

## 107484 – Controle de Processos

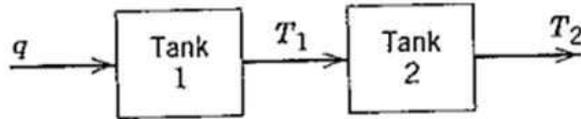
1º Semestre 2015

# LISTA DE EXERCÍCIOS 2

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 tanque são abertos e as saídas são livres para a atmosfera;
- Considere como conhecidos a área ou o volume dos reservatórios (tanques).

1. Calcule o ganho, em porcentagem de saída do transmissor por unidade de engenharia da variável de entrada (especifique as unidades), escreva a função de transferência e desenhe o diagrama de blocos para cada um dos seguintes casos:
  - (a) Um transmissor de temperatura com uma faixa de 100 a 150 °C e constante de tempo de 1,2 min.
  - (b) Um transmissor de pressão com uma faixa de 0 a 50 psi e constante de tempo de 0,5 min.
2. Um processo consiste de dois tanques agitados com entrada  $q$  e saídas  $T_1$  e  $T_2$  conforme Figura 2. Para testar a hipóteses que a dinâmica em cada tanque é basicamente de 1ª ordem, foi realizado um degrau na entrada  $q$  de 82 para 85, as saídas são apresentadas na Figura 2. Ache a função de transferência  $\tilde{T}_1/\tilde{Q}$  e  $\tilde{T}_2/\tilde{T}_1$ . Assuma que eles são de 1ª ordem.



Time	$T_1$	$T_2$	Time	$T_1$	$T_2$
0	10.00	20.00	11	17.80	25.77
1	12.27	20.65	12	17.85	25.84
2	13.89	21.79	13	17.89	25.88
3	15.06	22.83	14	17.92	25.92
4	15.89	23.68	15	17.95	25.94
5	16.49	24.32	16	17.96	25.96
6	16.91	24.79	17	17.97	25.97
7	17.22	25.13	18	17.98	25.98
8	17.44	25.38	19	17.99	25.98
9	17.60	25.55	20	17.99	25.99
10	17.71	25.68	50	18.00	26.00

3. Para um processo de bioseparação com multiestágio descrito pela função de transferência

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

calcule a resposta de um degrau da entrada de magnitude 1, 5.

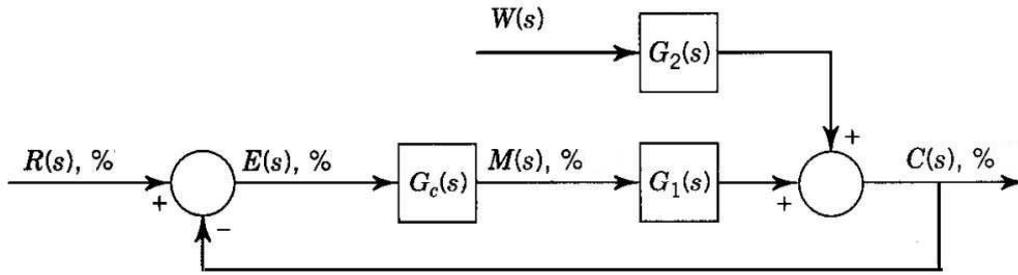
- Obtenha um modelo aproximado FOPTD (primeira ordem mais atraso no tempo) a partir da função de transferência por meio de alguma técnica de redução de ordem.
  - Obtenha um modelo aproximado FOPTD a partir da resposta temporal ao degrau aplicado por meio das seguintes técnicas de identificação: i) método de Broida (uso de 2 pontos); ii) por meio de um conjunto de pontos.
  - Obtenha um modelo aproximado de segunda ordem sem atraso no tempo a partir da resposta temporal de um sinal de excitação escolhido por meio da técnica de identificação por mínimos quadrados.
4. Uma malha de controle de controle de realimentação é representada pelo diagrama de blocos da Figura 4 em que

$$G_1(s) = \frac{1}{(s + 1)}$$

e

$$G_c(s) = K_c \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

- Escreva a função de transferência de malha fechada e a equação característica da malha.
- Há um ganho final (último) para a malha?



5. Uma malha de controle de realimentação é representada pelo diagrama de blocos da Figura 4 em que

$$G_1(s) = \frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$$

$K = 0,10\%/%$ ,  $\tau_1 = 1$  min e  $\tau_2 = 0,8$  min.

Considere um controlador PI,

$$G_c(s) = K_c \left( 1 + \frac{1}{T_i s} \right)$$

Determine o ganho final (último) da malha  $KK_{cu}$  e o período final de oscilação como funções do termo integral  $T_i$ .

6. Uma malha de controle de realimentação é representada pelo diagrama de blocos da Figura 4 em que

$$G_1(s) = \frac{K}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)(\tau_3 s + 1)}$$

$K = 2,5\%/%$ ,  $\tau_1 = 5$  min,  $\tau_2 = 0,8$  min e  $\tau_3 = 0,2$  min.

Determine os parâmetros de sintonização do controlador (escolha uma estrutura PI ou PID) para resposta de razão de decaimento de um quarto (Ziegler-Nichols) pelos métodos

- Ziegler-Nichols de malha aberta: aplique algum método de redução de ordem para um modelo de 1ª ordem mais atraso.
  - Ziegler-Nichols de malha fechada: determine o ganho último e o período de oscilação analiticamente.
7. A função de transferência para um processo de resposta inversa é

$$G(s) = \frac{K(1 - \tau_3 s)}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)}$$

- Apresente um controlador pelo método da Síntese Direta. Escolha uma função de transferência de malha fechada apropriada como objetivo. É possível reescrever este controlador na forma de um PID e em qual estrutura (padrão, série ou não-interativa)?
- Repita o procedimento aplicando a técnica IMC em que a função de transferência do modelo interno ( $G_i(s)$ ) é igual a da planta ( $G(s)$ ).

(c) Repita o item anterior considerando

$$G(s) = \frac{3(1-s)}{(8s+1)(2s+1)}$$

e

$$G_i(s) = \frac{3e^{-1s}}{(8s+1)}$$

Obs. I: Considere nesse caso que o filtro anula a diferença entre os modelos que aparece no denominador da função de transferência de malha fechada.

Obs. II: Verifique via simulação a estratégia IMC implementada para os dois casos ( $G_i(s) = G(s)$  e  $G_i(s) \neq G(s)$ ) para avaliar a robustez do método.

8. Seja o sistema trocador de calor dado na Figura 1.

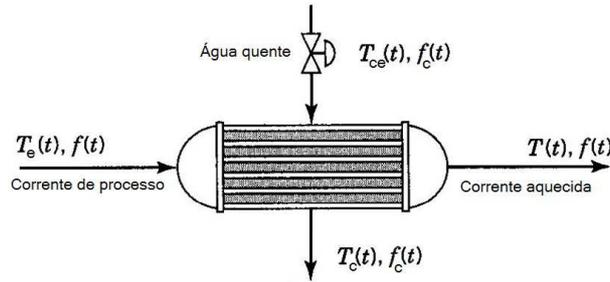


Figura 1: Sistema trocador de calor.

A variável controlada é  $T(t)$ , a variável manipulada é  $f_c(t)$  e as variáveis de perturbação são  $f(t)$ ,  $T_e(t)$ ,  $T_{cc}(t)$ . O valor de  $T(t)$  que chega ao controlador é afetado por dois atrasos: o primeiro é um atraso de transporte, correspondente a um trecho reto de tubulação existente entre a saída do trocador de calor e o sensor de temperatura, e o outro é devido ao elemento sensor-transmissor não serem perfeitos, mas apresentarem uma dinâmica de 1ª ordem.

Para identificar o processo aplicou-se um degrau na variável manipulada e a curva de reação obtida pode ser aproximada por um modelo de 1ª ordem mais tempo morto ( $K = 0,127$ ,  $\tau = 10,6s$  e  $\theta = 17,3s$ ) ou de 2ª ordem subamortecido mais tempo morto ( $K = 0,127$ ,  $\tau = 8,5s$ ,  $\xi = 0,95$  e  $\theta = 12,2s$ ), como segue

$$G_1(s) = \frac{0,127e^{-17,3s}}{10,6s+1} \quad (1)$$

$$G_2(s) = \frac{0,127e^{-12,2s}}{72,25s^2 + 16,15s + 1} \quad (2)$$

Comparou-se a resposta ao degrau dos modelos aproximados  $G_1(s)$  e  $G_2(s)$  com a curva de reação do processo e verificou-se que ambos geram boas aproximações, sendo que a resposta fornecida por  $G_2(s)$  foi levemente melhor que a fornecida por  $G_1(s)$ . Observou-se que o distúrbio mais significativo é  $f(t)$ . Considere que a função de transferência entre  $f(t)$  e a variável controlada é dada por

$$G_d(s) = \frac{0,1}{10,6s+1} \quad (3)$$

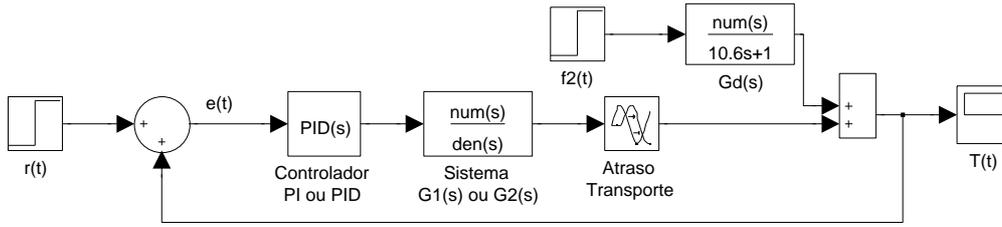


Figura 2: Sistema em malha fechada do Exercício 1.

como mostrado na Figura 2

Projete um controlador de realimentação (PI ou PID) para o processo  $G_2(s)$  (ou  $G_1(s)$  quando não for possível usar um modelo de 2ª ordem) por meio das técnicas abaixo. Para cada técnica, se não indicado, avalie se o projeto deve ser feito para o sistema de 1ª ou 2ª ordem e qual a estrutura do controlador mais apropriada (dê preferência ao projeto do PID quando ambas as estruturas foram possíveis).

- Ziegler-Nichols (malha aberta)
- Ziegler-Nichols (malha fechada usando *Método dos Relés*)
- CHR (entre servo e regulação ou com/ sem sobrevalor, escolha a de menor ITAE)
- CC (Cohen e Coon)
- Síntese Direta (para o sistema de 1ª ordem,  $\lambda = 17.3s$ )
- IMC (para o sistema de 2ª ordem,  $\lambda = 14s$ )
- Método *Integral do Erro ITAE PID*
- Compensação de tempo morto “Preditor de Smith” (projete um PI usando uma das técnicas acima)

Plote num mesmo gráfico a resposta do sistema em malha fechada (considerando processo para qual o controlador foi projetado) ao degrau unitário da referência para cada técnica projetada. Em outro gráfico, plote a resposta das técnicas ao degrau unitário do distúrbio  $f(t)$ . Para avaliar a robustez plote também a resposta ao degrau unitário da referência para o sistema em malha fechada considerando o processo com um incremento de 50% no tempo morto.

Monte em uma tabela os valores de cada técnica do ITAE para a resposta ao degrau da referência (modelo preciso e modificado) e do IAE para o degrau no distúrbio, considerando

$$ITAE = \int_0^{t_f} t|e(t)|dt, \quad (4)$$

$$IAE = \int_0^{t_f} |e(t)|dt. \quad (5)$$

Utilize  $t_f = 300s$  ou o maior tempo de acomodação da resposta ao degrau do processo em malha fechada com os controladores projetados. Identifique o melhor controlador segundo esses indicadores e se houve casos de instabilidade.