# EXERCÍCIOS SUGERIDOS

## Cap.4: Projeto de compensadores no domínio do tempo (via LR)

**Obs.:**
Para os exercícios que envolvam um sistema de controle com realimentação unitária, favor adotar o seguinte diagrama de blocos como referência:

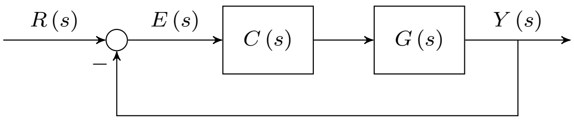
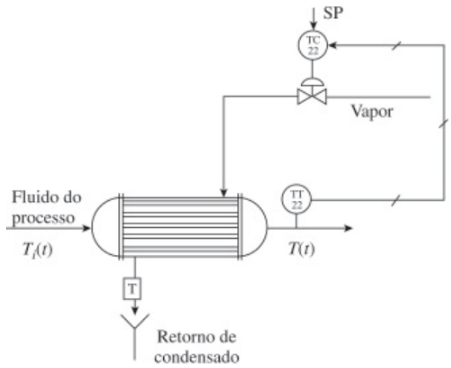



Figura 1
Sistema com compensação série e realimentação unitária

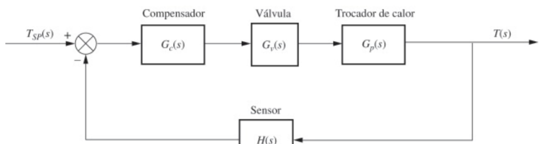
### – P –

1. ■ Para $C(s) = 1$ e $G(s) = \dfrac{K}{(s+3)(s+5)}$ no sistema da Figura 1, mostre que o sistema não é capaz de operar sob um tempo de acomodação de 2/3 s e um máximo sobressinal de 1,5% mediante o ajuste de um único parâmetro (neste caso, o ganho $K$).

2. ■ A figura abaixo exibe um processo térmico que utiliza um trocador de calor cujo objetivo é manter a temperatura de um líquido no valor desejado ($T_{SP}$). A temperatura é medida através de um sensor e um transmissor (TT 22), o qual disponibiliza o valor medido a um controlador correspondente (TC 22). O TC 22 compara a temperatura real com o valor desejado (*set point*). O controlador abre ou fecha automaticamente uma válvula para permitir ou evitar que o fluxo de vapor altere a temperatura no reservatório.




Em relação à disciplina "Sistemas de Controle", o diagrama de blocos correspondente é exibido abaixo.




Admitindo que $G_v(s) = \dfrac{0,02}{(4s+1)}$, $G_1(s) = \dfrac{70}{(50s+1)}$, $G_c(s) = K$ e $H(s) = \dfrac{1}{(12s+1)}$, determine o valor de $K$ que resultará em pólos dominantes com $\zeta = 0{,}7$. Nesta condição, estime o valor do tempo de acomodação $T_s$.

### – ATRASO –

3. Para o sistema realimentado da Figura 1 operando nas condições $C(s) = 1$, $G(s) = \dfrac{a}{(s+1)(s+3)(s+5)}$ e ultrapassagem máxima de 10%, responda os seguintes itens.
   (a) Determine os valores do ganho $a$ e da constante de erro estático apropriada ao sistema.
   (b) Substitua $C(s)$ por um compensador do tipo atraso de fase, determine os valores dos parâmetros $\alpha$, $K$ e $T$ de modo que a constante de erro estático seja igual a 4 sem alterar significativamente os pólos dominantes do sistema não-compensado.
   (c) Simule o sistema realimentado e verifique o desempenho do controlador projetado.

4. Repita o exercício 3 para $G(s) = \dfrac{a}{s(s+3)(s+5)}$.

5. Considere o sistema realimentado da Figura 1 no qual $G(s) = \dfrac{K}{(s+2)(s+4)(s+6)}$. Projete um compensador que torne $K_p = 20$, porém sem alterar significativamente a localização dos pólos dominantes que estão associados a MSS% $= 10\%$.

6. Para o sistema realimentado da Figura 1 na condição $G(s) = \dfrac{1}{s(s+5)}$, projete um compensador do tipo atraso de fase $C(s) = K\dfrac{(1+sT)}{(1+s\alpha T)}$ que contemple as seguintes especificações:
   - Pólos dominantes em malha fechada localizados em $s_{1,2} = -1 \pm j1$; e
   - Erro estacionário inferior a 2 para uma entrada em rampa unitária.

7. ■ Repita o exercício 6 considerando uma nova especificação de projeto: erro estacionário inferior a 0,2 para uma entrada em rampa unitária.

8. Considere $G(s) = \dfrac{1}{s(s+3)(s+6)}$ no sistema realimentado da Figura 1. Projete um compensador do tipo atraso de fase de forma que as seguintes especificações sejam atendidas: tempo de acomodação da resposta ao degrau unitário $<$ 5 s; máxima ultrapassagem da resposta ao degrau unitário $<$ 17%; e erro em regime inferior a 10% para entrada em rampa unitária.

### – PI –

9. Para o sistema realimentado da Figura 1 na condição $G(s) = \dfrac{90}{(s+1)(s+3)(s+10)}$:
   (a) projete um compensador do tipo PI $C(s) = (k_p + k_i/s)$ que contemple as especificações:
   - Erro estacionário nulo para entrada degrau unitário; e
   - Alteração do coeficiente de amortecimento para $\zeta = 0{,}5$.

   (b) Indique os valores dos parâmetros $k_p$ e $k_i$ ajustados no controlador PI obtido. Apresente também os valores da constante de erro de posição $K_p$ e do coeficiente de amortecimento $\zeta$ verificados antes e depois do uso da compensação PI no sistema.
   (c) Compare os dois diagramas LR obtidos antes e depois da adição do controlador PI.
   (d) Compare as respostas ao degrau unitário do sistema para ambos os casos do item "c".

10. ■ Se $G(s) = \dfrac{K}{s(s+2)(s+5)}$ no sistema realimentado da Figura 1, projete um controlador PI que anule o erro da resposta à rampa unitária para qualquer ganho $K$ que propicie a estabilidade do sistema em malha fechada.

11. ■ A temperatura (ambiente) de uma câmara refrigerada de 11 m$^2$ deve ser controlada variando-se a potência de um radiador interno. A função de transferência em malha aberta relacionando a potência do radiador, $\dot{Q}(s)$, com a temperatura real, $T(s)$, é dada por:

$$G(s) = \frac{T(s)}{\dot{Q}(s)} = \frac{(1 \cdot 10^{-6})\, s^2 + (1{,}314 \cdot 10^{-9})\, s + (2{,}66 \cdot 10^{-13})}{s^3 + 0{,}00163 s^2 + (5{,}272 \cdot 10^{-7})\, s + (3{,}538 \cdot 10^{-11})}.$$

Considerando que o sistema de controle correspondente seja semelhante ao da Figura 1, responda os itens a seguir.
   (a) Para uma entrada em degrau, calcule o valor do erro estacionário do sistema não-compensado.
   (b) Projete um controlador PI de modo que o erro em regime seja anulado para entradas do tipo degrau, sem alteração significativa da resposta transiente. (*Sugestão: posicione o zero do PI em um posição que não provoque alterações significativas nas localizações dos pólos em malha fechada no diagrama LR do sistema não-compensado.*)

---

## – AVANÇO –

12. Para o sistema realimentado da Figura 1 na condição $G(s) = \dfrac{K}{s(s+20)(s+40)}$, sabe-se que o sistema opera com máxima ultrapassagem de 20%. Para este sistema:
   (a) Indique os valores dos pólos dominantes, do ganho $K$ e do tempo de acomodação $T_s$ para o sistema não-compensado.
   (b) Projete um compensador avanço de fase que seja capaz de reduzir o tempo de acomodação pela metade e sem afetar o sobressinal percentual.
   (c) Em seguida, indique os novos valores verificados no sistema compensando para: os pólos dominantes; o ganho $K$; e o tempo de acomodação $T_s$.
   (d) Simule o sistema realimentado e verifique o desempenho do controlador projetado.

13. Projete um compensador avanço de fase para o sistema realimentado do exercício 1 de modo que, desta vez, sejam atendidas as características da resposta transiente mencionadas no mesmo exercício.

14. Para o sistema da Figura 1 com $G(s) = \dfrac{K}{(s+3)^3}$:
   (a) Determine a localização dos pólos dominantes que conduzem a um $T_s$ = 1,6 s e uma ultrapassagem máxima de 25%.
   (b) Se um compensador com um zero em $s = -1$ é utilizado para atender às condições do item "a", qual deve ser a contribuição angular do pólo do compensador?
   (c) Determine a localização do pólo do compensador.
   (d) Determine o ganho necessário para os requisitos do item "a" sejam atendidos.
   (e) Determine a localização dos demais pólos em malha do sistema compensado.
   (f) Verifique uma possível aproximação do sistema compensado por um de 2ª ordem.
   (g) Simule o sistema realimentado e verifique o desempenho do controlador projetado.

15. ■ Para $G(s) = \dfrac{K(s+6)}{(s+2)(s+4)(s+7)(s+8)}$ no sistema realimentado da Figura 1, responda os itens a seguir.
   (a) Esboce o diagrama lugar das raízes sem compensação.
   (b) Determine as coordenadas dos pólos dominantes para os quais $\zeta$ = 0,8.
   (c) Determine o ganho para o qual $\zeta$ = 0,8.
   (d) Se o sistema deve ser compensado de forma a exibir tempo de acomodação de 1 s e $\zeta$ = 0,8, determine a localização do pólo do compensador se o seu zero for posicionado em $s = -4{,}5$.

---

## – PD –

16. O sistema da Figura 1 com $G(s) = \dfrac{K(s+6)}{(s+2)(s+3)(s+5)}$ opera com coeficiente de amortecimento igual a 0,707 dos pólos dominantes. Projete um compensador do tipo PD de modo que o tempo de acomodação seja reduzido por um fator de 2. Compare o desempenho do sistema nos regimes transitório e permanente para a condição: sem compensação; e com a adição do controlador.

17. Em relação ao exercício 2, projete um compensador do tipo PD que resulte no $\zeta$ mencionado no exercício, porém com um tempo de acomodação 20% menor.

---

## – PID –

18. Para o sistema realimentado da Figura 1 com $G(s) = \dfrac{K}{(s+1)(s+4)}$, projete um controlador PID que resulte em erro estacionário nulo para entrada degrau, bem como um tempo de pico de 1,047 s e $\zeta$ = 0,8.

19. ■ Para $G(s) = \dfrac{K}{(s+4)(s+6)(s+10)}$ no sistema da Figura 1, projete um controlador que resulte no atendimento das seguintes especificações: MSS% = 25%; $T_s$ < 2 s; e erro estacionário nulo para entradas degrau e rampa.

---

## – AVANÇO-ATRASO –

20. Para $G(s) = \dfrac{K}{s(s+7)}$, o sistema realimentado da Figura 1 opera com máximo sobressinal de 20%. Para esta situação:
   (a) Calcule o tempo de acomodação do sistema.
   *$T_s$ = 1,143 s*
   (b) Calcule o erro em regime estacionário para uma entrada do tipo rampa unitária.
   *$e_r(\infty)$ = 0,1189*
   (c) Projete um compensador por atraso e avanço de fase para reduzir o tempo de acomodação pela metade e diminuir em dez vezes o erro estacionário para uma entrada do tipo rampa unitária. Posicione o zero do controlador em $s = -3$.
   $C(s) = 205{,}4 \dfrac{(s+3)(s+0{,}092)}{(s+9{,}61)(s+0{,}01)}$

21. Para $G(s) = \dfrac{K}{s(s+5)(s+11)}$ no sistema realimentado da Figura 1, responda os itens a seguir.
   (a) Determine o ganho $K$ para o sistema não-compensado opere com máxima ultrapassagem de 30%.
   (b) Determine o tempo de pico e a constante de erro de velocidade para o sistema não-compensado.
   (c) Projete um compensador do tipo avanço-atraso (de fase) para reduzir à metade os valores do tempo de pico e da máxima ultrapassagem apresentados pelo sistema. Além disso, deve-se produzir um erro estacionário 30 vezes menor. Especifique todos os pólos, zeros e ganhos.
   (d) Simule o sistema realimentado e verifique o desempenho do controlador projetado.