

107484 – Controle de Processos

1º Semestre 2018 — Prof. Eduardo Stockler Tognetti

LISTA DE EXERCÍCIOS 2

Para os exercícios abaixo considere (exceto se especificado ao contrário) que o diagrama de blocos do sistema é dado pela Figura 1.

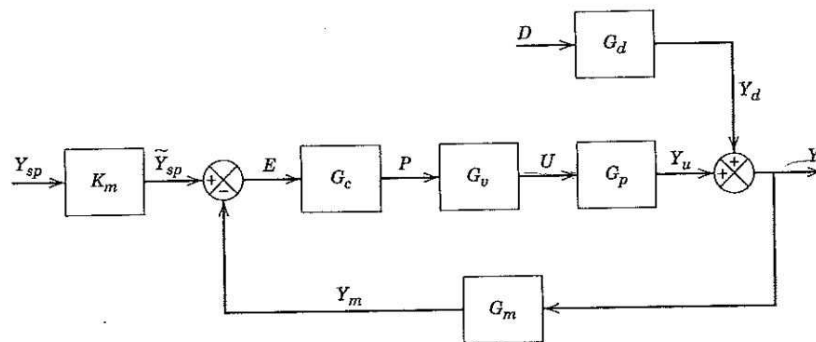


Figura 1: Diagrama de blocos.

1. A seguinte função de transferência não está escrita na forma padrão

$$G(s) = \frac{2(s + 0.5)}{(s + 2)(2s + 1)} e^{-5s}$$

- (a) Reescreva a função de transferência de forma a explicitar as constantes de tempo e o ganho estático.
- (b) Determine o ganho, polos e zeros.
- (c) Substitua o termo de tempo morto por uma aproximação de Padé de 1ª ordem e repita o item b.

2. Um processo é descrito pela seguinte função de transferência

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

- (a) Calcule a resposta $y(t)$ para uma variação em degrau na entrada $u(t)$ de amplitude M quando $M = 2$, $K = 3$ e $\tau = 3$.
- (b) Qual seria a resposta ao degrau se o processo também incluísse um tempo morto, ou seja,

$$G_2(s) = \frac{Ke^{-2s}}{(1-s)(\tau s + 1)}$$

- (c) Se uma aproximação de Padé de 1ª ordem for utilizada no lugar do tempo morto, qual função de transferência aproximaria $G_2(s)$?
- (d) Para a função de transferência obtida no item (c), encontre a expressão da resposta ao degrau.
- (e) O que você pode concluir sobre o uso das aproximações de Padé com esse tipo de processo?
3. Uma mudança de passo (alteração da entrada por um sinal tipo degrau) de 15 para 31 psi na pressão resulta na resposta medida a partir do elemento de indicação de pressão mostrado na figura a seguir.

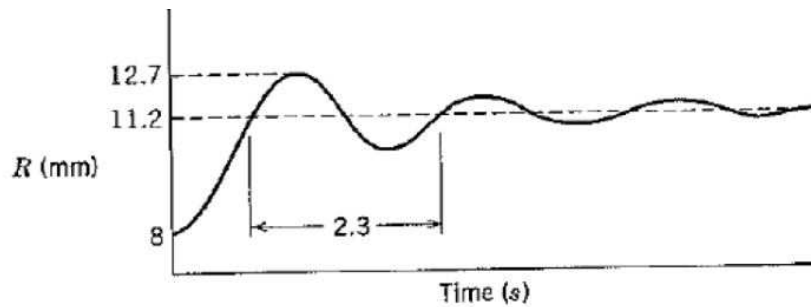


Figura 2: Resposta de R ao degrau na pressão P .

Assumindo um sistema dinâmico de segunda ordem, calcule todos os parâmetros importantes e escreva uma função de transferência aproximada à resposta obtida na forma

$$\frac{\tilde{R}(s)}{\tilde{P}(s)} = \frac{K}{\tau s^2 + 2\zeta\tau s + 1}$$

4. Como um engenheiro de processo de uma corporação, você é atribuído uma unidade com uma reação química exotérmica. Com o objetivo de saber mais sobre a dinâmica do processo, você decide fazer uma mudança radical na variável de entrada, que é a temperatura do líquido de arrefecimento, de 10°C a 15°C . Assume-se que o reator está inicialmente em estado estacionário. Você obtém o gráfico mostrado na Figura 3 para a variável de entrada, que é a temperatura do reator (notar que a temperatura do reator está em $^\circ\text{F}$).
- (a) Qual é o valor do ganho do processo?
- (b) Qual é o valor de τ ?
- (c) Qual é o valor de ζ ?
- (d) Qual é a taxa de decaimento?

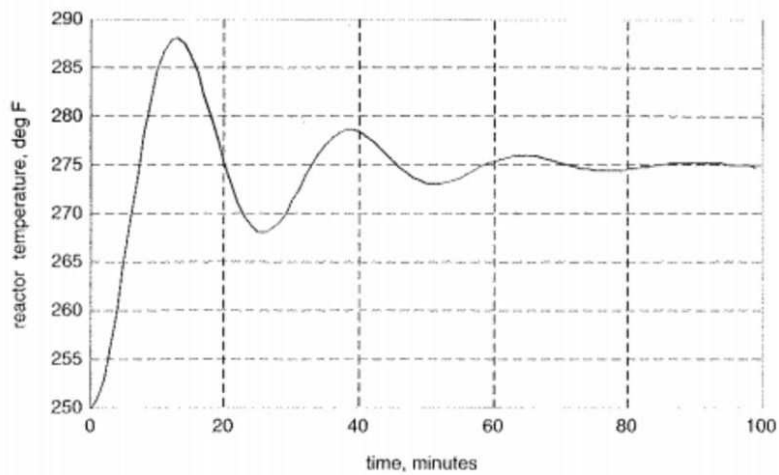


Figura 3: Resposta da temperatura do reator (em °F) ao degrau na temperatura do líquido de arrefecimento (em °C).

- (e) Qual é o período de oscilação?
- (f) Escreva a função de transferência de segunda ordem que caracteriza o sistema.

5. A forma realizável da função de transferência do controlador PD é dada por

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

em que $\alpha \in [0.05, 0.2]$.

- (a) Mostre como obter essa função de transferência a partir de um arranjo em paralelo de duas funções mais simples mostradas na Figura 4.
- (b) Encontre as expressões para K_1 , K_2 , e τ_1 em função de K_c , τ_D e α .
- (c) Verifique as relações encontradas para $K_c = 3$, $\tau_D = 2$ e $\alpha = 0.1$.

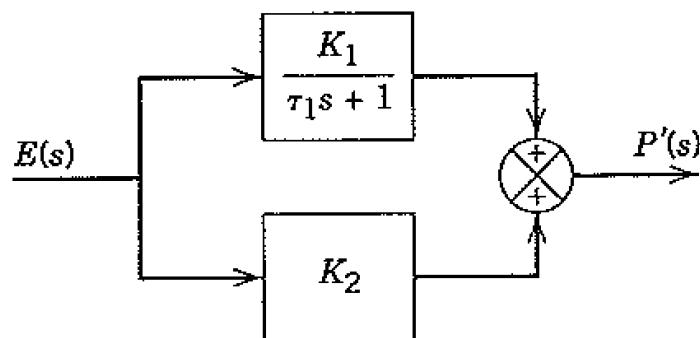


Figura 4: Diagrama de blocos.

6. Considere o sistema de controle de pressão mostrado na Figura 5. O transmissor de pressão, PT25, tem uma faixa de 0 a 100 psig. O controlador, PC25, é proporcional e sua referência (set point) é 10 psig. Obtenha a correta ação do controlador (ação

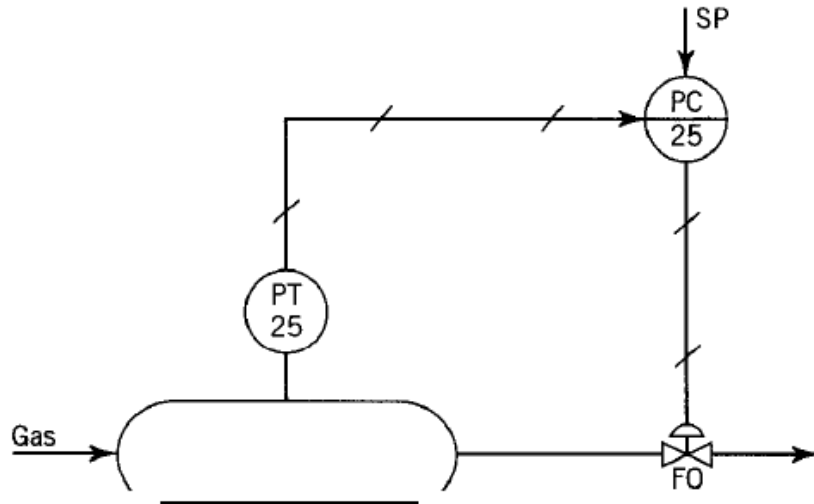


Figura 5: Sistema de controle de pressão.

direta ou reversa) e a banda proporcional necessária para que quando a pressão no tanque for 30 psig, a válvula esteja completamente aberta.

7. Uma malha de controle por realimentação é representada pelo diagrama de blocos da Figura 6. O processo pode ser representado por um atraso de primeira ordem e o controlador é proporcional-integral (PI):

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

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

Sem perda de generalidade, você pode considerar a constante de tempo do processo τ igual a 1 e o ganho do processo K igual a 1.

- Escreva a função de transferência de malha fechada e a equação característica da malha.
- Qual é o erro em estado estacionário para uma entrada degrau unitário na referência?
- Qual é o erro em estado estacionário para uma entrada rampa unitária na referência?
- Existe um ganho último para essa malha?

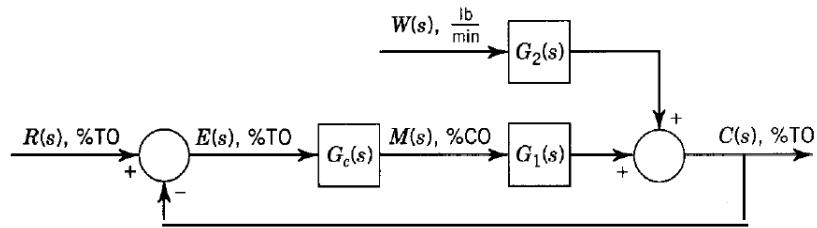


Figura 6: Diagrama de blocos.

8. É desejado controlar o nível do líquido h_2 no tanque 2 da Figura 7. Existem três alternativas para variável manipulada, F_1 , F_2 e F_3 .
- Desenhe o diagrama de blocos do sistema em malha fechada usando um controlador PI e F_1 , F_2 ou F_3 como variável manipulada.
 - Encontre as correspondentes respostas de malha fechada para variações de referência ou distúrbio.
 - Encontre a expressão geral para o ganho estático de malha fechada para cada um dos três casos.
 - Identifique as correspondentes funções de transferência de malha fechada para variações no set point (G_{SP}) e no distúrbio (G_D).

Assuma que as funções de transferência dos transmissores e das válvulas de controle são unitárias. Também assuma que o fluxo das correntes livres são funções lineares do nível e que são conhecidas as áreas A_1 e A_2 dos tanques 1 e 2.

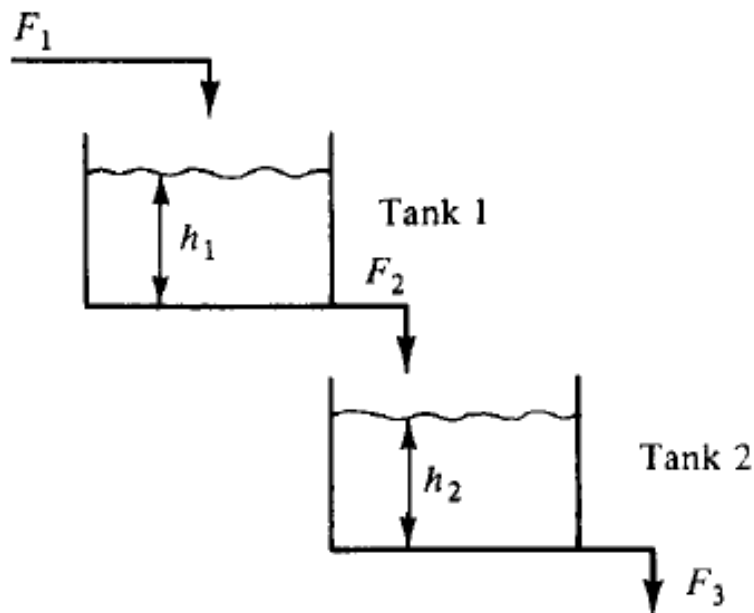


Figura 7: Tanques em série.

9. Repita o Problema 8 assumindo que um controlador proporcional é usado no lugar do PI e a função de transferência do transmissor de nível e da válvula de controle são dadas respectivamente por

$$G_m = K_m, \quad G_v = \frac{K_v}{\tau_v s + 1}$$

10. O diagrama de blocos de um sistema em malha fechada é mostrado na Figura 8

- (a) Encontre a função de transferência de malha fechada para variações no distúrbio, $Y(s)/D(s)$.
- (b) Para as seguintes funções de transferência, quais valores de K_c resultam em um sistema de malha fechada estável?

$$G_1(s) = 5, \quad G_2(s) = \frac{4}{2s + 1}, \quad G_3(s) = \frac{1}{s - 1}, \quad \text{e} \quad K_m = 1$$

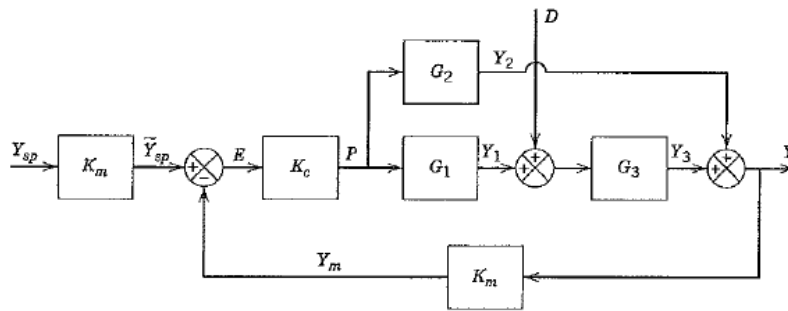


Figura 8: Diagrama de blocos.

11. O diagrama de blocos de um sistema de controle por realimentação é mostrado na Figura 9. Determine os valores de K_c que resultam em um sistema de malha fechada estável.

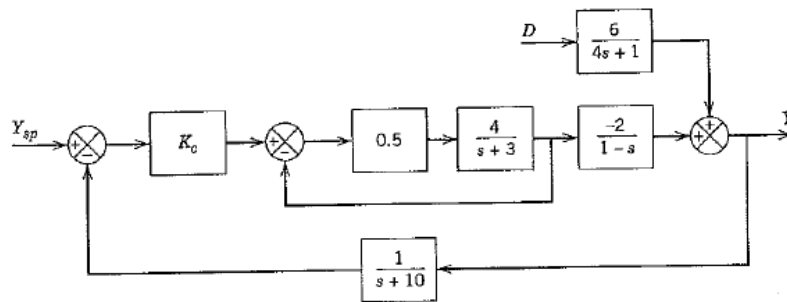


Figura 9: Diagrama de blocos.

12. Um processo é descrito pela função de transferência

$$G(s) = \frac{4(1 - 5s)}{(25s + 1)(4s + 1)(2s + 1)}$$

que inclui as dinâmicas dos atuadores e sensores. O grupo de engenheiros de processo tem a opção de reprojeter o processo para eliminar o zero no semiplano direito (SPD). Eles precisam determinar se essa modificação vai resultar em um processo controlado significativamente melhor (mais rápido).

- (a) Para um controlador proporcional, encontre os limites de estabilidade de K_c para o processo existente.
- (b) Repita o item (a) para o caso em que o zero no SPD é eliminado.
- (c) O que você pode dizer sobre a velocidade de resposta desse processo controlado se o zero no SPD for eliminado?

13. Considere o sistema de 1ª ordem com tempo morto com a seguinte função de transferência:

$$G_p(s) = \frac{10e^{-t_d s}}{s + 1}$$

O sistema é controlado com um controlador proporcional com ganho K_c .

- (a) Aproxime $e^{-t_d s}$ por uma aproximação de Padé de 1ª ordem e encontre a relação entre K_c e $t_d s$ que resulta em uma resposta de malha fechada estável.
- (b) Aproxime $e^{-t_d s}$ por uma aproximação de Padé de 2ª ordem e encontre a relação entre K_c e $t_d s$ que resulta em uma resposta de malha fechada estável.

Assuma que as funções de transferência do transmissor e do elemento final de controle são $G_m = G_v = 1$.

14. Desenhe o lugar geométrico das raízes para cada uma das seguintes funções de transferência de **malha aberta**.

(a) $G(s) = \frac{K}{s(s + 1)(4s + 1)}$

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

(c) $G(s) = K \left[1 + \frac{1}{\tau_I s} \right] \left[\frac{\tau_D s + 1}{\alpha \tau_D s + 1} \right]$

- (d) Considere os casos: (i) $\tau_i > \tau$; (ii) $\tau_i = \tau$; e (iii) $\tau_i < \tau$:

$$G_{MA} = K_c \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right) \left(\frac{1}{s(\tau s + 1)} \right)$$

15. Considere o diagrama de blocos mostrado na Figura 10 em que

$$G_p(s) = \frac{3}{(s + 2)(s + 6)}$$

Desenhe o lugar geométrico das raízes (LGR) do sistema $Y(s)/R(s)$ para $G_c(s) = k$, $k \in [0, \infty)$ informando o ângulo das assíntotas e o ponto de partida dos pólos quando o ganho estático do controlador for zero.

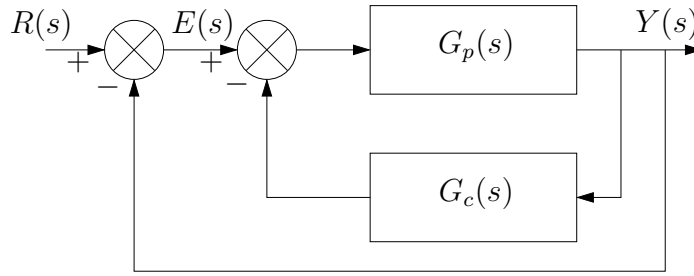


Figura 10: Diagrama de blocos do sistema em malha fechada.

16. Considere o sistema de controle mostrado na Figura 11. A pressão no tanque pode ser descrita por

$$\frac{P(s)}{F(s)} = \frac{0.4}{(0.15s + 1)(0.8s + 1)} \quad \text{psi/scfm}$$

A válvula pode ser descrita pela seguinte função de transferência

$$\frac{F(s)}{M(s)} = \frac{0.6}{0.1s + 1} \quad \text{scfm/\%CO}$$

O transmissor de pressão tem uma faixa de 0 a 185 psig. A dinâmica do transmissor é negligenciável.

- Desenhe o diagrama de blocos para esse sistema, incluindo todas as funções de transferência.
 - Esboce o lugar geométrico das raízes (LGR).
 - Determine o ganho do controlador no ponto de partida do eixo real.
 - Determine o ganho último e o período último.
 - Calcule o valor do ganho de um controlador P para obter um fator de amortecimento de 0.707 para as raízes dominantes.
17. Desenhe um esboço aproximado do lugar geométrico das raízes (LGR) para o sistema em malha fechada com as seguintes características:

$$G_p(s) = \frac{2(s + 1)}{s(s + 2)(s^2 + 1)}, \quad G_c(s) = K_c \quad \text{e} \quad G_m(s) = G_v(s) = 1$$

Utilizando a informação do LGR, esboce qualitativamente a resposta de malha fechada do processo a um degrau unitário na referência quando $K_c = 0$ e $K_c = 10$.

18. Um processo de troca de calor possui a seguinte função de transferência entre a temperatura T e o fluxo de entrada f , em que as constantes de tempo estão em minutos:

$$\frac{\tilde{T}(s)}{\tilde{F}(s)} = \frac{3(1 - s)}{s(2s + 1)}$$

Se o fluxo varia conforme uma senóide com amplitude de 2 L/min e período de 0.5 min, qual é a amplitude da temperatura em regime permanente?

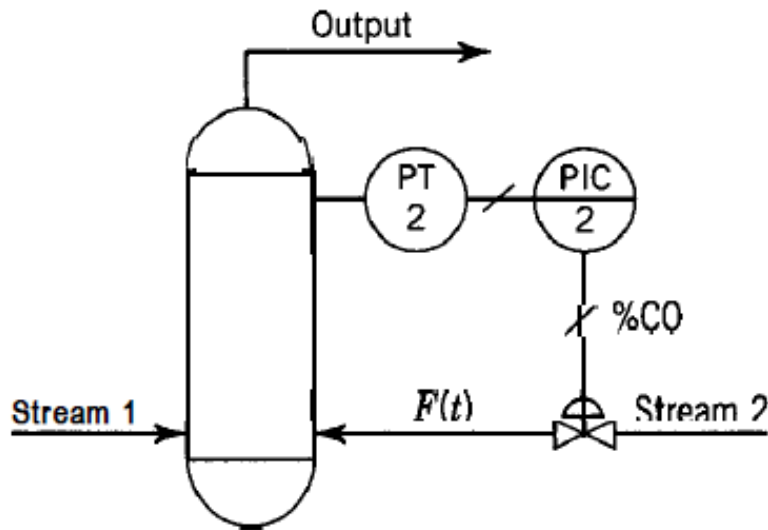


Figura 11: Sistema de controle de pressão.

19. Proponha um experimento de identificação de um processo por um modelo de primeira ordem por meio de aplicação de sinais senoidais na entrada (variável manipulada) e medição dos sinais na saída (variável medida). Considere que a planta tem comportamento linear e invariante no tempo. Como você obteria o ganho e a constante de tempo?
20. Desenhe as assíntotas dos diagramas de Bode de magnitude e esboce o diagrama de fase para as funções de transferência dadas no Problema 14.
21. Desenhe os diagramas de Bode para os sistemas com as seguintes funções de transferência:

$$(a) G(s) = \frac{10}{s(s+5)}$$

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

$$(c) G(s) = \frac{50}{(s+2)^2}$$

$$(d) G(s) = \frac{s-2}{(s+2)^2}$$

22. A partir do diagrama de Bode da Figura 12 abaixo responda:
 - (a) Determine as funções de transferências associadas aos diagramas de bode plotados na figura.
 - (b) Determine o valor de K_u (ganho ultimoativo) e P_u (período ultimoativo) que você usaria para projetar um controlador que fosse capaz de operar com ambos os sistemas sem instabilizá-los. Explique sucintamente dois métodos de ajustes de controladores que você conhece que estão baseados em K_u e P_u . Qual é a idéia por trás desses métodos? Quais são as semelhanças e diferenças entre esses

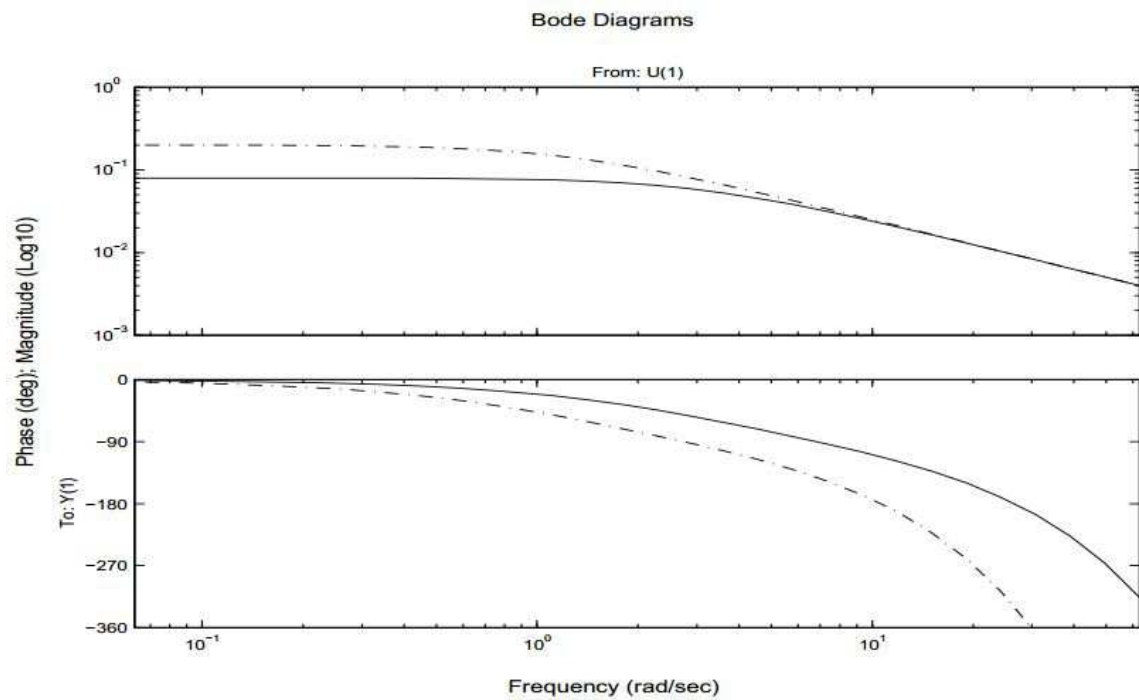


Figura 12: Diagrama de Bode do Exercício 22.

dois métodos? Por que os parâmetros K_u e P_u são informações importantes para o projeto do controlador. Justifique a sua resposta.

23. A partir do diagrama de Bode da Figura 13 responda:

- (a) Determine o valor de K_u e P_u para o sistema mostrado na figura abaixo.
- (b) Construa uma função de primeira ordem com tempo morto que possua o mesmo ganho, K_u e P_u que o sistema mostrado na Figura 13.
- (c) Plote no gráfico de bode acima a função de primeira ordem com tempo morto desenvolvida no item anterior. Você considera esta aproximação adequada para o projeto de controladores? Justifique a sua resposta.
- (d) Qual é a diferença entre K_u e Margem de Ganho (margem de ganho será abordado em aulas futuras).

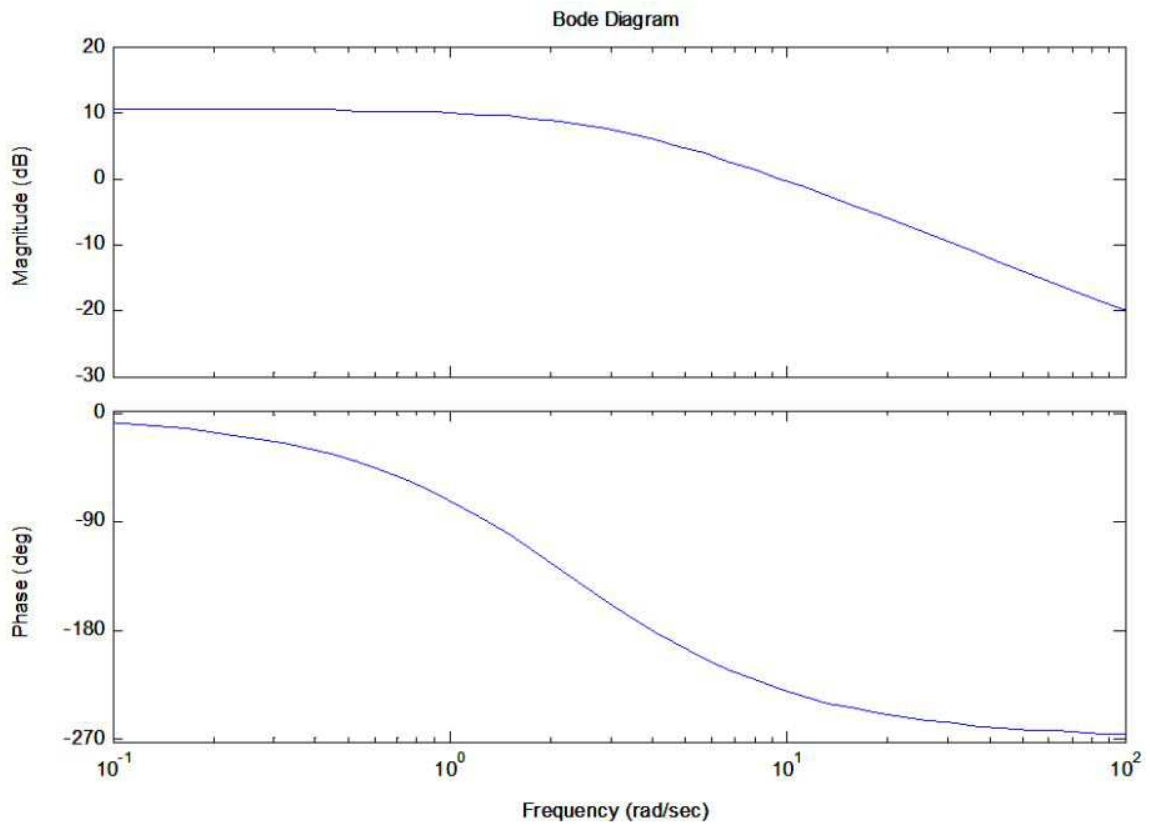


Figura 13: Diagrama de Bode do Exercício 23.

24. Resolva o problema abaixo.

A mixing process consists of a single stirred-tank instrumented as shown in Fig. E11.11. The concentration of a single species A in the feed stream varies. The controller attempts to compensate for this by varying the flow rate of pure A through the control valve. The transmitter dynamics are negligible.

- Draw a block diagram for the controlled process.
- Derive a transfer function for each block in your block diagram.

Process

- The volume is constant (5 m^3).
- The feed flow rate is constant ($\bar{q}_F = 7 \text{ m}^3/\text{min}$).
- The flow rate of the A stream varies but is small compared to \bar{q}_F ($\bar{q}_A = 0.5 \text{ m}^3/\text{min}$).
- $\bar{c}_F = 50 \text{ kg/m}^3$ and $\bar{c}_A = 800 \text{ kg/m}^3$.
- All densities are constant and equal.

Transfer Line

- The transfer line is 20 m long and has 0.5 m inside diameter.
- Pump volume can be neglected.

Composition Transmitter Data

| $c \text{ (kg/m}^3\text{)}$ | $c_m \text{ (mA)}$ |
|-----------------------------|--------------------|
| 0 | 4 |
| 200 | 20 |

Transmitter dynamics are negligible.

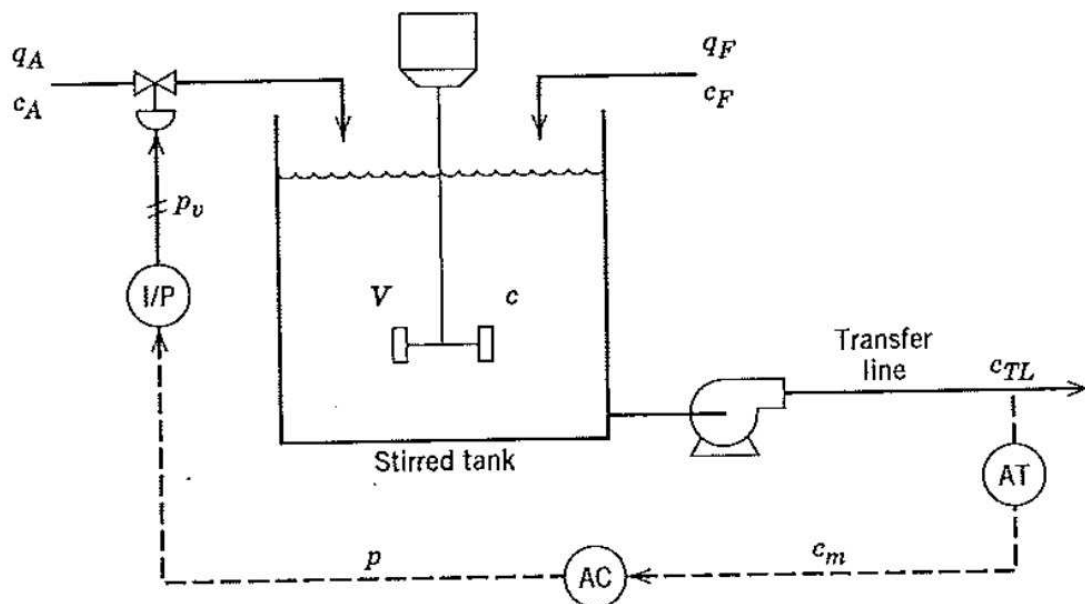
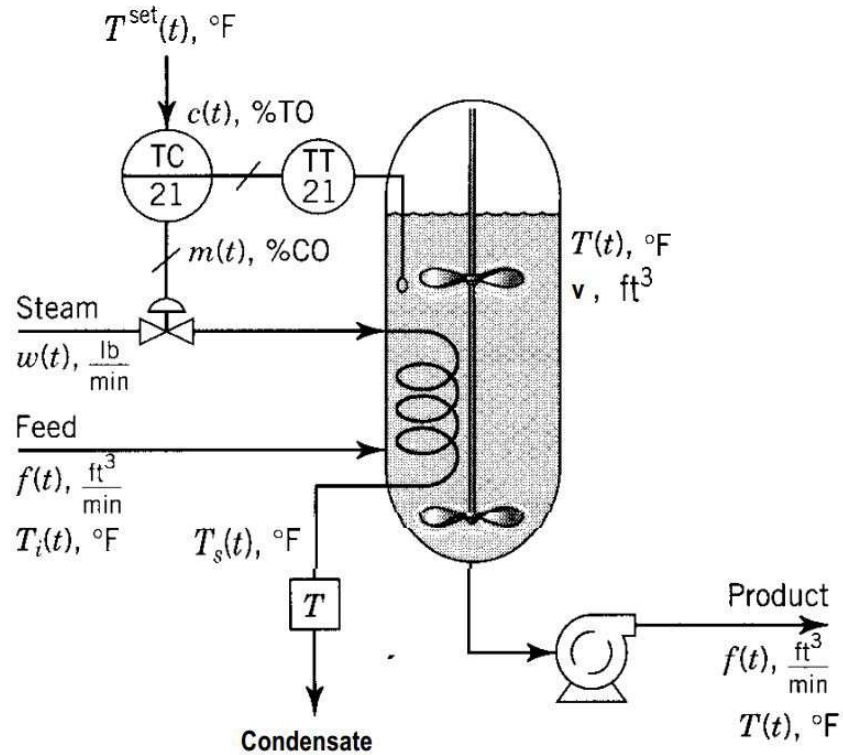


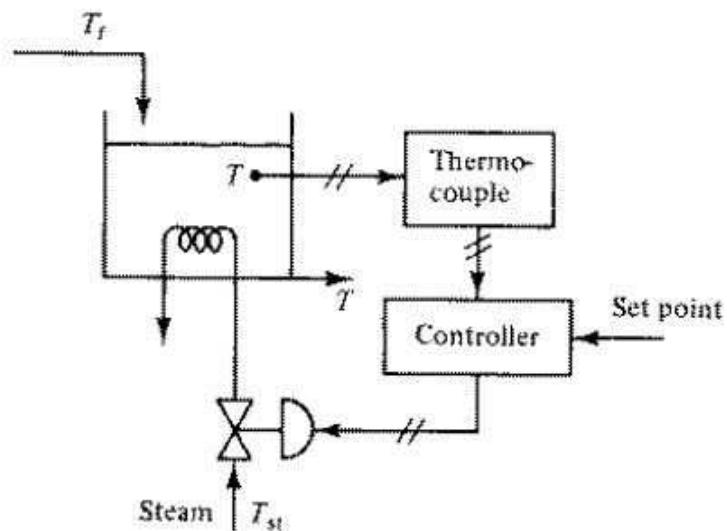
Figure E11.11

Figura 14: Exercício 24.

25. Desenhe o diagrama de blocos para os processos abaixo baseado no *conhecimento intuitivo* da influência entre as variáveis de processo.



Processo de controle de temperatura em que TT representa o transmissor de temperatura e TC o controlador de temperatura.



Processo de controle de temperatura em que *Thermocouple* é o sensor-transmissor de temperatura ao controlador.