. $2 \leq t$
- iv. $\lim t \rightarrow \infty$

b) Se as perturbações tivessem sido de 1 % (ao invés de 10 %), a resposta calculada em a) seria mais, menos ou igualmente acurada quando comparada com a resposta do sistema verdadeiro? Por quê?

IV.14. Seja o tanque:

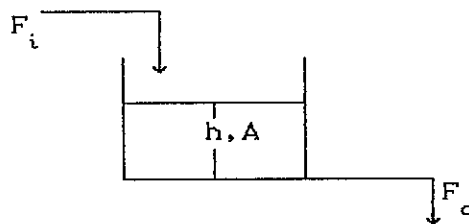


FIGURA IV.14.

onde:

$$\begin{cases} F_o = 4h^{1/2} \\ A = \text{área da seção transversal} = 10 \text{ ft}^2 \end{cases}$$

O tanque acima encontra-se inicialmente em EE com um fluxo volumétrico de entrada de $10 \text{ ft}^3/\text{min}$.

No tempo $t=0$, o fluxo volumétrico de entrada é bruscamente aumentado para $12 \text{ ft}^3/\text{min}$, durante 3 minutos (pela adição de 6 ft^3 de água no tanque, de maneira uniforme durante 3 minutos).

Calcular $h(t)$ para $t=1,5 \text{ min}$, $t=3 \text{ min}$ e $t=4 \text{ min}$.

Se a capacidade máxima do tanque é 10 ft , quando (se é que isto ocorre) se dá o transbordamento do tanque, para esta perturbação? Considerar ρ constante neste problema.

IV.15. Considere um reator CSTR isotérmico, com retenção volumétrica constante, no qual ocorre uma reação de 2^a ordem: $A \rightarrow B$.

O balanço de massa para o componente A é dado por:

$$V \frac{dC_{A1}}{dt} = F (C_{A0} - C_{A1}) - k V C_{A1}^2 \quad (1)$$

onde são constantes:

$$\begin{cases} F = 100 \text{ ft}^3/\text{h} \\ V = 1000 \text{ ft}^3 \\ k = 1,2 \text{ ft}^3/\text{lbmol h} \end{cases}$$

a) Na condição estacionária inicial $C_{A0,e} = 1 \text{ lbmol}/\text{ft}^3$. Calcule $C_{A1,e}$.

b) Linearize o(s) termo(s) não linear(es) da Equação (1) e reescreva a mesma em variáveis desvios.

c) Escreva a função de transferência $\frac{\bar{C}'_{A1}(s)}{\bar{C}'_{A0}(s)}$, identificando e calculando τ_p e K_p .

d) Suponha que $C'_{A0}(t)$ varia conforme descrito na QUESTÃO III.5.. Calcule $C'_A(t)$ para:

i. $0 \leq t \leq 1$

ii. $1 \leq t \leq 2$

iii. $2 \leq t < \infty$

7580

CAPÍTULO V: FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA DE SEGUNDA ORDEM

V.1. Considere o sistema de nível de líquido mostrado na FIGURA V.1.. Os tanques NÃO apresentam interação. Sabe-se que:

1. A vazões à saída de cada tanque têm uma dependência linear com o nível de líquido através de resistências R_1 e R_2 , respectivamente. Estas resistências foram testadas separadamente e encontrou-se que se $F_{1,e}$ (em ft^3/min) for plotado contra $h_{1,e}$ (em ft) será obtida uma reta com coeficiente angular $\left[\frac{dF_{1,e}}{dh_{1,e}} \right]$ igual a $1,5 \text{ ft}^2/\text{min}$;
2. O sistema em laço aberto é criticamente amortecido e a área da seção transversal de cada tanque é 4 ft^2 ;

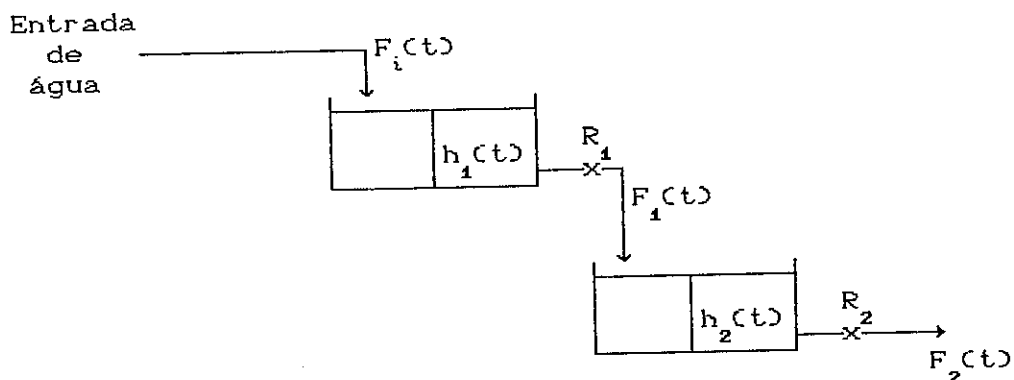


FIGURA V.1.

Identifique G . ESPERA-SE QUE VOCÊ DÊ VALORES NUMÉRICOS AOS PARÂMETROS NAS FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA E MOSTRE CLARAMENTE COMO VOCE AS OBTIVE.

V.2.

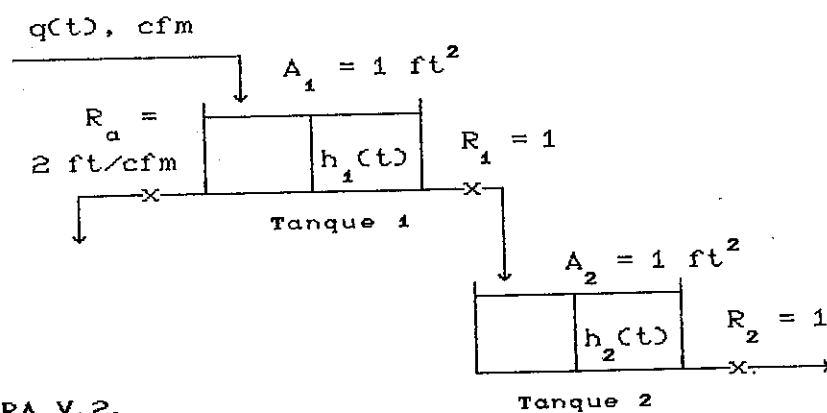


FIGURA V.2.

A partir dos balanços de massa, calcule as funções de transferência $\bar{h}'_1(s)/\bar{q}'(s)$ e $\bar{h}'_2(s)/\bar{q}'(s)$ para os sistema de nível de líquido mostrado na FIGURA V.2.. Suponha que as resistências são lineares e dadas por: $R_1 = R_2 = 1 \text{ ft}/\text{cfm}$. Note que duas correntes saem do tanque 1, uma das quais alimenta o tanque 2. ESPERA-SE QUE VOCÊ DÊ VALORES NUMÉRICOS AOS PARÂMETROS NAS FUNÇÕES DE TRANSFERÊNCIA E MOSTRE CLARAMENTE COMO VOCE AS OBTEVE.

V.3. Um sistema de tanques está para ser instalado numa unidade de plantas pilotos. A proposta inicial é a de dois tanques em série sem interação. Cada tanque tem 5 ft de altura e 3 ft de diâmetro. A vazão de projeto é $F_{i,e} = 100 \text{ gal}/\text{min}$. Foi sugerido que um projeto melhor seria substituir os dois tanques por um único tanque com 4 ft de diâmetro e com o mesmo volume total (i.e, $V = V_1 + V_2$).

a) Qual dos dois projetos (o original ou o modificado) é capaz de suportar as maiores perturbações em F_i ? Justifique sua resposta.

b) Que sistema provê o melhor amortecimento de perturbações degraus em F_i ? Justifique sua resposta.

Em sua análise você pode supor que:

i. As válvulas nas saídas de cada tanque atuam como resistências lineares.

ii. As válvulas são ajustadas de modo que cada tanque está cheio pela metade na condição de projeto nominal $F_{i,e} = 100 \text{ gal}/\text{min}$.

DADO: $1 \text{ gal} = 0,13368 \text{ ft}^3$.

V.4. O comportamento dinâmico de um sistema físico pode ser representado pela função de transferência:

$$\frac{\bar{Y}'(s)}{\bar{X}'(s)} = \frac{18}{s^2 + 3s + 9}$$

a) Depois de um degrau $X'(t) = 3$, qual o novo valor do estado estacionário de $y'(t)$?

b) Por razões físicas, exige-se que $Y' \leq 10$. Qual a maior mudança degrau em X' que o processo pode tolerar sem exceder este limite?

V.5. Um degrau de magnitude 3 é introduzido na função de transferência:

$$\frac{\bar{Y}'(s)}{\bar{X}'(s)} = \frac{10}{2s^2 + 0,3s + 0,5}$$

Determine qual o valor máximo que $Y'(t)$ alcança e o tempo para o qual este máximo ocorre.

V.6. No processo de mistura em dois tanques mostrado na figura abaixo, C_o varia de 0 lb_m de sal/ft³ para 1 lb_m de sal/ft³ de acordo com uma função degrau. Em que tempo a concentração de sal no tanque 2 alcança 0,8 lb_m de sal/ft³? O volume de cada tanque é 6 ft³.

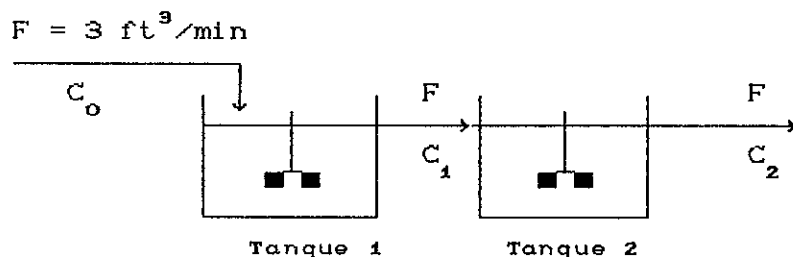


FIGURA V.6.

V.7. O processo de aquecimento com dois tanques mostrado na FIGURA V.7. abaixo consiste de dois tanques idênticos, bem agitados em série. Um fluxo de calor pode entrar no tanque 2. No tempo $t = 0$, a taxa de calor para o tanque 2 repentinamente aumenta de acordo com uma função degrau para 1000 Btu/min e a temperatura de entrada da água T_i cai de 60 °F para 52 °F de acordo com uma função degrau. Essas mudanças no fluxo de calor e na temperatura de entrada da água ocorrem simultaneamente.

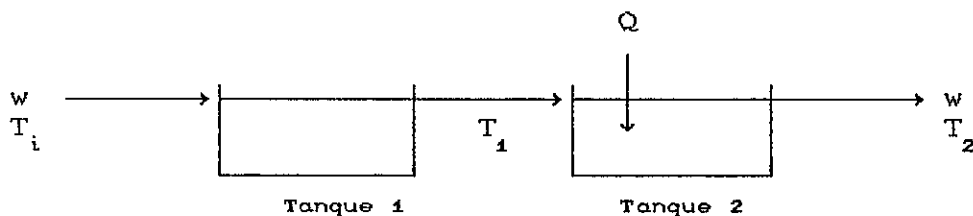


FIGURA V.7.

Calcule expressões para as respostas de $T_1(t)$ e $T_2(t)$ e indique seus valores finais.

Inicialmente, $T_i = T_1 = T_2 = 60^\circ\text{F}$ e $Q = 0$. Os seguintes dados se aplicam: $w = 250 \text{ lb}_m/\text{min}$; volume de cada tanque = 5 ft^3 ; densidade do fluido = $50 \text{ lb}_m/\text{ft}^3$ e capacidade calorífica do fluido = $1 \text{ Btu}/(\text{lb}_m)(^\circ\text{F})$.

V.8. Um engenheiro consultor foi convidado a projetar um sistema de controle de nível de líquido para um processo composto por dois tanques interligados na forma apresentada pela FIGURA V.8..

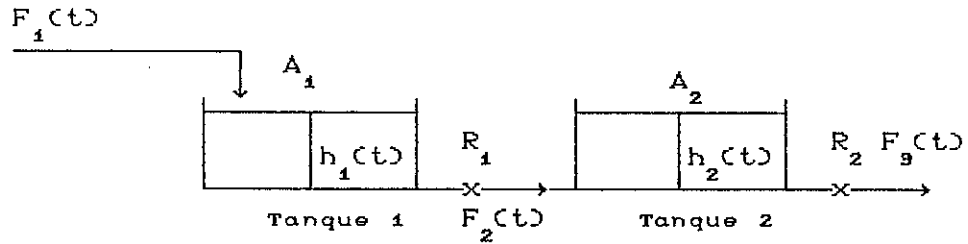


FIGURA V.8.

Na sua visita à unidade acima, o engenheiro procedeu um teste no qual um degrau de magnitude 1 foi aplicado em $F_1(t)$. Os resultados desse teste foram:

- Devido a esse degrau, o tanque 1 sofreu uma variação total de 1,8 m e o tanque 2 sofreu uma variação total de 0,8 m;
- Em 6 minutos, o tanque 2 havia aumentado de 0,7 m.

Na hora de realizar seus cálculos, o engenheiro verificou que não dispunha do registro exato das áreas dos tanques; recordava-se no entanto que $A_2 = 1,25 A_1$ e calculou as mesmas a partir dos dados que dispunha.

Como ele procedeu esses cálculos? (Em outras palavras, calcule A_1 e A_2). Suponha que ele utilizou a Figura 8.2 do Coughanowr e Koppel.

V.9. Seja o tanque agitado com aquecimento apresentado na figura abaixo:

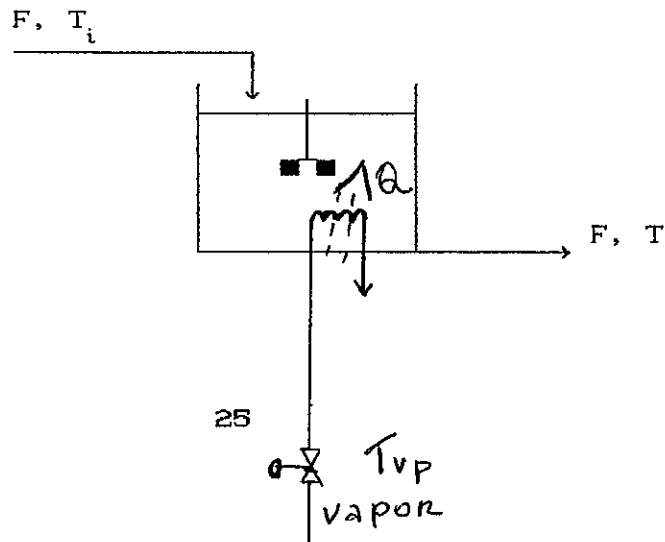


FIGURA V.9.

onde $Q = U A (T_{vp} - T)$.

Suponha que se queira proceder um teste com este tanque, de modo a verificar as suas características dinâmicas.

O teste consiste em introduzir um degrau de intensidade A em T_i (mantendo as demais variáveis de entrada constantes) e acompanhar a variação de T .

Para medir T , utiliza-se um termômetro que está imerso no líquido do tanque (inicialmente, o termômetro e o líquido no tanque estão em equilíbrio térmico).

Sabendo-se que o termômetro tem características dinâmicas próprias (é um sistema de 1ª ordem) e que a constante de tempo do termômetro τ_{p2} é muito menor que a constante de tempo do tanque τ_{p1} ($\tau_{p2} \ll \tau_{p1}$), pergunta-se se a temperatura indicada pelo termômetro (T_M) apresentará erro em relação à temperatura do líquido no tanque para um tempo t qualquer.

Para chegar à resposta desta questão:

- Escreva as equações no tempo para o tanque e o termômetro;
- Escreva as funções de transferência para as variáveis de entrada e saída em questão;
- Considere que $\tau_{p2} \ll \tau_{p1}$ e verifique a relação entre as funções $T'_M(t)$ e $T'(t)$ para o degrau indicado.

V.10. Seja o sistema descrito abaixo:

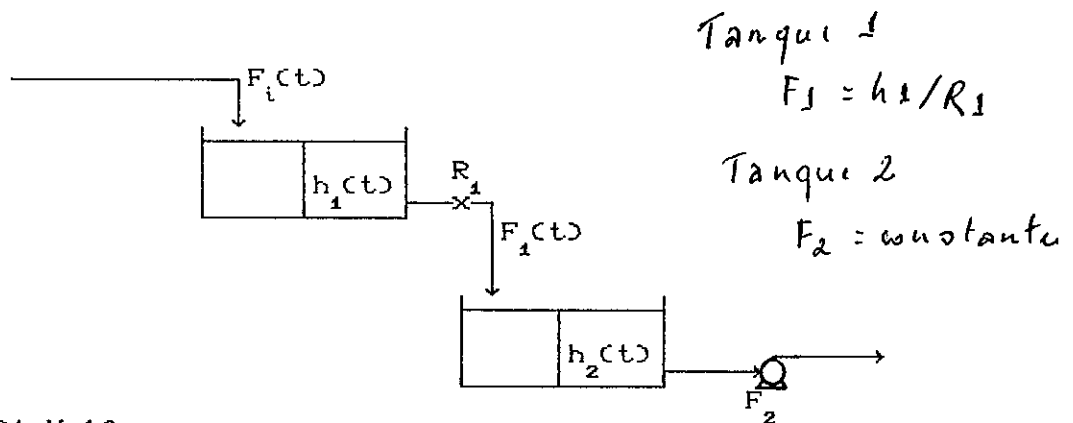


FIGURA V.10.

- Admita que se conseguiu um estado estacionário e que se tenha: $h_{1,e}$ e $h_{2,e}$. Quanto deve ser F_2 para que este estado tenha sido alcançado?
- Obtenha $h_2(t)$ para um degrau em F_i da forma:

$$\bar{F}_i'(s) = A/s \quad (A > 0).$$

Calcule $h_2(t)$ para tempos grandes e compare com o resultado do Teorema do Valor Final.

c) Obtenha $h_2(t)$ para um impulso em F_i da forma:

$$\bar{F}_i'(s) = A \quad (A > 0).$$

Calcule $h_2(t)$ para tempos grandes e compare com o resultado do Teorema do Valor Final.

V.11. Seja o sistema:

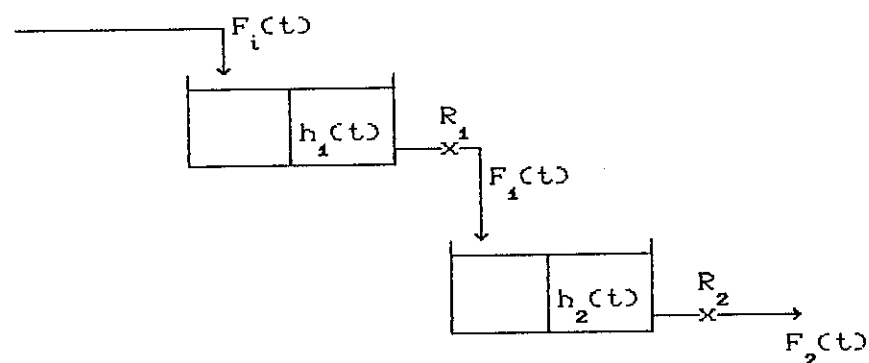


FIGURA V.11.

Tem-se que:

- os tanques são cilíndricos e o raio do tanque 1 é o dobro do raio do tanque 2;
- aplicando um degrau unitário em F_i , os valores finais de h_1' e h_2' (variáveis desvios) são iguais;
- a resposta transiente é superamortecida, levando-se três minutos para que a variação de nível no tanque 2 alcance 90 % da variação (ou seja, 90 % do valor final), para um degrau unitário.

Quais as constantes de tempo dos tanques 1 e 2?

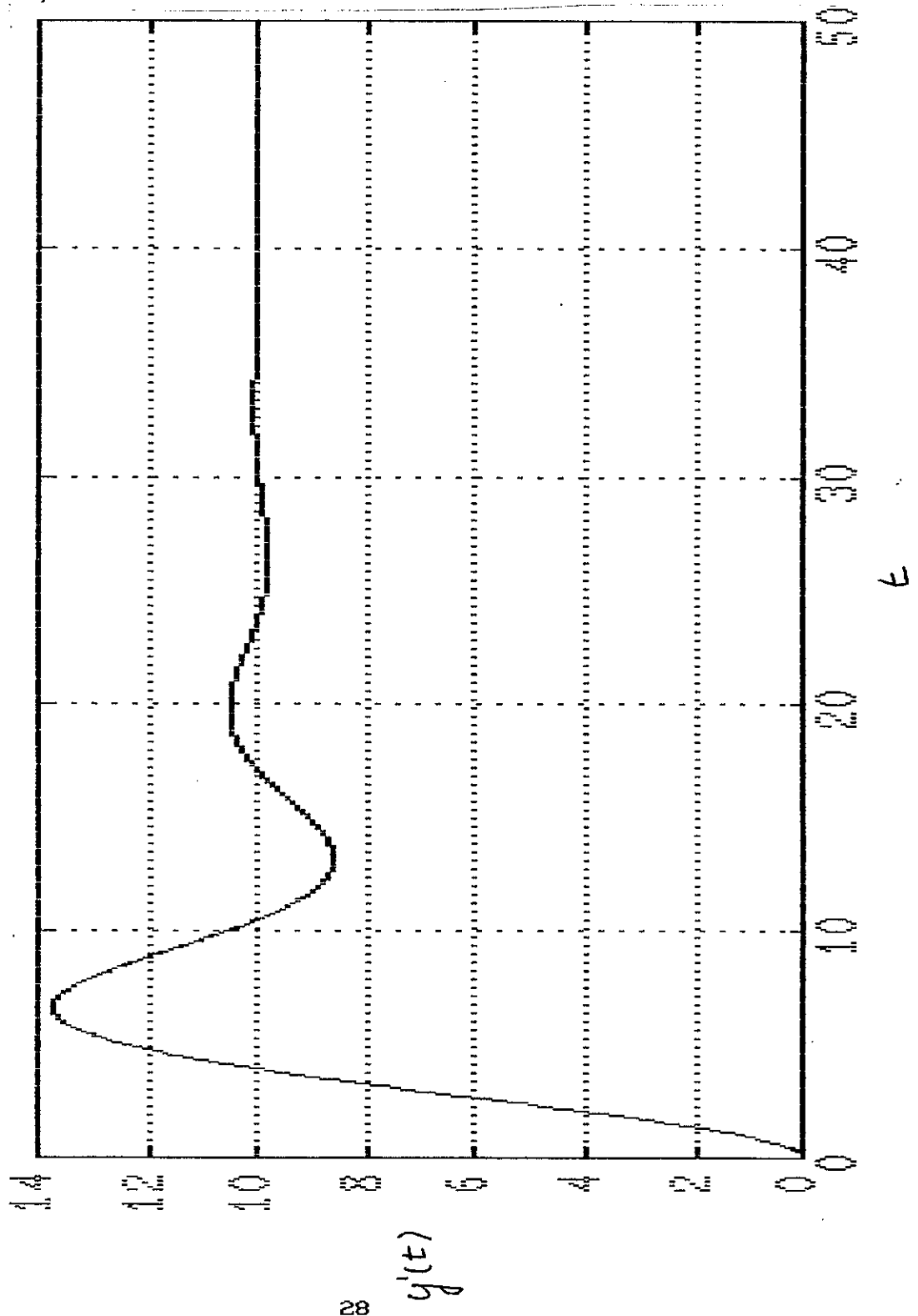
OBS: Para iniciar o processo iterativo, use informações da Fig. 8.2 do livro de Coughanowr e Koppel.

V.12. Seja um sistema de segunda ordem:

$$\frac{\bar{y}'(s)}{\bar{f}'(s)} = \frac{K_p}{\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s + 1}$$

A resposta $y'(t)$ deste sistema a um degrau de magnitude "2" em $f(t)$ (ou seja, $f'(t) = 2$) é mostrada na FIGURA V.12.. A partir da FIGURA, estime K_p , τ e ζ .

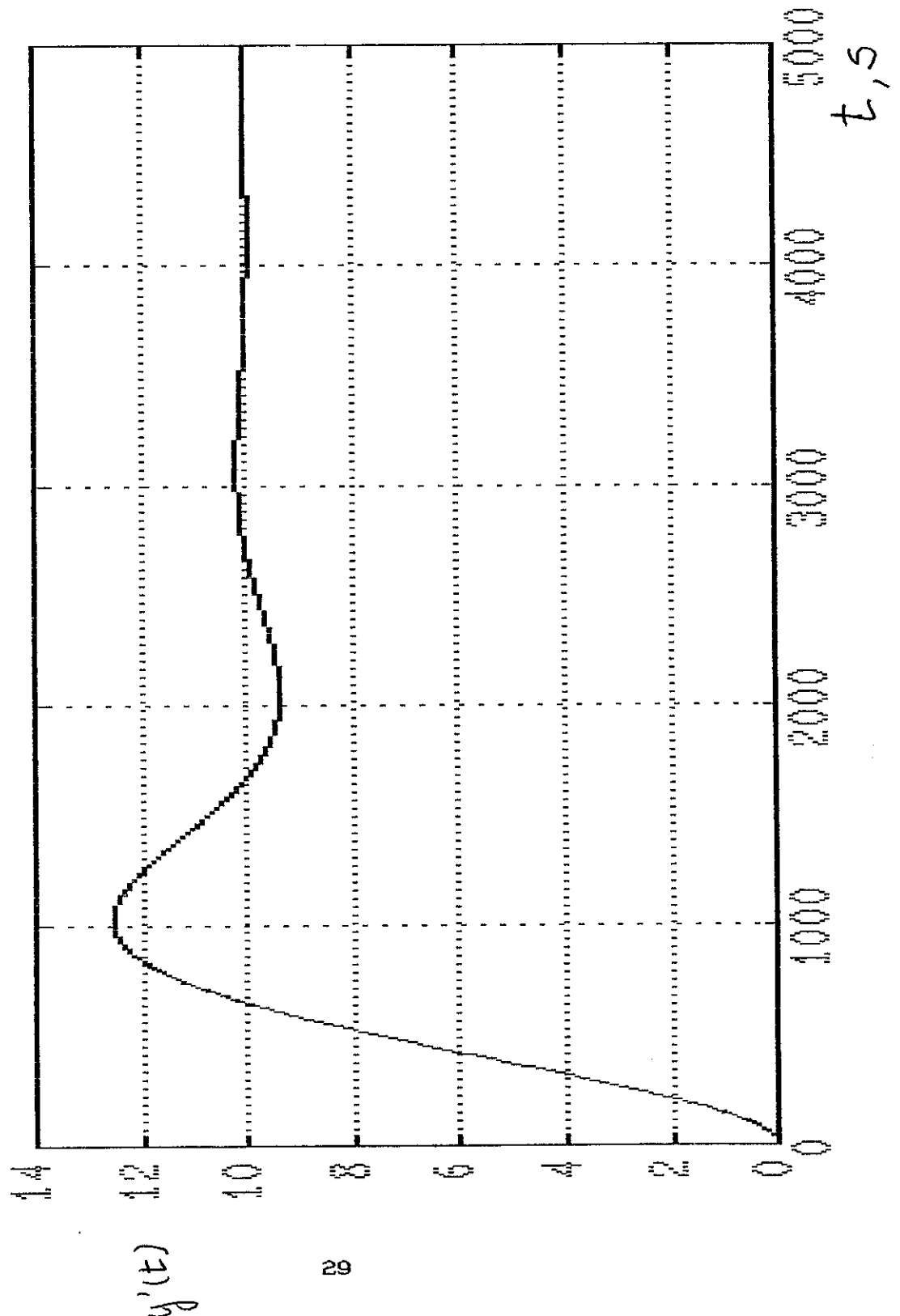
FIGURA V.12.



V.13. Suponha que a resposta $y'(t)$ de um processo controlado a um degrau de intensidade 0,5 na sua entrada $f'(t)$ é exibida na FIGURA V.13..

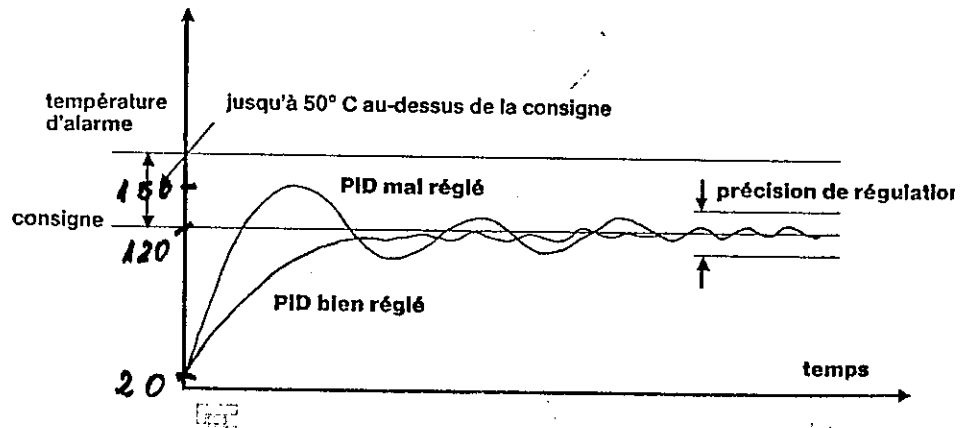
- Escreva a função de transferência $\bar{y}'(s)/\bar{f}'(s)$;
- Escreva a expressão da resposta no tempo deste processo a um impulso unitário;
- Esboce qualitativamente a resposta ao impulso calculada em b).

FIGURA V.13.



V.14. Seja o gráfico a seguir de temperatura de um forno, extraído de um manual de equipamentos científicos. Estime o valor de ξ para a curva correspondente ao PID bem regulado e calcule ξ para o PID mal regulado. Observe que em ambos os casos a temperatura inicial é de 20 °C e a final, de 120 °C. O PID mal regulado alcança um máximo de 150 °C.

FIGURA V.14.



V.15. O equipamento de transferência de calor mostrado na FIGURA V.15. consiste de dois tanques, sendo um interno ao outro. Calor é transferido por convecção através da parede do tanque mais interno. Os conteúdos de cada tanque estão bem misturados. Os seguintes dados e informações são fornecidos:

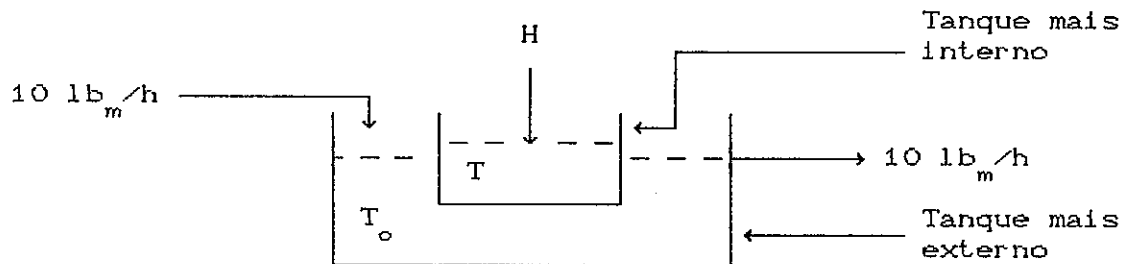
1. A vazão mássica de líquido através do tanque mais externo é mantida constante, portanto o volume de líquido contido no mesmo é constante e vale 1 ft³;
2. O volume (constante) do conteúdo do tanque mais interno é 1 ft³;
3. A área de contacto para transferência de calor entre os tanques é 1 ft²;
4. O coeficiente global de transferência de calor, U , para o fluxo de calor entre os tanques é 10 Btu/h ft² °F;
5. A capacidade calorífica do fluido em cada tanque é 1 Btu/lb_m °F. A densidade de cada fluido é 50 lb_m/ft³.

Supondo uma situação em que a temperatura da corrente de alimentação seja mantida constante, mas o fluxo de calor para o tanque mais interno (HI) esteja sujeito a mudanças:

a) Escreva os balanços transientes para este sistema;

b) Obtenha as seguintes funções de transferência: $\frac{\bar{T}'(s)}{\bar{H}'(s)}$ e $\frac{\bar{T}'_o(s)}{\bar{H}'(s)}$.

FIGURA V.15.



V.16. Uma mudança degrau de 15 a 31 psi na pressão (entrada) resulta na resposta medida (saída) de um elemento indicador de pressão mostrada na FIGURA V.16.. Veja que o gráfico não está em variáveis desvios.

a) Supondo dinâmica de segunda ordem, calcule os parâmetros necessários e escreva a função de transferência na forma:

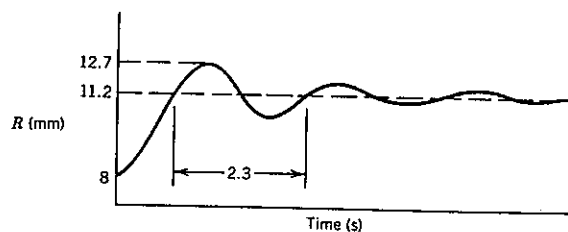
$$\frac{\bar{R}'(s)}{\bar{P}'(s)} = \frac{K_p}{\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s + 1}$$

onde: $\left\{ \begin{array}{l} R' \text{ é a saída em variáveis desvios} \\ P' \text{ é a entrada em variáveis desvios} \end{array} \right.$

b) Calcule o tempo de ascensão.

c) Calcule o tempo de resposta.

FIGURA V.16.



TODD

CAPÍTULO VI: SISTEMAS DE ORDEM MAIS ELEVADA

VI.1. Muitos processos da Engenharia Química têm um comportamento que pode ser descrito por um modelo de primeira ordem com tempo morto:

$$\frac{\bar{y}'(s)}{\bar{f}'(s)} = \frac{K_p}{\tau_p s + 1} e^{-\theta s}$$

Admitindo um degrau unitário em $f'(t)$, calcule $y'(t)$ para:

- i. $t \leq \theta$;
- ii. $t \geq \theta$.

VI.2. Seja a seguinte função de transferência:

$$\frac{\bar{y}'(s)}{\bar{f}'(s)} = \frac{4e^{-2s}}{3s^2 + 2,4s + 2}$$

Faça o gráfico da resposta de $y'(t)$ em função de t para o degrau $f'(t) = 3$. No gráfico, indique os valores correspondentes ao: a) tempo morto; b) tempo de ascensão; c) primeiro máximo de $y'(t)$ e o tempo para o qual ele ocorre; d) segundo máximo de $y'(t)$ e o tempo para o qual ele ocorre; e) período; f) valor final de $y'(t)$.

VI.3. Considere o sistema abaixo:

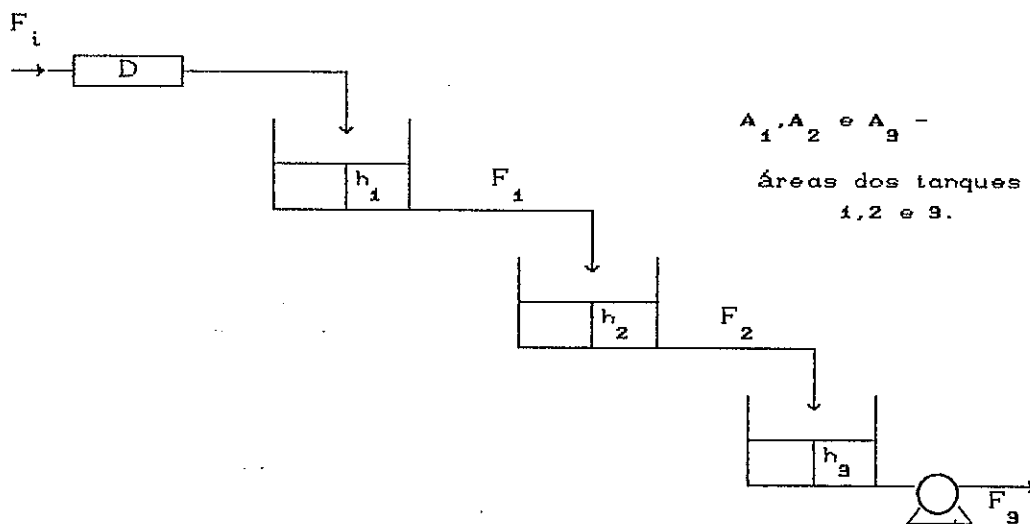


FIGURA VI.3.

Neste sistema, uma mistura líquida com densidade constante ρ escoia inicialmente através de um elemento de tempo morto (D segundos) "plug-flow" e depois alimenta o tanque 1. Tem-se para os tanques 1 e 2 que:

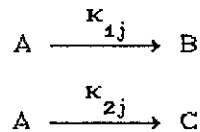
$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{R_2}{R_1} \quad ; \quad F_1 = h_1/R_1 \text{ e } F_2 = h_2/R_2$$

Supondo um impulso unitário ocorrendo em $F_1'(t)$ em $t = 0$, escreva expressões que descrevam $h_1'(t)$, $h_2'(t)$ e $h_3'(t)$ para:

- $t \leq D$;
- $t \geq D$;
- Use as expressões encontradas em b) para avaliar $h_1'(t)$, $h_2'(t)$ e $h_3'(t)$ depois de um tempo suficientemente grande.

VI.4. Considere o sistema abaixo de dois reatores de mistura perfeita conectados por um tubo longo que funciona como um tempo morto "plug flow" de D segundos. Supor:

- Volumes V_1 e V_2 e fluxo volumétrico F constantes;
- Densidade constante;
- Operação isotérmica a temperaturas T_1 e T_2 ;
- Cinética de primeira ordem com reações simultâneas:



onde K_{ij} é a velocidade específica da reação i ocorrendo no tanque j . Não há reação na seção de tempo morto. Escreva as equações do sistema e determine as respectivas funções de transferência para perturbações em C_{Ao} .

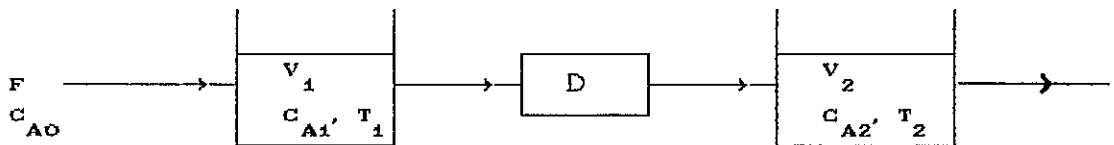


FIGURA VI.4.

VI.5. Considere o processo mostrado na FIGURA VI.5.:

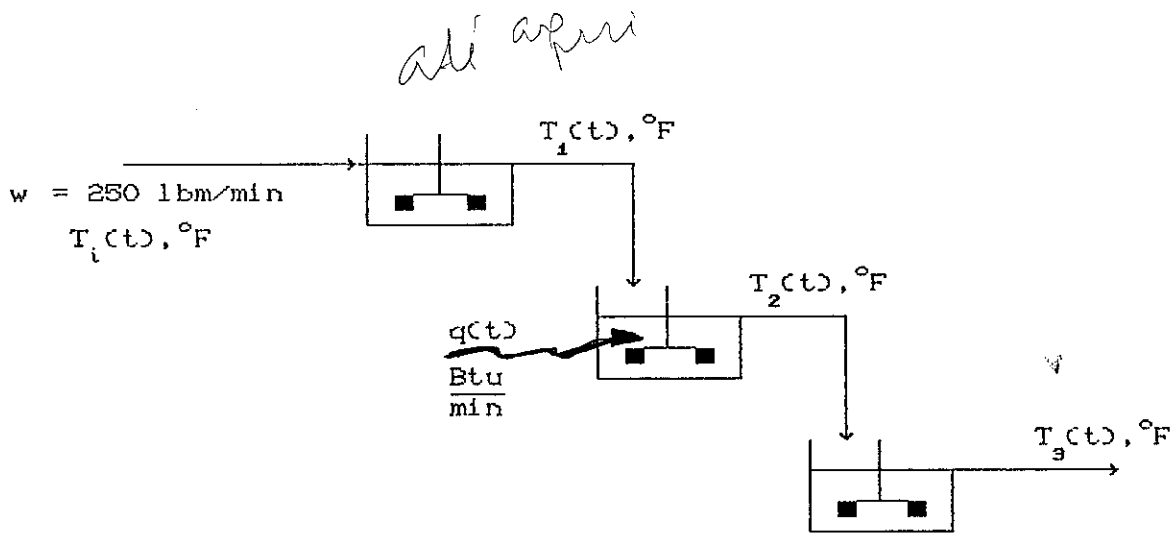


FIGURA VI.5.

O fluxo mássico de líquido através dos tanques, w , é constante e vale $250 \text{ lb}_m/\text{min}$. A densidade do líquido pode ser tomada constante como $50 \text{ lb}_m/\text{ft}^3$ e a capacidade calorífica pode ser tomada como constante como $1,3 \text{ Btu}/\text{lb}_m^\circ\text{F}$.

O volume de cada tanque é 10 ft^3 . Você pode desprezar as perdas de calor para o ambiente.

Desenhe o diagrama de blocos que mostra como mudanças na temperatura de entrada, $T_1(t)$, e em $q(t)$ afetam $T_3(t)$. Dê os valores numéricos de cada parâmetro em todas as funções de transferência.

CAPÍTULO VII: CONTROLE POR REALIMENTAÇÃO NEGATIVA ("FEEDBACK")

VII.1. Interprete a charge abaixo à luz da teoria da estabilidade.

Out of Control

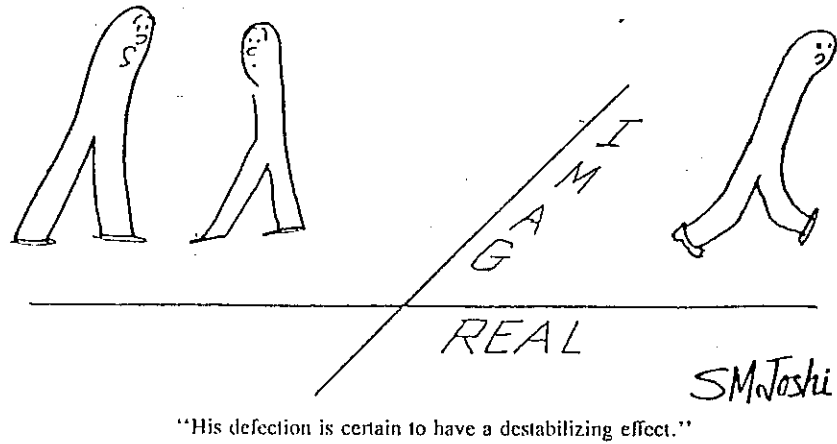


FIGURA VII.1.

VII.2. Seja o tanque com $A = 10 \text{ ft}^2$, onde o nível $h(t)$ é controlado, manipulando-se $F_1(t)$. Suponha $G_m = 1$ e controlador P com ação reversa. A válvula é ar-para-fechar: $G_f = -(K_f)$, onde $K_f > 0$.

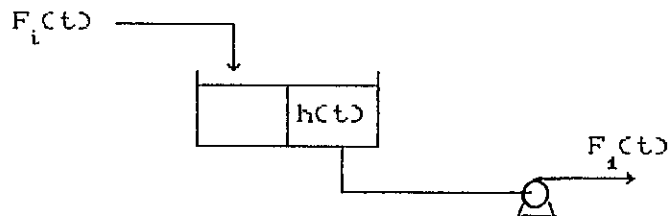


FIGURA VII.2.

(a) Suponha que um degrau unitário é dado no set-point, enquanto a carga é mantida constante. Mostre que não há offset, neste caso, mesmo sendo o controlador P;

(b) Suponha que um degrau unitário é dado na carga, enquanto o set-point é mantido constante. Mostre que, neste caso, há offset.

VII.3. Seja um processo tal que:

$$G_p = \frac{5}{(3s+1)(2s+1)}$$

com G_f e G_m desprezíveis. Calcule o ganho do controlador P que produz uma resposta com razão de declínio igual a $1/4$.

VII.4. Seja um sistema de segunda ordem:

$$G_p = \frac{\bar{y}'(s)}{\bar{m}'(s)} = \frac{5}{(s+1)(2s+1)}$$

controlado por um controlador P, tal que $G_c = 1,6$; com dinâmicas da válvula e do elemento de medida desprezíveis. Se um degrau de 0,1 é dado no set-point, determine:

- (a) o valor máximo da variável controlada e o tempo para o qual ele ocorre;
- (b) o offset;
- (c) o período de oscilação;
- (d) desenhe um esboço da resposta de $y'(t)$ como função do tempo.

VII.5. Um processo é composto por dois sistemas de primeira ordem em série:



FIGURA VII.5.

Suponha o caso em que o processo acima está sendo controlado por um controlador P, com dinâmicas desprezíveis do elemento de medida e da válvula.

- (a) Calcule o valor do ganho que produz uma resposta criticamente amortecida;

Para os itens (b) e (c), considere que o controlador foi ajustado com o ganho obtido em (a) e que o processo foi perturbado por um degrau de magnitude 1,2 no "set-point"

- (b) Escreva $y'(t)$ para a perturbação acima;

(c) Calcule o "offset".

VII.6. Seja o sistema de nível de líquido mostrado na FIGURA VII.6. Suponha que as resistências são lineares e dadas por: $R_1 = R_2 = 1$ ft/cfm.

Suponha que se pretende controlar, usando instrumentação pneumática, o nível de líquido do segundo tanque manipulando $q(t)$. As dinâmicas da válvula de controle e do elemento de medida podem ser desprezadas.

(a) Desenhe na FIGURA VII.6. o fluxograma de controle, indicando os elementos do laço;

(b) Calcule o valor do ganho que produz uma resposta em laço fechado com razão de declínio 1/4.

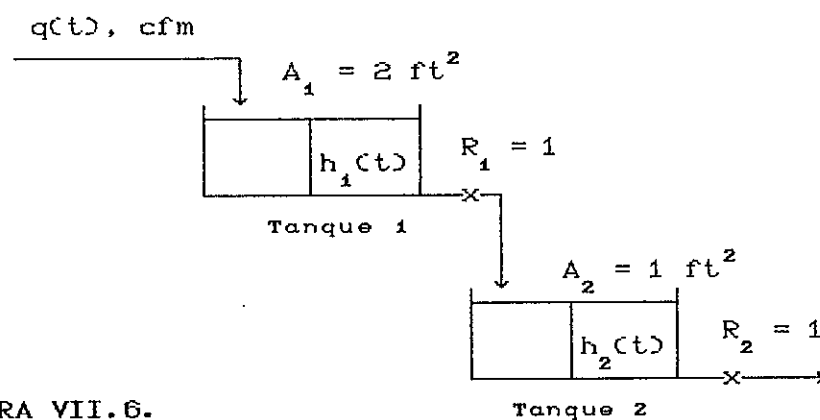


FIGURA VII.6.

VII.7. Considere o sistema de controle de nível de líquido mostrado na FIGURA VII.7.. As seguintes informações são conhecidas:

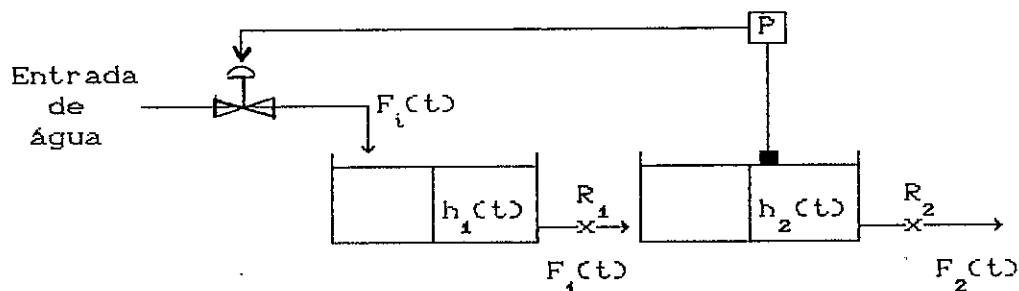


FIGURA VII.7.

1. As áreas das seções transversais dos tanques são 2 m^2 e $2,5 \text{ m}^2$, para os tanques 1 e 2, respectivamente.

2. Quando o sistema em laço aberto é perturbado por um degrau de magnitude $1 \text{ m}^3/\text{min}$ em F_1 , o tanque 1 sofre uma variação total de $1,8 \text{ m}$ e o tanque 2 sofre uma variação total de $0,8 \text{ m}$;

3. O controlador é P e tem ação reversa;

4. A válvula de controle é tal que tem uma função de transferência dada

$$\text{por: } G_f = \frac{\bar{F}_i'(s)}{\bar{c}'(s)} = 0,1 \frac{\text{m}^3/\text{min}}{\text{psig}}$$

5. O elemento de medida é tal que $G_m = 20 \text{ psig/m}$.

(a) Identifique G_p e G_d ;

(b) Identifique as funções de transferência em laço fechado;

(c) Ajuste o controlador P, para uma razão de declínio de $1/4$.

VII.8. Seja o sistema de tanques com interação mostrado na FIGURA VII.8., com resistência linear dada por: $R_1 \text{ ft/cfm}$.

Pretende-se controlar, usando instrumentação pneumática, o nível de líquido do segundo tanque manipulando $F_2(t)$. As dinâmicas da válvula de controle e do elemento de medida podem ser desprezadas.

O controlador é P com ação direta

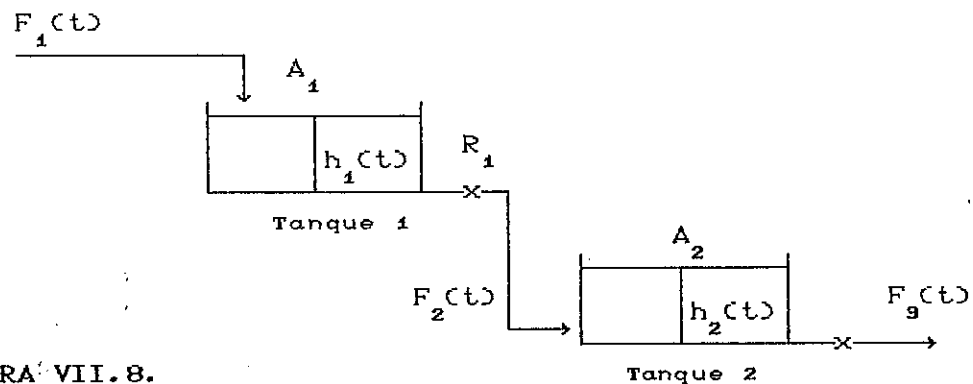


FIGURA VII.8.

Escreva $G_{\text{set-point}}$ e G_{carga} .

VII.9. Seja o sistema de tanques com interação mostrado na FIGURA VII.9. Pretendia-se controlar, usando-se um controlador P (ações direta e reversa disponíveis), o nível de líquido do segundo tanque. Para tanto duas estratégias foram propostas:

1. Manipular $F_3(t)$;

2. Manipular $F_1(t)$ (neste caso $F_3(t)$ é uma função linear do nível de líquido do tanque 2).

Se offsets não eram desejados para mudanças de set-point, qual das duas estratégias foi adotada, considerando que as dinâmicas da válvula de controle e do elemento de medida foram desprezadas.

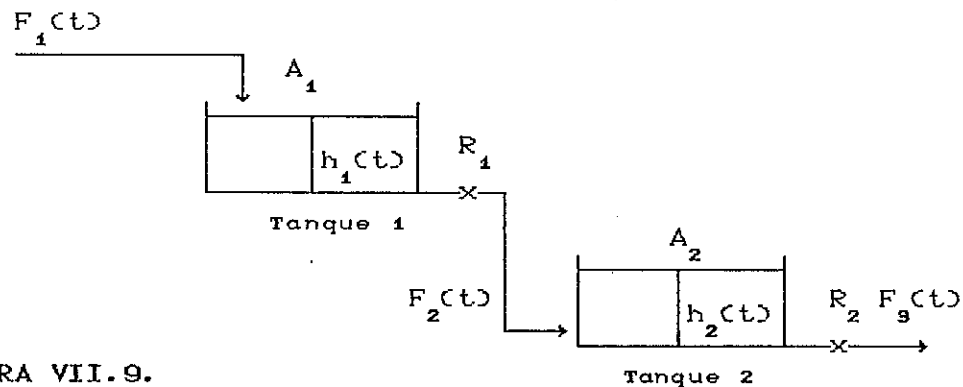


FIGURA VII.9.

OBS: SUA RESPOSTA SÓ SERÁ CONSIDERADA CORRETA SE FOR MATEMATICAMENTE DEMONSTRADA.

VII.10. Seja o controle de um aquecedor tipo tanque agitado com retenção constante, tal que: $w = 300 \text{ lb}_m / \text{min}$; $\rho = 62,5 \text{ lb}_m / \text{ft}^3$; $V = 6 \text{ ft}^3$ e $C_p = 1 \text{ Btu}/(\text{lb}_m)^\circ\text{F}$.

Se a taxa de calor transferida por um aquecedor elétrico Q é a variável manipulada e a temperatura de entrada T_i pode variar (independentemente do controle):

(a) Escreva as funções de transferência em laço aberto G_p e G_d ;

Considere agora:

- dinâmica do elemento de medida desprezível;
- controlador PD com $K_c = 1 \text{ (psig}/^\circ\text{F)}$ e $\tau_D = 0,2 \text{ min}$;
- o aquecedor elétrico é o elemento final de medida, tal que uma mudança de 1 psig do controlador muda a taxa de calor transferida de 800 Btu/min, ou seja: $G_f = \frac{\bar{Q}'(s)}{\bar{c}'(s)} = 800$; e

(b) Escreva as funções de transferência em laço fechado G_{SP} e G_{carga} .

VII.11. Considere o sistema de controle de nível de líquido mostrado na FIGURA VII.11., com um controlador P e ação reversa. Os tanques NÃO apresentam interação. As seguintes informações são conhecidas:

1. A vazões à saída de cada tanque têm uma dependência linear com o nível de líquido através de resistências R_1 e R_2 , respectivamente. Estas resistências foram testadas separadamente e encontrou-se que se $F_{1,e}$ (em ft^3/min) for plotado contra $h_{1,e}$ (em ft) será obtida uma reta com coeficiente angular $\left[\frac{dF_{1,e}}{dh_{1,e}} \right]$ igual a $2 \text{ ft}^2/\text{min}$;
2. O sistema em laço aberto é criticamente amortecido e a área da seção transversal de cada tanque é 2 ft^2 ;
3. A válvula de controle é tal que uma mudança de 1 psig na pressão que entra na válvula produz uma mudança na vazão através dela de $0,1 \text{ ft}^3/\text{min}$;
4. A dinâmica do elemento de medida pode ser desprezada.

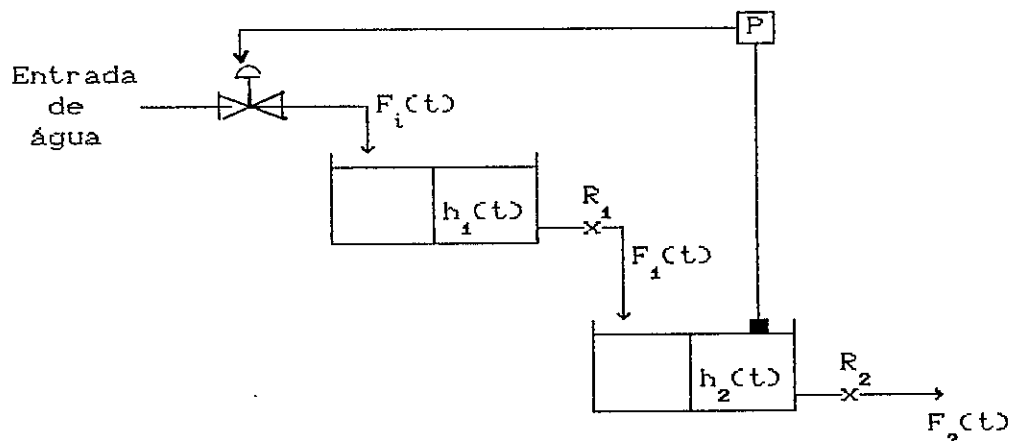


FIGURA VII.11.

- (a) Identifique G_p , G_f , G_m , G_c e G_d ;
- (b) Determine o ganho K_c do controlador para uma resposta com razão de declínio $1/4$;
- (c) Se os tanques estivessem conectados de modo que houvesse interação, qual seria o valor de K_c para uma resposta com razão de declínio $1/4$.

VII.12. Um processo tem funções de transferência em laço aberto dadas por:

$$G_p(s) = \frac{5}{(2s + 1)^2}, \quad G_m(s) = G_f(s) = 1 \quad \text{e} \quad G_d(s) = \frac{1}{(2s + 1)^2}$$

Se um controlador "PI" é usado com $\tau_I = 2$, calcule:

- O valor do ganho do controlador que dá um coeficiente de amortecimento em laço fechado de 0,707.
- O período natural de oscilação para este valor do ganho.
- A função de transferência em laço fechado entre a variável de perturbação e a saída.
- O "offset" no estado estacionário para um degrau na variável perturbação.

VII.13. O sistema térmico abaixo é controlado por um PD. São dados: $w = 250 \text{ lb}_m/\text{min}$, $\rho = 62,5 \text{ lb}_m/\text{ft}^3$, $V_1 = 4 \text{ ft}^3$, $V_2 = 5 \text{ ft}^3$, $V_3 = 6 \text{ ft}^3$ e $C_p = 1 \text{ Btu}/(\text{lb}_m) (\text{°F})$.

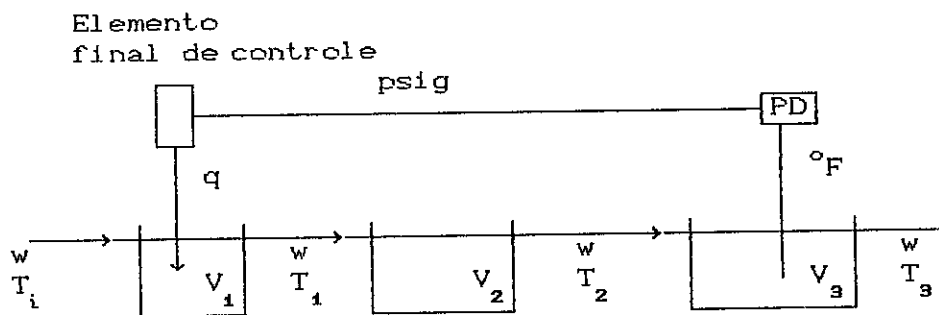


FIGURA VII.13.

Uma mudança de 1 psig à saída do controlador muda o fluxo de calor de 500 Btu/min. A dinâmica do elemento de medida é desprezível. A temperatura da corrente de entrada pode variar e as perdas de calor para o meio são desprezíveis.

- Calcule G_{sp} e G_{carga} ;
- Encontre o offset para um degrau unitário na temperatura de entrada se $K_c = 3$ e $\tau_D = 0,5 \text{ min}$.

VII.14. Um tanque de nível com $A = 3 \text{ ft}^2$ e $R = 1,0 \text{ min/ft}^2$ está sendo controlado por um PI com: $K_c = 4$ e $\tau_I = 3 \text{ min}$.

Para a válvula tem-se $K_v = 0,2 \text{ cfm/psi}$ e para o elemento de medida $K_m = 1,0 \text{ psi/ft}$.

Suponha que o sistema esteja, inicialmente, no EE com $h_e = 2 \text{ ft}$.

Mostre que se o sistema é submetido a uma mudança degrau no *set-point* de 2 para 3 ft, o nível de líquido alcança o novo *set-point*.

Para tanto:

- (a) Escreva a função de transferência $G_{\text{set-point}}$.
- (b) Mostre que para o degrau indicado o *offset* é zero.

VII.15. O pessoal da área de processos de uma refinaria de petróleo está tendo problemas com um dado laço de controle em um resfriador de múltiplos estágios. Convidado para resolver a situação, o consultor Silva solicitou a um aluno (você!) para checar a situação e verificar as soluções (se é que elas existem) possíveis.

O laço de controle está exibindo uma solução sustentada indesejável, que o pessoal da operação acha que é causada pelo próprio laço de controle (por exemplo, mau ajuste do controlador). ELES QUEREM AJUDA PARA REAJUSTAR O CONTROLADOR. O consultor Silva acha que as oscilações são causadas por perturbações externas (por exemplo, perturbações do tipo carga cíclicas, tais como oscilação cíclica da temperatura da água para resfriamento), ele quer que o pessoal da operação resolva o seu problema sozinho. Sugira um procedimento simples que permitirá com que você determine rapidamente o que está causando as oscilações. Como você explicaria sua lógica ao consultor Silva? (Lembre-se que ele não ficará satisfeito, se estiver errado!).

VII.16. Escolha o(s) controlador(es) *feedback(s)* mais adequado para cada um dos laços de controle indicados a seguir, justificando brevemente a sua escolha. Se você considerar que o controlador *feedback* não é capaz de controlar o processo, explique as razões.

- a) controle de vazão de líquido, onde há ruído de alta frequência devido a vibração da bomba;
- b) controle de nível de líquido, onde o sinal de medida apresenta ruído devido à turbulência do líquido que entra no tanque;
- c) controle da temperatura de um estágio de uma coluna de destilação;

d) controle de temperatura em um reator exotérmico;

e) controle de composição em um reator, onde o sensor de composição introduz significantes tempos mortos na resposta em laço fechado.

VII.17. Um aquecedor do tipo tanque agitado é usado para aquecer uma corrente de processo de modo que seus componentes pré-misturados alcancem uma composição uniforme. O controle de temperatura é importante porque a alta temperatura tende a decompor o produto, enquanto que a baixa temperatura resulta em mistura incompleta. O tanque é aquecido por vapor que se condensa dentro de uma serpentina. Um controlador proporcional-integral-derivativo (PID) é usado para controlar a temperatura no tanque, manipulando a posição da haste da válvula. Deseja-se escrever o diagrama de blocos completo e a equação característica do laço a partir dos seguintes dados de projeto:

Processo

A alimentação tem uma densidade ρ de 68,0 lb/ft³ e uma capacidade calorífica C_p de 0,80 Btu/lb^oF. O volume V de líquido no reator é mantido constante a 120 ft³. A serpentina consiste de 208 ft de tubo de aço de 4 polegadas escala 40, pesando 10,8 lb/ft com uma capacidade calorífica de 0,12 Btu/lb^oF e um diâmetro externo de 4,5 polegadas. O coeficiente de transferência de calor global U , baseado na área externa da serpentina, foi estimado como 2,1 Btu/min ft² °F. O vapor disponível é saturado e está a uma pressão de 30 psia; pode-se supor que o seu calor latente de condensação λ é constante e vale 966 Btu/lb.

Condições de Projeto

O fluxo de alimentação F nas condições de projeto é 15 m³/min e sua temperatura T_i é 100 °F. O conteúdo do tanque deve ser mantido a uma temperatura T de 150 °F. As perturbações possíveis são mudanças na taxa de alimentação e na temperatura.

Sensor de temperatura e transmissor

O sensor de temperatura tem uma variação calibrada de 100 a 200 °F e uma constante de tempo τ_m de 0,75 min.

Válvula de controle

A válvula de controle foi projetada de modo a poder exceder 100 % de sua capacidade nominal e variações de queda de pressão podem ser desprezadas. A válvula é uma válvula de igual percentagem com um parâmetro de variação α de 50. O atuador tem uma constante de tempo τ_v de 0,20 min.

CAPÍTULO VIII: ESTABILIDADE DE SISTEMAS "FEEDBACK"

VIII.1. Seja um sistema de controle "feedback" onde:

$$G_f(s) G_p(s) G_m(s) = \frac{0,5}{(s + 1)(0,5s + 1)}; \quad G_c(s) = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} \right)$$

Calcule o ganho e a frequência correspondentes à estabilidade limite como funções do parâmetro τ_I .

VIII.2. Considere os dois tanques SEM interação exibidos na FIGURA VIII.2.:

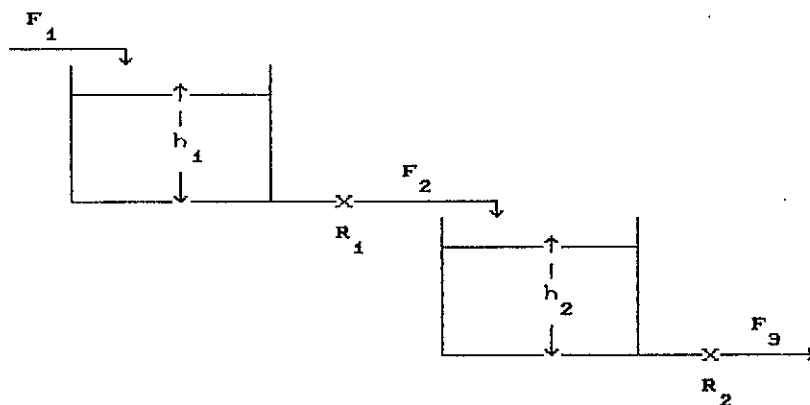


FIGURA VIII.2.

Queremos controlar o nível de líquido h_2 do tanque 2, manipulando o fluxo volumétrico F_1 , através de um controlador proporcional ($G_m = G_f = 1$).

Suponha que o tanque 1 tem uma área de seção transversal $A_1 = 5 \text{ ft}^2$, enquanto para o tanque 2 a área de seção transversal $A_2 = 2 \text{ ft}^2$.

Inicialmente, o sistema está em estado estacionário com $F_{1,e} = 1 \text{ ft}^3/\text{min}$, $h_{1,e} = 4 \text{ ft}$ e $h_{2,e} = 3 \text{ ft}$.

Plote o lugar das raízes para K_c variando de 0 a infinito.

VIII.3. Admita o mesmo processo exibido na FIGURA VIII.2., porém controlado agora por um controlador PI. Calcule o ganho e a frequência correspondentes à estabilidade limite como funções do parâmetro τ_I .

VIII.4. Suponha que se tem como objetivo controlar o nível de líquido do tanque exibido na FIGURA VIII.4.:

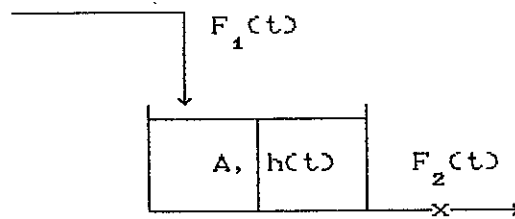


FIGURA VIII.4.

Se se dispõe de uma válvula de controle pneumática do tipo ar-para-fechar ($G_f = -K_f$, onde $K_f > 0$), um elemento de medida de dinâmica desprezível e um controlador pneumático P, indique a ação que o controlador deverá ter (REVERSA OU DIRETA) para que o processo em laço fechado seja estável, para os dois casos que se seguem:

- a) Variável manipulada $F_1(t)$. A vazão de saída $F_2(t)$ é dada $F_2(t) = \frac{h}{R}$;
- b) Variável manipulada $F_2(t)$. A vazão $F_1(t)$ será uma perturbação não medida.

OBS: AS RESPOSTAS DEVERÃO SER BASEADAS NA NATUREZA DAS(RAÍZES) DA EQUAÇÃO CARACTERÍSTICA.

VIII.5. Considere o processo mostrado na FIGURA VIII.5.a. para secar grânulos de fosfato. Uma mesa alimentadora transporta a corrente grânulos-água para o leito do secador. Neste leito os grânulos são secos por contacto direto com gases quentes de combustão. Do leito, os grânulos são transportados por uma esteira para um silo, onde são armazenados.

Propõe-se controlar a umidade dos grânulos pela velocidade da mesa alimentadora, como mostrado na FIGURA VIII.5.a.. A umidade dos grânulos na entrada é usualmente de 14 % e cai para 3 % no secador.

A FIGURA VIII.5.b. mostra a resposta da umidade de saída para um aumento de 2 mA na saída do controlador.

- a) Aproxime a curva de reação do processo (G_f, G_P) por um modelo de primeira ordem com tempo morto. Considere $G_M = 16 \text{ mA} / 5 \%$ e escreva $\tilde{G} = G_f G_P G_M$;

- b) Usando o Arranjo de Routh, verifique se o sistema em laço fechado com um controlador P com ação reversa é estável para $K_c = 3$ e $K_c = 4$.

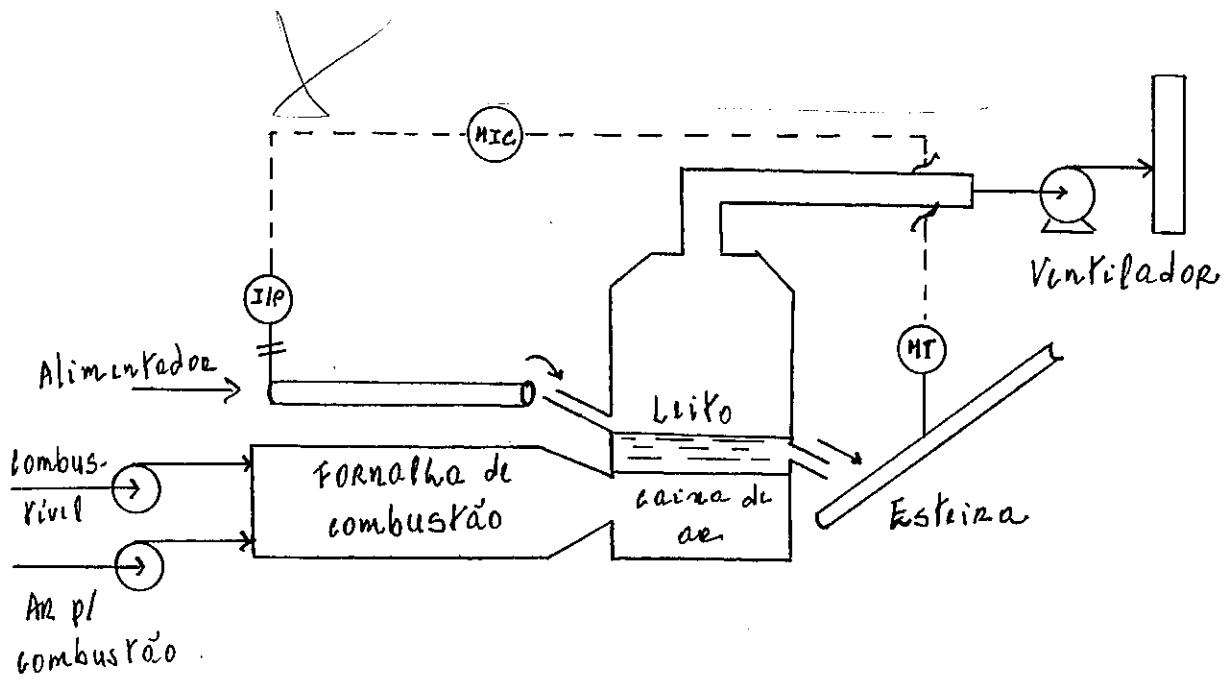


FIGURA VIII.5.a.

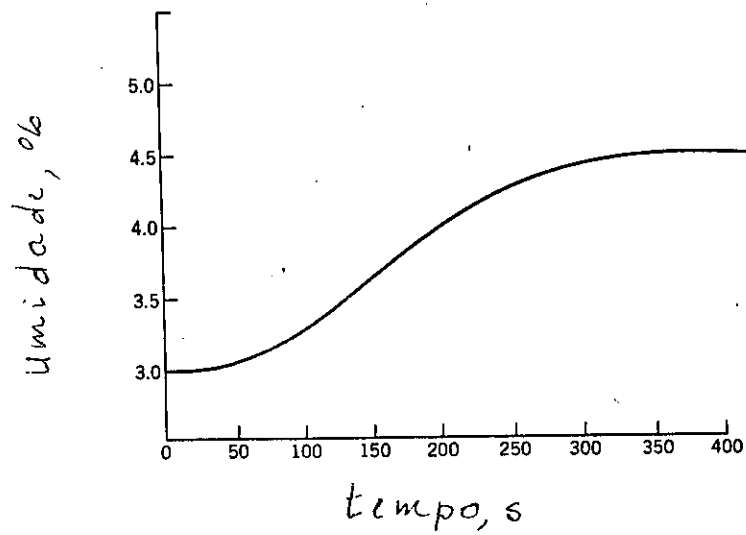
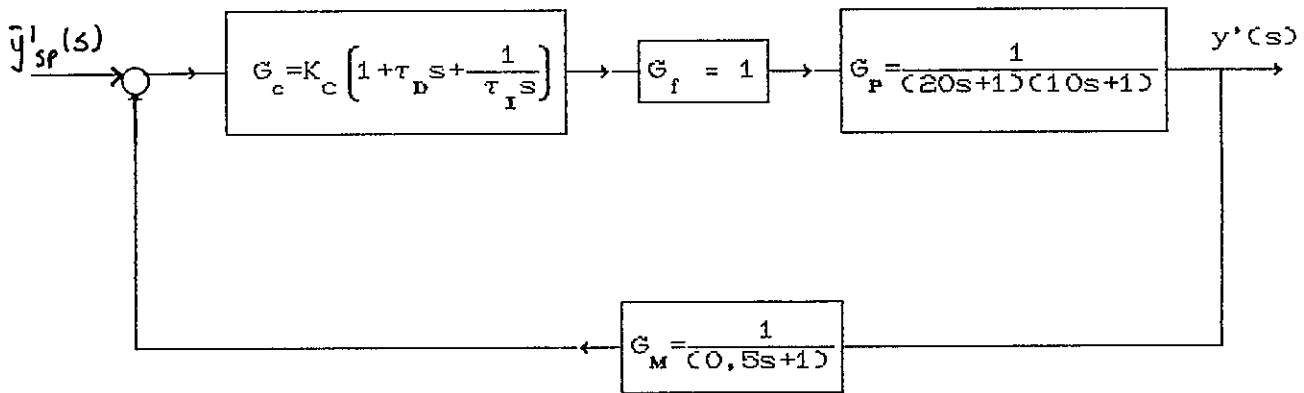


FIGURA VIII.5.b.

VIII.6. Seja o sistema em laço fechado com um PID:



- Escreva a equação característica.
- Construa o Arranjo de Routh para $\tau_D = 2/3$ e $\tau_I = 3$.
- Usando as regras do Arranjo de Routh indique para quais valores de K_c o sistema em laço fechado é estável.

VIII.7. Faça o diagrama do lugar das raízes para o processo: $G_P = \frac{1}{s-1}$, quando o mesmo está em laço fechado com um controlador PD implementado conforme segue: $G_c = K_c \frac{(\tau_D s + 1)}{(\alpha \tau_D s + 1)}$.

Tome $\alpha = 12$ e $\tau_D = 0,5$ e considere as dinâmicas da válvula e do elemento de medida desprezíveis ($G_m = G_f = 1$).

VIII.8. Seja a seguinte função de transferência:

$$G_P(s) G_c(s) G_f(s) G_M(s) = K_c \frac{s+4}{s(s+2)}$$

- Faça o diagrama do lugar das raízes.
- Calcule qual(is) o(s) valor(es) de ganho do controlador proporcional dá(ão) um coeficiente de amortecimento em laço fechado de 0,8. Se você obtiver mais de um valor para K_c , indique qual deles você implementaria e explique porque.

VIII.9. Um processo de segunda ordem:

$$G_P = \frac{5}{(3s+1)(2s+1)} \quad (1)$$

é controlado por um controlador P. A válvula tem dinâmica dada por:

$$G_f = \frac{1}{(s+1)} \quad (2)$$

e o elemento de medida introduz um tempo morto:

$$G_m = e^{-0,3s} \approx \frac{1 - 0,3s}{1 + 0,3s} \quad (3)$$

a) Suponha que para simplificar os cálculos desprezou-se a dinâmica do elemento de medida (fez-se $G_m = 1$).

Calcule o valor do ganho último K_u , usando o ARRANJO DE ROUTH; suponha que K_c foi ajustado em $K_c = K_u / 2$;

b) Usando o ajuste para K_c obtido em a) e considerando agora G_m como dado pela equação (3), verifique - pelo ARRANJO DE ROUTH - se o sistema em laço fechado é estável;

c) Do resultado obtido em b), comente qual o efeito do tempo morto nos processos em laço fechado.

VIII.10. Considere o sistema de controle de nível de líquido mostrado na FIGURA VIII.10., as vazões à saída de cada tanque têm uma dependência linear com o nível de líquido através de resistências R_1 e R_2 , respectivamente. As seguintes informações são conhecidas:

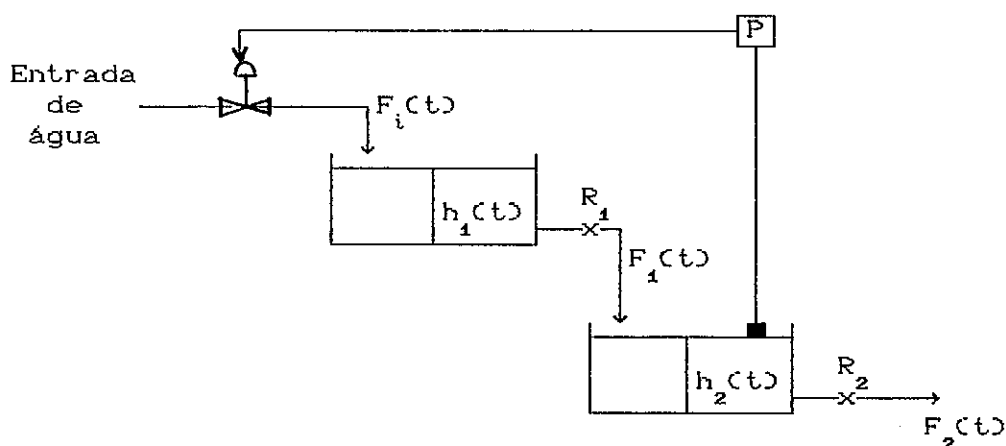


FIGURA VIII.10.

1. O sistema em laço aberto é criticamente amortecido e a área da seção transversal do tanque 1 é 2 m^2 ;

2. Quando o sistema em laço aberto é perturbado por um degrau de magnitude 1 em F_i , ambos os tanques sofrem uma variação total de 50 cm;

3. O controlador é P e tem ação reversa;

4. A válvula de controle é tal que tem uma função de transferência dada

$$\text{por: } G_f = \frac{\bar{F}'_i(s)}{\bar{c}'(s)} = \frac{0,1}{(0,2 s + 1)} \frac{\text{m}^3/\text{min}}{\text{psig}}$$

5. O elemento de medida é tal que $G_m = 20 \text{ psig/m}$.

Verifique se o sistema em laço fechado é estável para os seguintes valores de K_c : i. $K_c = 5$; ii. $K_c = 10$ e $K_c = 15$;

Para cada um dos valores de ganho acima apresentados calcule o "offset" para um degrau unitário no "set-point".

VIII.11. Considere o sistema de controle de nível de líquido mostrado na FIGURA VIII.11., a vazão à saída do primeiro tanque tem uma dependência linear com o nível de líquido através da resistência $R_1 = 0,5 \text{ m}^3/\text{cm}^2/\text{min}$. O tanque 1 tem área de 2 m^2 e o tanque 2 tem área de 1 m^2 . As seguintes informações são conhecidas:

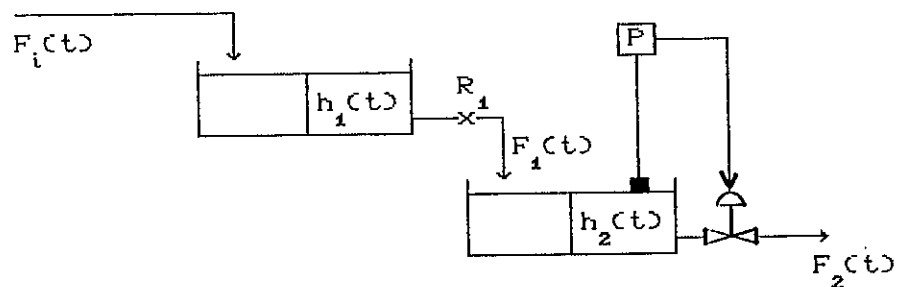


FIGURA VIII.11.

1. O controlador é P;

2. A válvula de controle é tal que tem uma função de transferência dada

$$\text{por: } G_f = \frac{\bar{F}'_i(s)}{\bar{c}'(s)} = \frac{0,1}{(0,2 s + 1)} \frac{\text{m}^3/\text{min}}{\text{psig}}$$

3. O elemento de medida é tal que $G_m = 20 \text{ psig/m}$.

O controlador deverá ter ação reversa ($G_c = K_c, K_c > 0$) ou direta ($G_c = -K_c, -K_c < 0$)? Por quê?

CAPÍTULO IX: CRITÉRIOS DE PROJETO E AJUSTE

IX.1. Admita que o elemento de medida para o controle do processo da questão VIII.2. apresenta uma dinâmica que pode ser descrita por:

$$G_m = \frac{1}{s + 1}$$

Calcule os ajuste para um controlador PID pelo método de Ziegler e Nichols.

IX.2. Uma corrente de processo é aquecida usando-se um trocador casco-tubo. A temperatura de saída é controlada, ajustando-se a válvula de controle mostrada na FIGURA IX.2.a..

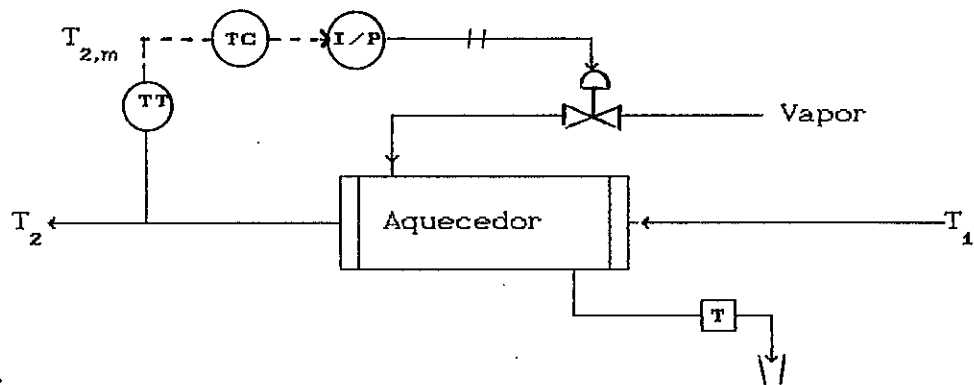


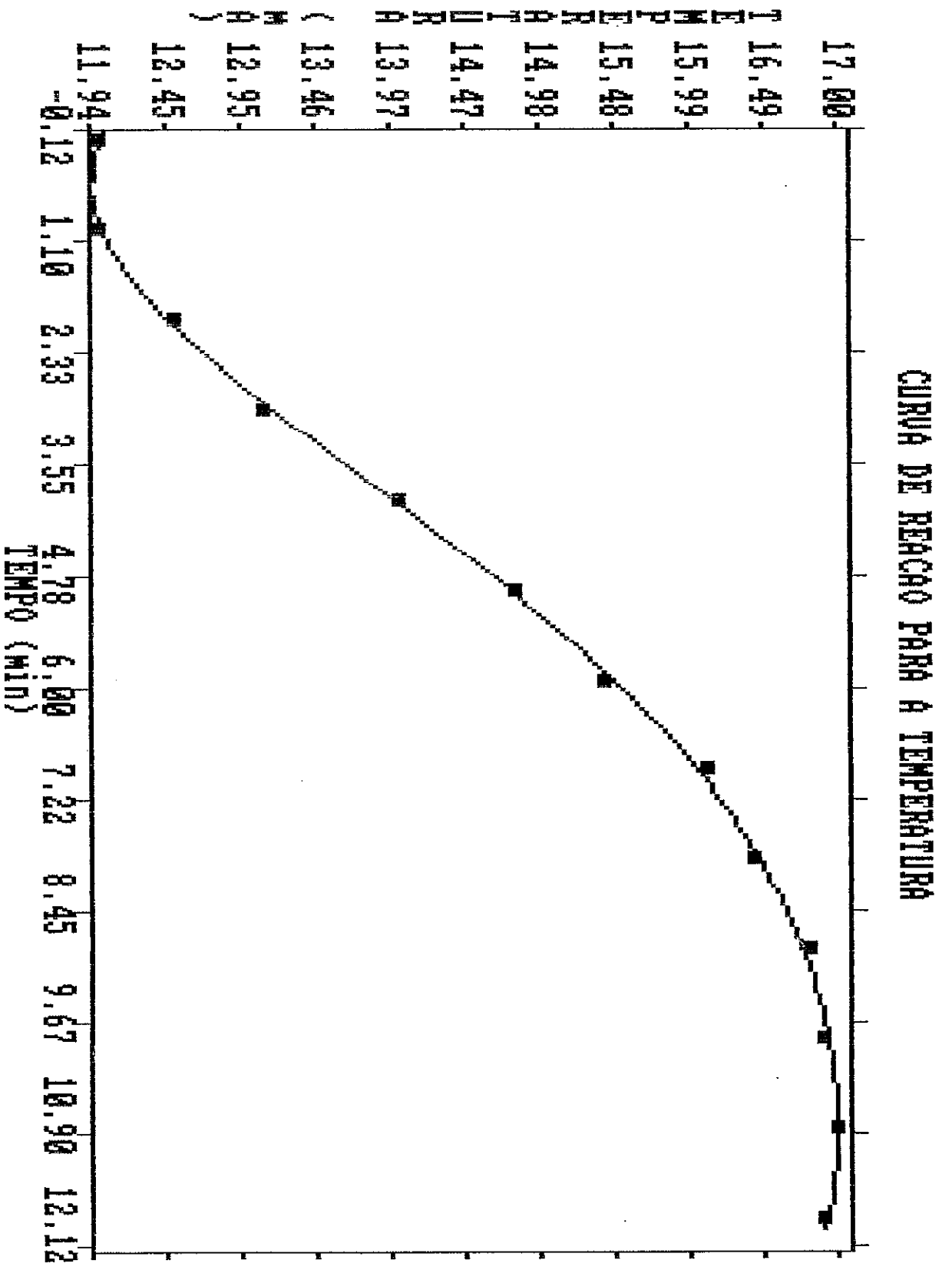
FIGURA IX.2.

TABELA 1

t(min)	T _{2m} (mA)	T _{2m} (mA) (modelo)
0	12	
1	12	
2	12,5	
3	13,1	
4	14,0	
5	14,8	
6	15,4	
7	16,1	
8	16,4	
9	16,8	
10	16,9	
11	17,0	
12	16,9	

Um teste foi feito no qual foi dado um degrau no sinal que alimenta a válvula de 12 a 14,96 mA. Os dados da TABELA 1 para a temperatura

FIGURA IX.2.6.



medida estão plotados na FIGURA IX.2.b.:

- Aproxime $G_f G_p G_m$ por uma função de transferência de primeira ordem com tempo morto.
- Calcule as expressões para $t \leq \theta$ e $t \geq \theta$ da resposta T_{2m} (mA) ao degrau indicado e complete a TABELA 1.
- Calcule o ajuste para um controlador P usando o critério de ITAE mínimo para mudanças no set-point;
- Calcule o ajuste para um controlador P usando o método de Ziegler e Nichols;
- Calcule os ajustes para um PI, usando o método de Cohen e Coon;
- Adotando uma estratégia *conservativa* de controle, qual valor de K_c que você implementaria: o do item c), d) ou e), por quê?

IX.3. Suponha que um sistema tenha sido modelado por:

$$G_f G_p G_m = \frac{K e^{-\theta s}}{\tau s + 1}$$

Admita também que o DIAGRAMA DE LUGAR DAS RAÍZES para o processo acima está disponível, conforme a FIGURA IX.3., onde foi usada a aproximação de Padé de 1ª ordem para o tempo morto e um controlador proporcional.

- Calcule os ajustes de um PI para o processo apresentado, usando o método de Ziegler e Nichols;
- Identifique K , τ e θ .

IX.4. Um estagiário verifica que um controle de vazão está sendo realizado por um controlador que - embora apresente os modos P, I e D - está sendo usado como um PI. O referido controlador foi ajustado pelo método de Ziegler e Nichols para: $K_c = 0,9$ e $\tau_I = 0,9$ min.

Sabendo das vantagens da ação derivativa, o estagiário decide reajustar o controlador para um PID, pelo método de Ziegler e Nichols.

- Para que valores de K_c , τ_I e τ_D ele pretende reajustar o controlador?
- Informado depois que no controle em questão há ruído de medida devido à vibração da bomba, o estagiário implementa ou não a ação derivativa? Por quê?

IX.5. Seja o sistema de 2 tanques de mistura perfeita em série:

FIGURA IX. 3.

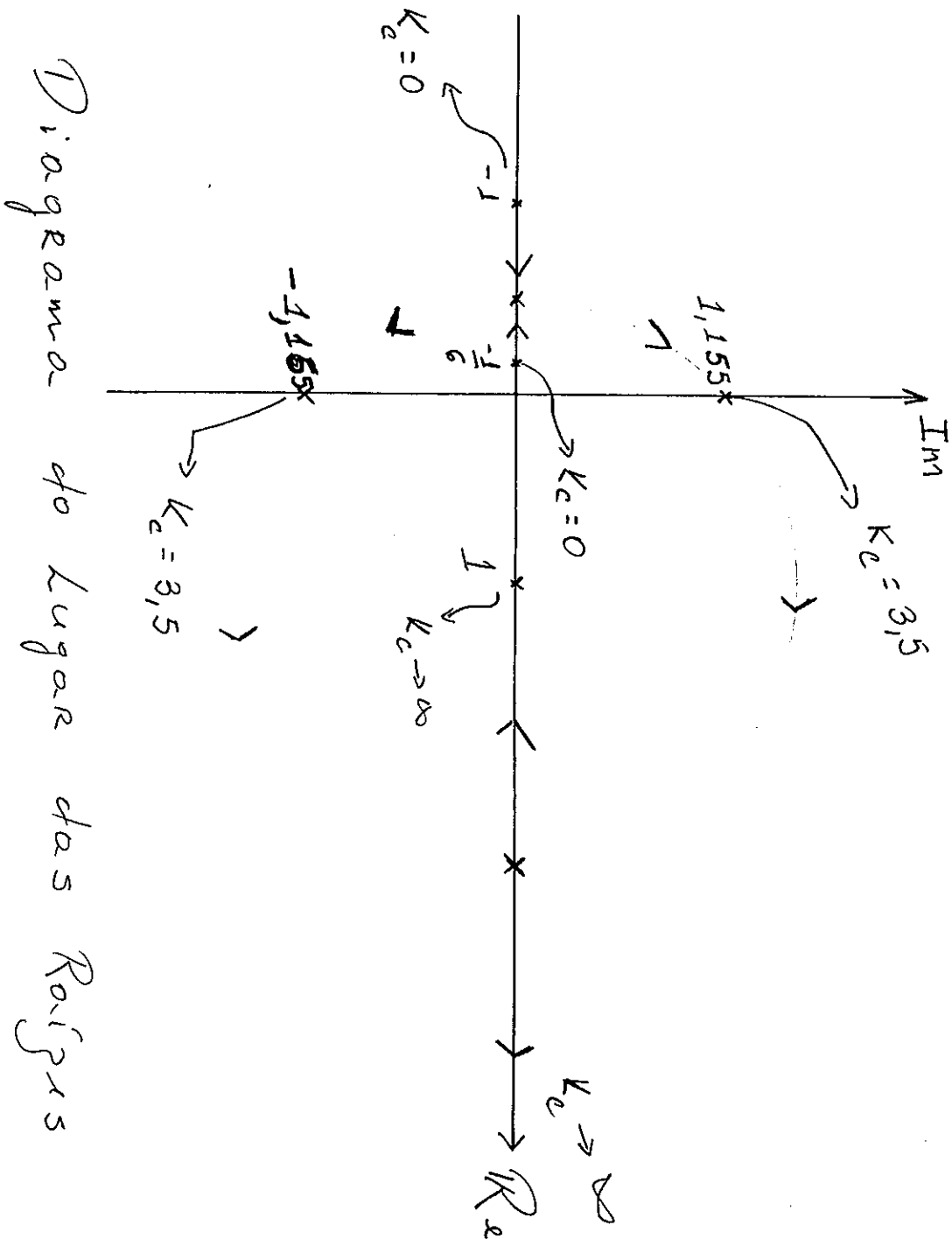
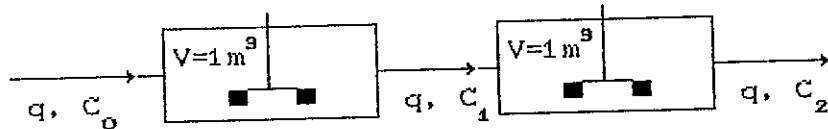
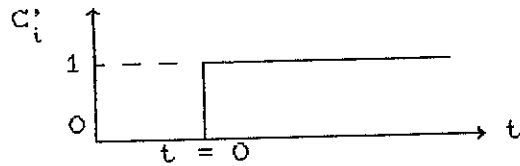


Diagrama do lugar das Raízes



O sistema inicialmente está em estado estacionário, quando um degrau unitário é dado na concentração de entrada:



a) Escreva expressões para $C'_c(t)$, para os seguintes casos:

$q(\text{m}^3/\text{s})$	$V(\text{m}^3)$
0,01	1
0,02	
0,05	

b) Esboce qualitativamente o gráfico abaixo para os três casos estudados acima.



c)

Admita que se queira controlar a concentração de saída $C'_2(t)$ para o processo descrito na QUESTÃO IX.5 (use os parâmetros do caso em que a resposta é mais lenta).

Suponha, $G_m = \frac{1}{(5s + 1)}$, $G_f = 1$ e - usando o método de Ziegler e Nichols - calcule os parâmetros do controlador "PID" para o controle deste processo.

IX.6. Um estagiário visita a sala de instrumentação de uma fábrica acompanhado do seu chefe imediato.

O chefe comenta que um dado processo é controlado por um controlador "P" e que a variável controlada apresenta "offset" frente a alterações de grau no "set-point".

O chefe diz também que o controlador foi ajustado por um engenheiro (que não se encontra mais na fábrica) usando o método de "uns tais de

Ziegler e Nichols " e pede ao estagiário que reajuste o controlador para um melhor desempenho.

O estagiário verifica que o ajuste do controlador é feito via um botão onde os ganhos podem ser variados de 0 a 10 (de um em um) e que o valor atual de K_c é 1.

Admitindo que o estagiário segue uma linha de controle conservativo (ou seja, procura trabalhar longe de condições instáveis), responda:

- a) Para que valor o estagiário reajusta K_c ?
- b) Como ele justifica este novo ajuste ?

IX.7. Na FIGURA IX.7., a concentração do sal que deixa o 2^o tanque é controlada pela adição de solução concentrada do sal através de uma válvula de controle. Sabe-se que:

1. O set-point para a concentração controlada é $0,1 \text{ lb}_m/\text{ft}^3$. A concentração de entrada é sempre menor que $0,1 \text{ lb}_m/\text{ft}^3$. A concentração da solução concentrada de sal é $30 \text{ lb}_m/\text{ft}^3$;
2. Sensor-transmissor: a saída do transmissor varia linearmente de 3 a 15 psig quando a concentração varia de $0,05$ a $0,15 \text{ lb}_m/\text{ft}^3$;
3. Controlador: o controlador é pneumático, tem ação reversa e é P;
4. Válvula de controle: quando a pressão no topo da válvula varia de 3 a 15 psig, a vazão através da válvula de controle varia linearmente de 0 a $0,005 \text{ ft}^3/\text{min}$;
5. Leva 0,5 min para a solução que deixa o segundo tanque alcance o sensor-transmissor no fim do tubo.

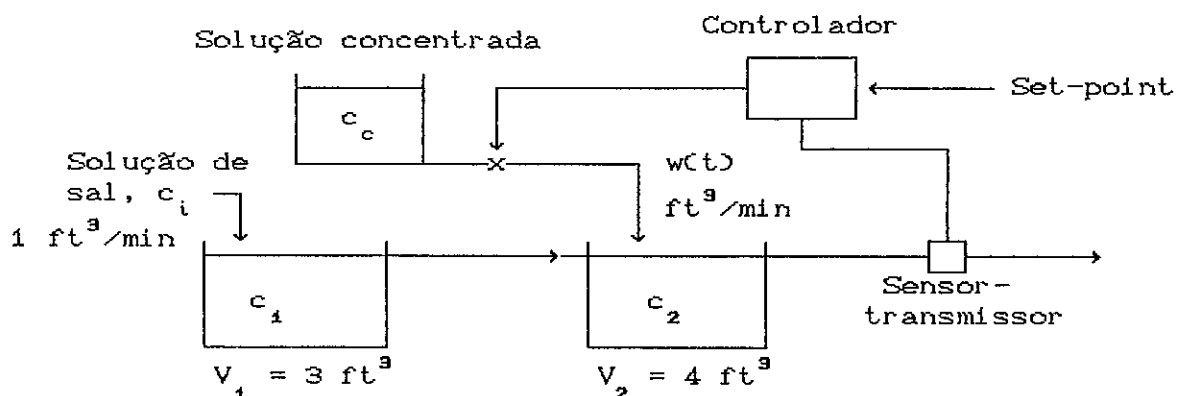


FIGURA IX.7.

$$G_f = \frac{1}{(0,6s+1)} \quad (2)$$

e o elemento de medida introduz um tempo morto:

$$G_m = e^{-0,4s} \approx \frac{1 - 0,2s}{1 + 0,2s} \quad (3)$$

(a) Suponha que para simplificar os cálculos desprezou-se a dinâmica do elemento de medida (fez-se $G_m = 1$). Calcule o ajuste do controlador P, usando o método de Ziegler e Nichols, para este caso;

(b) Usando o ajuste para K_c obtido em (a) e considerando agora G_m como dado pela equação (3), verifique - PELO ARRANJO DE ROUTH - se o sistema em laço fechado é estável;

(c) Do resultado obtido em (b), comente qual o efeito do tempo morto nos processos em laço fechado.

IX.11. Douglas (*Process Dynamics and Control*, vol.2, página 169) reporta a seguinte função de transferência para uma fornalha industrial:

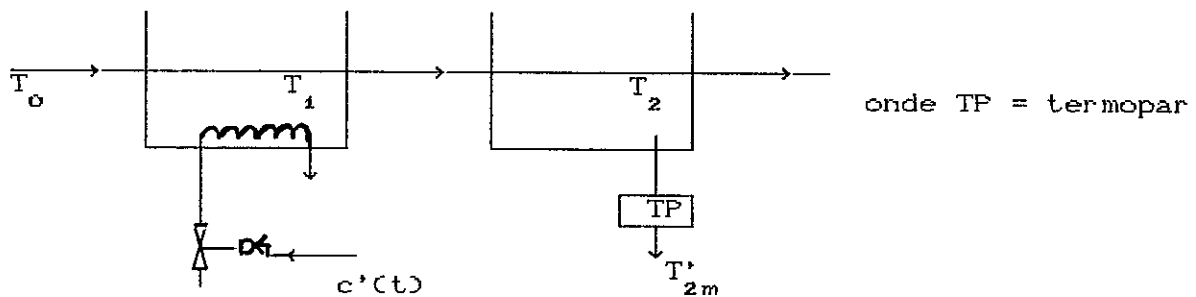
$$G_p(s) \cdot G_f(s) = \frac{T'(s)}{F'(s)} = \frac{40 e^{-20s}}{(900s+1)(25s+1)} \quad (^\circ\text{C}/\text{psi})$$

onde a função de transferência acima relaciona a temperatura da corrente do efluente à pressão fornecida à válvula pneumática na linha de combustível. Todas as constantes de tempo estão em segundos.

Se se tem disponível um elemento de medida de atuação rápida, o qual tem um ganho de 0,2 (psi/°C), selecione por Ziegler e Nichols os parâmetros de um controlador PI para este sistema. Use a aproximação de Padé de primeira ordem:

$$e^{-\theta s} \approx \frac{1 - \frac{\theta}{2} s}{1 + \frac{\theta}{2} s}$$

IX.12. A um engenheiro é solicitado o projeto de um controlador para o controle de T_2 no processo da FIGURA IX.12.:

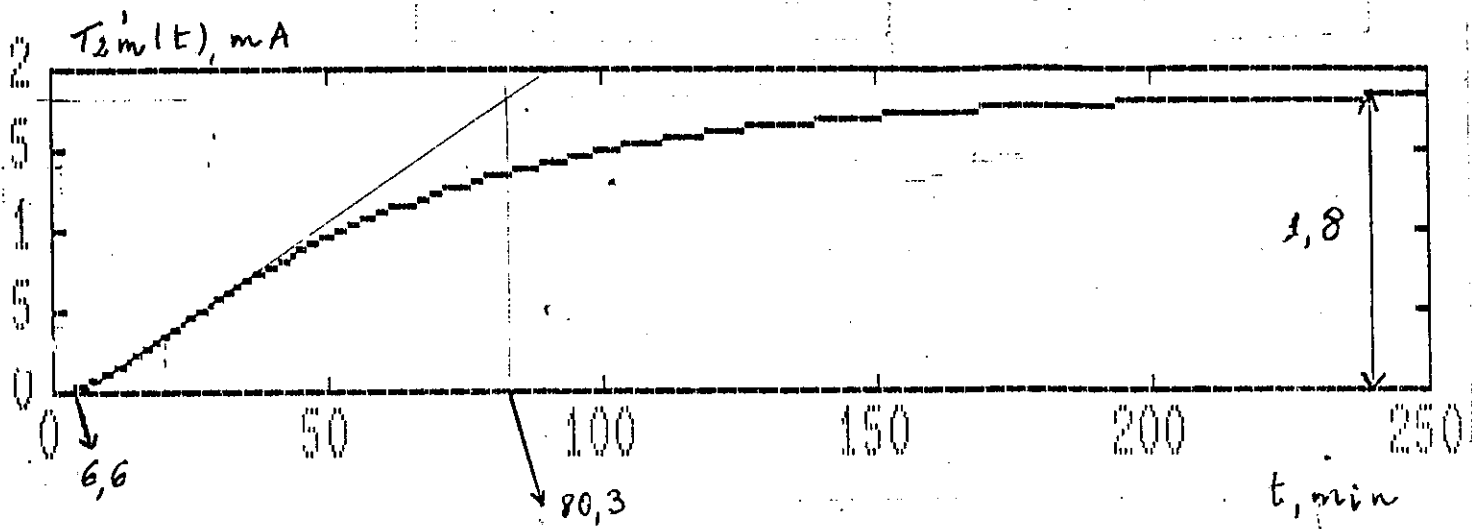


As seguintes condições devem ser levadas em conta no projeto do controlador:

- "offset" não é desejado;
- o controlador deve ser barado e simples de ajustar.

a) Que controlador é indicado pelo engenheiro? (P, PI ou PID?)

Para o ajuste do controlador, o engenheiro realiza um experimento prático consistindo da introdução de um degrau de magnitude 0,8 (mA) no sinal $c'(t)$ que alimenta a válvula e plota a resposta $T'_{2m}(t)$ em variáveis-desvio no gráfico a seguir (já está traçada a tangente à curva no ponto de inflexão):



b) Para o controlador escolhido em a), qual o conjunto de parâmetros obtidos pelo método de Cohen e Coon?

c) Usando a aproximação do processo acima por um sistema de 1a. ordem com tempo morto e empregando também a aproximação de Padé, calcule os parâmetros para o controlador escolhido em a) pelo método de Ziegler e Nichols.

IX.13. Considere o processo da QUESTÃO VIII.5.. Calcule os parâmetros de um controlador PID para este processo, baseado no índice ITAE para mudanças no setpoint.

IX.14. Considere o sistema de controle de nível de líquido mostrado na FIGURA IX.14., com um controlador P com opções para ação reversa e direta. Os tanques apresentam interação. As seguintes informações são conhecidas:

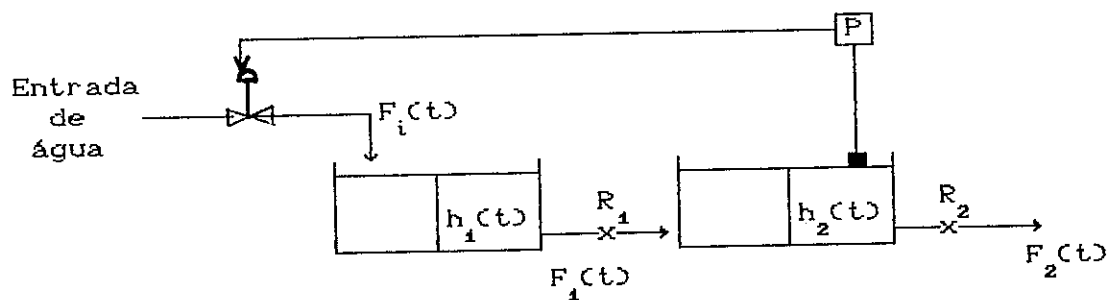


FIGURA IX.14.

- O sistema em laço aberto tem $\xi = 1,4$ e a área da seção transversal do tanque 2 é 2 m^2 ;

- Quando o sistema em laço aberto é perturbado por um degrau unitário em F_i , o tanque 1 sofre uma variação total de 80 cm e o tanque 2, de 30 cm.

a) Calcule a área do tanque 1;

b) Calcule as funções de transferência em laço aberto G_p e G_d ;

c) Para o sistema em laço aberto escreva as respostas $h_1'(t)$ e $h_2'(t)$ para um degrau unitário em $F_i'(t)$.

Para os demais itens considere também que:

- A válvula de controle é tal que a função de transferência é dada por:

$$G_f = \frac{-0,1}{0,2s + 1} \frac{\text{m}^3/\text{min}}{\text{psig}};$$

- O elemento de medida é tal que $G_m = 10 \text{ psig/m}$;

Todo

CAPÍTULO X: ANÁLISE E RESPOSTA DE FREQUÊNCIA DE PROCESSOS LINEARES

X.1. Suponha que tenhamos uma bateria de 3 CSTRs em série, e que queiramos manter a composição de um dado componente na saída do último reator tão constante quanto possível apesar de variações na composição de alimentação.

Nós tentamos compensar as perturbações ajustando a temperatura (ou seja, a constante de velocidade k_1) no primeiro tanque, MAS VAMOS SUPOR QUE ESTA MUDANÇA DE TEMPERATURA NÃO TEM EFEITO NAS CONDIÇÕES DOS TANQUES REMANESCENTES.

Considere k_1 como a variável (ou seja, não precisa explicitá-lo como função de T) e que:

$$k_{1,e} = k_2 = k_3 = k = 0,33 \text{ hr}^{-1};$$

Suponha que:

$c_{0,e} = 0,1 \text{ gmol/l}$; $V = 20 \text{ litros}$; $q = 100 \text{ l/h}$ e que o taxa de consumo para o componente é dado por : $-r_i V = -k_i C_i V$.

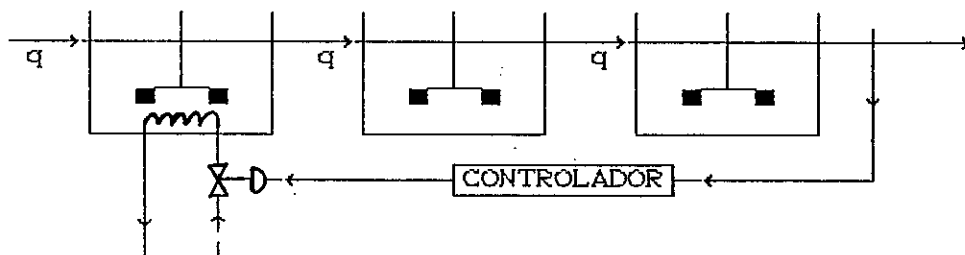


FIGURA X.1.

- Escreva as equações de balanço de massa para o componente controlado;
- Calcule as funções de transferência em laço aberto:

$$G_p(s) = \frac{\bar{c}'_g(s)}{\bar{K}'_1(s)} \quad \text{e} \quad G_d(s) = \frac{\bar{c}'_g(s)}{\bar{c}'_0(s)}$$

c) Considere $G_m(s) = 1$, $G_f(s) = 1$ e $G_c = K_c$; e calcule a frequência de corte para o sistema em laço aberto;

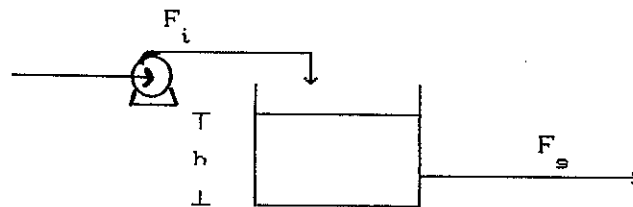
d) Usando o critério de Estabilidade de Bode - discuta a estabilidade do sistema em laço fechado para $K_c = 100$.

X.2. Sejam os seguintes sistemas de segunda ordem que apresentam amortecimento (τ e K_p constantes):

- a) $\xi = 1,2$
- b) $\xi = 1,0$
- c) $\xi = 0,9$
- d) $\xi = 0,8$

Para qual(is) deles se observa o fenômeno de ressonância? Justifique a sua resposta MATEMATICAMENTE.

X.3. Seja o seguinte sistema:



Suponha que a bomba de deslocamento positivo da alimentação produz um fluxo que é dado aproximadamente pela expressão:

$$F_i = F_{i,e} + B \text{ sen } \omega t$$

onde as flutuações são causadas pelo movimento do pistão na bomba.

De modo a suavizar as flutuações, nós introduzimos a corrente em um tanque aberto. O líquido escoar do fundo do tanque por um tubo com fluxo laminar e vai para outra unidade do processo. A suposição $F_s = K h$ é válida, onde K é uma constante.

a) Escreva: $\frac{\bar{h}'(s)}{\bar{F}_i'(s)}$, suponha A (área da seção transversal do tanque) e ρ (densidade do líquido) constantes.

b) Escreva: $\frac{\bar{F}_s'(s)}{\bar{F}_i'(s)}$.

c) Calcule A - em função de K e B - de modo que a amplitude das oscilações na saída em F_s' seja apenas 10 % (0,1) da amplitude das oscilações na entrada em F_i' .

X.4. A TABELA abaixo mostra a razão de amplitudes e o ângulo de fase de um sistema desconhecido a várias frequências:

FREQUÊNCIA (rad/min)	RA	ϕ (rad)
0,01	10	-0,011
0,05	10	-0,055
0,1	10	-0,110
1,0	9,95	-1,100
3,0	9,58	-3,291
5,0	8,94	-5,464
6,0	8,57	-6,540
9,0	7,43	-9,733
10,0	7,07	-10,785
12,0	6,40	-12,876
15,0	5,55	-15,983
20,0	4,47	-21,107
30,0	3,16	-31,249
40,0	2,43	-41,326
50,0	1,96	-51,373
60,0	1,64	-61,406
70,0	1,41	-71,429
80,0	1,24	-81,446
90,0	1,10	.
⋮	⋮	⋮

Plote os diagramas na folha em anexo e responda:

- a) Este sistema é de 1^a ou 2^a ordem? Por quê?
- b) Este sistema apresenta tempo morto? Por quê?
- c) — Se você afirmou que o processo é 1^a ordem, identifique K_p e τ_p .
 — Se você afirmou que o processo é 2^a ordem, identifique K_p , ξ e τ .
 — Se há tempo morto, identifique-o.

X.5. Seja:

$$G = G_c G_f G_p G_m = \frac{2 K_c e^{-d s}}{2 s + 1} \quad (1)$$

onde o tempo morto é estimado como sendo 0,5 com erro de $\pm 30\%$.

a) Se o tempo morto se apresenta na faixa $d = 0,5 \pm 0,15$, qual o valor que você escolherá para "d" a fim de projetar um controlador para este sistema? Por quê? Baseie sua resposta em seus conhecimentos sobre estabilidade e, principalmente, bom senso.

PARA OS ITENS SEGUINTEs, TRABALHE COM O VALOR PARA "d" ESCOLHIDO NO ITEM a).

b) Você sabe que o valor de K_c que torna a razão de amplitudes RA (para o sistema $G_c G_f G_p G_m$) igual a 1 é o chamado ganho último K_{cu} .

Usando a informação acima e o método de "Ziegler e Nichols", ajuste K_c .

c) Aproxime o tempo morto e^{-ds} em (1) por Padé e usando a nova expressão, calcule K_c por "Ziegler e Nichols".

d) Qual resultado (o do item b ou o do item c) você implementaria numa situação real? Por quê?

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Process Dynamics and Control. Dale E. Seborg, Thomas F. Edgar and Duncan A. Mellichamp. Wyley Series in Chemical Engineering, 1989.
2. Chemical Process Control, An Introduction to Theory and Practice. George Stephanopoulos.
3. Process Systems Analysis and Control. Coughanowr. 2nd Ed. McGraw-Hill International Editions, 1991.
4. Análise e Controle de Processos. Coughanowr e Koppel. Editora Guanabara, 1978.
5. Principles and Practice of Automatic Process Control. Carlos A. Smith and Armando B. Corripio. John Wylie and Sons, 1985.
6. Process Modeling, Simulation, and Control for Chemical Engineers. W. L. Luyben. Second Edition. McGraw-Hill, 1990.
7. Process Dynamics and Control. J. M. Douglas. Volumes 1 e 2. Prentice-Hall, Inc, 1972.
8. Controle Automático de Processos Industriais, Instrumentação, Sighieri e Nishinari.
9. Manual de Engenharia Química. Perry e Chilton. Guanabara Dois.