

107484 – Controle de Processos

Prof. Eduardo Stockler Tognetti

1º Semestre 2018

LISTA DE EXERCÍCIOS 3

1. Usando o critério de estabilidade de Bode, defina se os sistemas de controle (sistema em malha fechada com realimentação unitária) com as seguintes funções de transferência de malha aberta são estáveis ou instáveis.

(a) $G = \frac{1}{s - 1}$

(b) $G = \frac{10e^{-3s}}{4s + 1}$

(c) $G = \frac{5e^{-5s}}{(2s + 1)(s + 1)}$

(d) $G = \frac{1}{0,2s^2 + 0,8s - 1}$

2. Calcule as margens de fase e ganho para os sistemas com realimentação com as funções de transferência de malha aberta dadas no Problema 1. Com base nesses valores, defina se os sistemas são estáveis ou instáveis.
3. Para cada um dos itens do Problema 1 projete um controlador proporcional com margem de ganho 1.7.
 - (a) O sistema em malha fechada seria estável para diminuição da constante de tempo em 50%? Obs.: para o item (c) considere a diminuição de 50% da menor constante de tempo e para o item (d) a diminuição de τ na representação na forma $\tau^2 s^2 + 2\xi\tau s + 1$.
 - (b) O sistema em malha fechada seria estável para aumento em 50% do atraso no tempo? Obs.: para o (a) e (d) insira um atraso de metade do valor da constante de tempo τ .
4. Para cada um dos itens do Problema 1 projete um controlador proporcional com margem de fase de 30°.
 - (a) O sistema em malha fechada seria estável para diminuição da constante de tempo em 50%? Obs.: para o item (c) considere a diminuição de 50% da menor constante de tempo e para o item (d) a diminuição de τ na representação na forma $\tau^2 s^2 + 2\xi\tau s + 1$.

- (b) O sistema em malha fechada seria estável para aumento em 50% do atraso no tempo? Obs.: para o (a) e (d) insira um atraso de metade do valor da constante de tempo τ .

5. Para o item (b) do Problema 1, sistema em malha aberta

$$G(s) = \frac{10e^{-3s}}{4s + 1}$$

- (a) Esboce o diagrama de Bode do sistema em malha aberta.
- (b) Esboce o diagrama de Bode de um controlador PI genérico.
- (c) Por meio dos diagramas dos itens (a) e (b) projete um controlador PI (ache o ganho proporcional e o tempo de integração) para uma margem de ganho de 2.
- (d) Por meio dos diagramas dos itens (a) e (b) projete um controlador PI (ache o ganho proporcional e o tempo de integração) para uma margem de fase de 40° .
- (e) Ache o ganho proporcional K_c do controlador PI com $\tau_i = 4$ tal que o sistema de controle tenha margem de ganho igual a 2.
- (f) Com um controlador PI com $\tau_i = 4$, qual seria a margem de fase necessária para permitir um atraso máximo total de 5 min? Projete K_c para esse cenário.
- (g) Repita os itens (e) e (f) com $\tau_i = 8$.
6. Um processo de 1ª ordem com tempo morto tem a seguinte função de transferência

$$G_p(s) = \frac{10e^{-t_d s}}{\tau s + 1}, \quad \tau = 2 \text{ min}$$

Esse processo é controlado com um controlador PI. Use o critério de estabilidade de Bode para encontrar o intervalo de valores do ganho K_c em função de t_d para os quais a resposta de malha fechada é estável. Considere que o tempo integral do controlador PI é $\tau_I = 0,5$ min.

7. Uma malha de controle de realimentação é representada pelo diagrama de blocos da Figura 1 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 a resposta de razão de decaimento de um quarto (Ziegler-Nichols) pelos métodos

- (a) Ziegler-Nichols de malha aberta: aplique algum método de redução de ordem para um modelo de 1ª ordem mais atraso (método de Skogestad).
- (b) Ziegler-Nichols de malha fechada: determine o ganho último e o período de oscilação analiticamente.

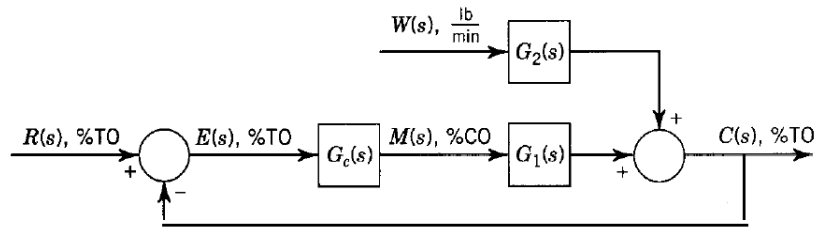


Figura 1: Diagrama de blocos.

8. Considere o tanque de armazenamento da Figura 2 com a seguinte função de transferência

$$\frac{H_1(s)}{Q_1(s)} = \frac{R_1}{(A_1 R_1 A_2 R_2) s^2 + (A_1 R_1 + A_2 R_1 + A_2 R_2) s + 1}$$

Os valores dos parâmetros são $R_1 = 0,5 \text{ min/ft}^2$, $R_2 = 2 \text{ min/ft}^2$, $A_1 = 10 \text{ ft}^2$ e $A_2 = 0,8 \text{ ft}^2$. Considere a dinâmica do elemento final de controle como $K_v = 2,5 \text{ cfm/mA}$ e do transmissor como $K_m = 1,5 \text{ mA/ft}$ e $\tau_m = 0,5 \text{ min}$.

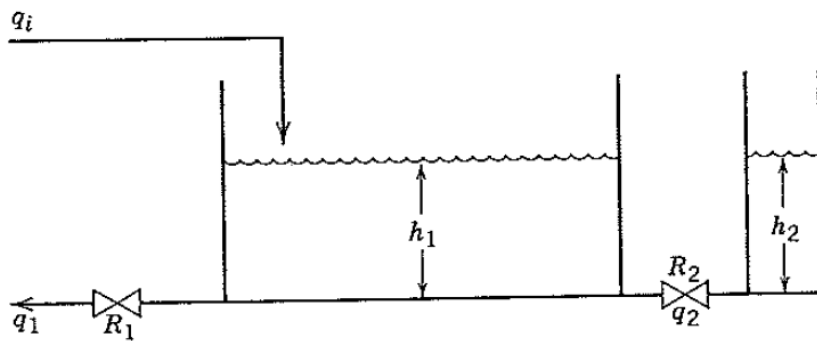


Figura 2: Tanque de armazenamento.

- (a) Suponha que R_2 diminuiu para $0,5 \text{ min/ft}^2$. Compare os antigos e novos valores do ganho último e da frequência crítica.
- (b) Se os parâmetros de um controlador PI são calculados usando o método Ziegler-Nichols de malha fechada, quais são as margens de ganho e de fase? Assuma $R_2 = 2 \text{ min/ft}^2$.

9. Considere o sistema de controle em realimentação da Figura 3 e as seguintes funções de transferência:

$$G_c = K_c \left(\frac{2s + 1}{0,1s + 1} \right) \quad G_v = \frac{2}{0,5s + 1}$$

$$G_p = \frac{0,4}{s(5s + 1)} \quad G_d = \frac{3}{5s + 1}$$

$$G_m = 1$$

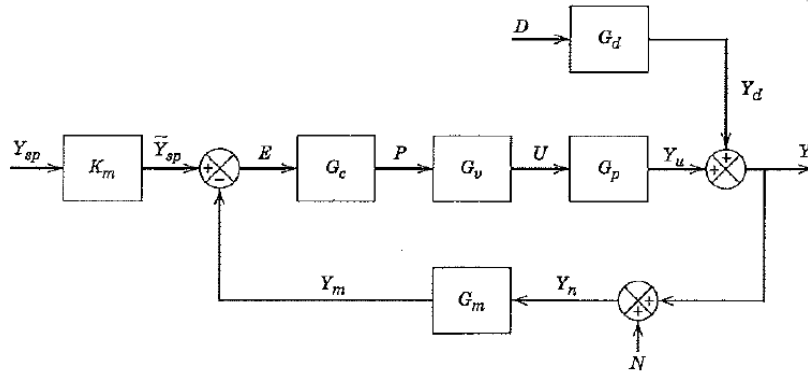


Figura 3: Diagrama de blocos.

- (a) Calcule o valor de K_c que fornece uma margem de fase de 30° .
 (b) Qual é a margem de ganho quando $K_c = 10$?
10. A função de transferência para um processo de resposta inversa é

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

- (a) 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)?
 (b) Repita o procedimento aplicando a técnica IMC. Considere que a função de transferência do modelo interno ($\tilde{G}(s)$) é igual a da planta ($G(s)$).
 (c) Repita o item anterior considerando

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

11. Seja o sistema trocador de calor dado na Figura 4.

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

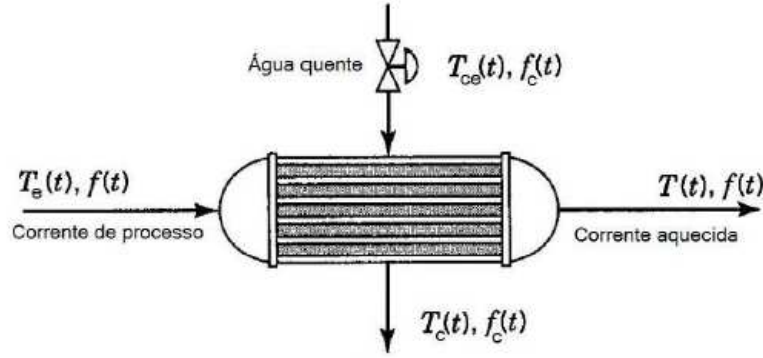


Figura 4: Sistema trocador de calor.

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 ser perfeito, mas apresentar 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

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

como mostrado na Figura 5.

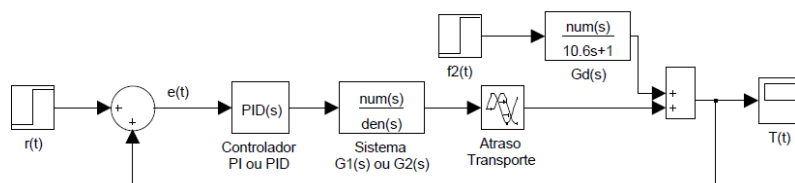


Figura 5: Diagrama de blocos.

Projete um controlador de realimentação para o processo $G_1(s)$ ou $G_2(s)$ por meio das técnicas abaixo. Para cada técnica escolha qual a representação é mais apropriada (1ª ou 2ª ordem) e quando as duas forem possíveis dê preferência a de 2ª ordem.

Avalie também qual a estrutura do controlador mais apropriada (PI ou PID) dando preferência ao projeto do PID quando ambas as estruturas forem possíveis.

- (a) Ziegler-Nichols (malha aberta)
- (b) Ziegler-Nichols (malha fechada)
- (c) CHR (escolha a tabela do problema de regulação sem sobrevalor)
- (d) Síntese Direta (para o sistema de 1ª ordem, $\lambda = 17, 3s$)
- (e) IMC (para o sistema de 2ª ordem, $\lambda = 14s$)

Obs.: Opcional: implemente o código Matlab abaixo e compare as respostas obtidas para os controladores encontrados (utilize o comando `hold on` se quiser colocar vários curvas num mesmo gráfico):

```
s = tf('s');
G1 = 0.127*exp(-17.3*s)/(10.6*s+1);
G2 = 0.127*exp(-12.2*s)/(72.25*s^2+16.15*s+1);
G = G2; %ou G = G1;
Gc = kc*(1+1/(Ti*s));
Gmf_r = (Gc*G)/(1+Gc*G); %ou Gmf_r = feedback(Gc*G,1);
figure;
step(Gmf_r);
Gd = 0.1/(10.6*s+1);
Gmf_d = Gd/(1+Gc*G);
figure;
step(Gmf_d);
```