

### **Exercícios Sugeridos - Módulo 3**

#### **Parte I - Exercícios sugeridos de livros**

- ✓ Dorf, R. C., Bishop, R.H. **Sistemas de Controle Modernos**. 8ª edição, Ed. LTC, 2001.
- ✓ Franklin, G. Powell, J.D., Emami-Naeini, A. **Sistemas de Controle para Engenharia**, Bookman, 6ª ed. 2013;
- ✓ Ogata, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 4ª Edição, Ed. Pearson, 2003.

#### **Projeto de controladores baseados no Lugar das Raízes**

Franklin (Capítulo 5): Problemas 5.24 a 5.31, 5.34, 5.36 a 5.38 e 5.40.

Ogata (Capítulo 7): Problemas 7.1, 7.2, 7.12, 7.14, 7.16 a 7.18.

#### **Projeto de controladores baseados na Resposta em Frequência**

Franklin (Capítulo 6): Exercícios 6.49 a 6.54.

Ogata (Capítulo 9): Problemas 9.4 a 9.9.

#### **Projeto de controladores baseados no Lugar das Raízes e na Resposta em Frequência**

Dorf (Capítulo 10): Problemas P10.1 a P10.8, P10.12 a P10.16 e P10.29 a P10.30.

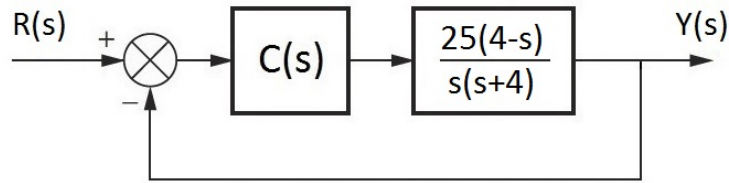
#### **Parte II - Exercícios de provas (com modificações)**

Recomendações para resolução dos exercícios:

- projetar controladores reais (fisicamente realizáveis) e de fase mínima;
- justificar a escolha do tipo de controlador projetado;
- descrever as etapas de projeto, justificando a escolha dos parâmetros adotados;
- não utilizar comparação direta de polinômios nas resoluções;
- a distância entre polo e zero do controlador deve ser limitada a 20 vezes.
- o cancelamento polo/zero poderá ser utilizado desde que dentro da região desejada para atender as especificações de desempenho.

Estas recomendações, provavelmente, serão utilizadas na 3ª avaliação.

1. Seja o sistema de controle abaixo.

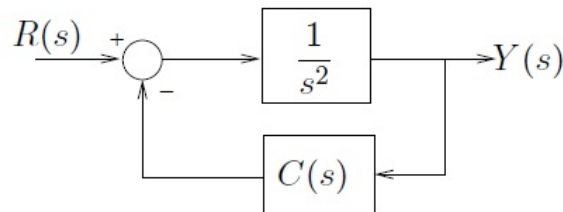


Deseja-se que a resposta do sistema atenda as seguintes especificações de desempenho:

- sobressinal menor do que 5%;
- tempo de acomodação não superior a 4 segundos;
- erro de rastreamento à entrada rampa inferior a 15%.

Projetar o controlador  $C(s)$ , baseado na resposta no tempo, de modo a atender todas as especificações. Esboçar a resposta ao degrau unitário para o controlador projetado. Comentar sobre o desempenho do controlador.

2. Seja o seguinte sistema de controle:



O controlador deve ter a seguinte forma:

$$C(s) = K \frac{s + b}{s + a}$$

Deseja-se garantir uma resposta ao degrau unitário com sobressinal menor do que 5% e tempo de acomodação não superior a 3 segundos. Além disso, o erro de regime permanente deve ser menor do que 20% (em módulo).

- Projetar o controlador  $C(s)$  para a atender as especificações de resposta transitória. Avaliar se as especificações serão, teoricamente, atendidas.
- O controlador projetado atende também a especificação de regime permanente? Em caso negativo, mostrar como esta especificação poderia ser alcançada (garantidas as especificações da resposta transitória).

3. Considere um sistema de controle com realimentação unitária cuja função de transferência do processo é dada por:

$$G(s) = \frac{5}{s(s^2 + 4s + 4)}$$

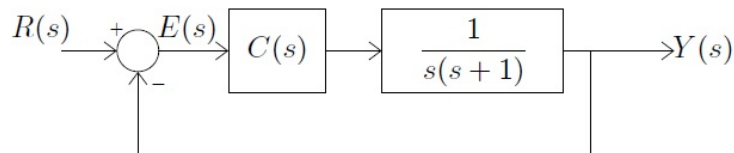
Deseja-se colocar um controlador  $C(s)$  em série com o processo de modo a atingir os seguintes objetivos:

- Erro de rastreamento a rampa menor ou igual a 20%;
- Margem de fase maior ou igual a 50°;

Responda as questões abaixo considerando a abordagem em frequência.

- É possível atingir estes objetivos apenas com um controle proporcional? Justificar a resposta.
- Projetar um compensador em atraso de modo que as duas especificações sejam satisfeitas. Mostrar que as especificações são atendidas.
- Suponha que se deseje também uma margem de ganho superior a 18dB. Calcular a margem de ganho do sistema compensado. Caso esta não seja satisfatória, explicar conceitualmente (sem calcular) como o projeto anterior poderia ser modificado de modo a obter a margem de ganho desejada garantindo o atendimento das demais especificações.

4. Seja o sistema de controle:



Deseja-se que a resposta do sistema atenda as seguintes especificações de desempenho:

- erro de rastreamento à rampa inferior a 10%;
- margem de fase superior a 60°;
- largura de faixa maior ou igual a 6 rad/s.

Projetar o controlador  $C(s)$ , baseado na resposta em frequência, que atenda a todas as especificações de desempenho. Mostrar que as especificações são realmente atendidas.

5. Considere um sistema de controle a realimentação unitária cuja função de transferência de malha aberta é  $C(s)G(s)$ , com

$$G(s) = \frac{2e^{-0,5s}}{s}$$

Deseja-se projetar um controlador  $C(s)$  de modo que:

- a margem de ganho seja igual ou superior a 10dB;
  - a margem de fase seja igual ou superior a  $70^\circ$ ;
  - o erro de rastreamento à entrada rampa unitária seja menor ou igual a 20%
- (a) Considerando  $C(s) = K_p$ , com  $K_p > 0$ , determinar a faixa de valores de  $K_p$  tal que ambas as especificações de margens de estabilidade sejam atendidas.
- (b) É possível satisfazer também a especificação referente ao erro com o controle proporcional? Caso não o seja, projetar um controlador de modo a satisfazer todas as especificações. Justificar a escolha do tipo de controlador e descrever a metodologia de projeto. Indicar as margens de estabilidade obtidas com o controlador projetado.

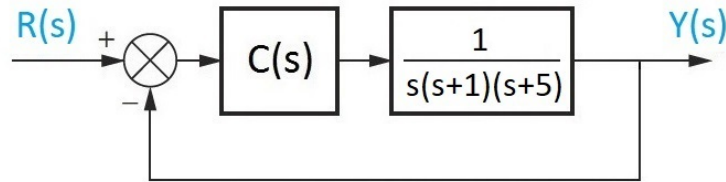
6. Considere um sistema de controle a realimentação unitária cuja função de transferência de malha aberta é dada por

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

Deseja-se projetar um controlador  $C(s)$  que, colocado em série com  $G(s)$ , seja tal que:

- a margem de fase seja igual ou superior a  $50^\circ$ ;
  - o erro de rastreamento à entrada rampa unitária seja menor ou igual a 10%
- (a) Esboçar os diagramas de Bode para  $G(j\omega)$ .
- (b) É possível satisfazer as especificações com um controlador proporcional ? Justificar a resposta.
- (c) Projetar um controlador que satisfaça as especificações.

7. Seja o sistema de controle representado na figura abaixo.



Deseja-se que a resposta ao degrau unitário atenda as seguintes especificações de desempenho:

- sobressinal menor do que 20%;
- tempo de acomodação não superior a 8 segundos.

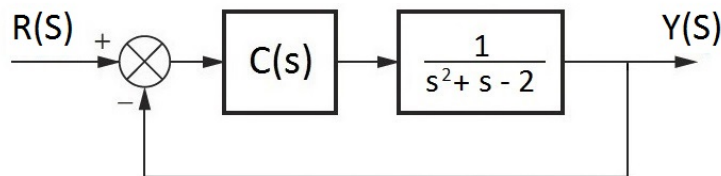
E ainda que o erro de rastreamento à entrada rampa unitária seja menor ou igual a 5%.

- (a) Projetar um controlador  $C(s)$ , baseado na resposta no tempo, de modo a atender todas as especificações de desempenho. O controlador deve ser do tipo avanço-atraso, com a estrutura definida a seguir.

$$C(s) = K \left( \frac{s + 1/T_1}{s + \beta/T_1} \right) \left( \frac{s + 1/T_2}{s + 1/\beta T_2} \right) \quad \beta > 1$$

- (b) É possível afirmar que as especificações são realmente atendidas com o controlador projetado? Justificar a resposta.

8. Seja o sistema de controle abaixo.

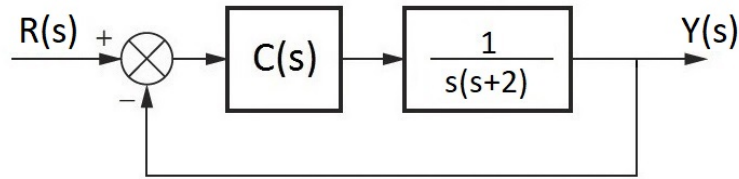


Deseja-se que a resposta do sistema atenda as seguintes especificações de desempenho:

- margem de fase igual ou superior a  $45^\circ$ ;
- erro de rastreamento à entrada degrau não superior a 10% (em módulo).

- (a) Projetar o controlador  $C(s)$ , baseado na resposta em frequência, de modo a atender todas as especificações de desempenho. Justificar a escolha do controlador e mostrar que especificações são realmente atendidas com o controlador projetado.
- (b) Se a especificação de margem de fase fosse aumentada para  $60^\circ$ , qual seria a solução mais simples para obtê-la?

9. Seja o sistema de controle abaixo.

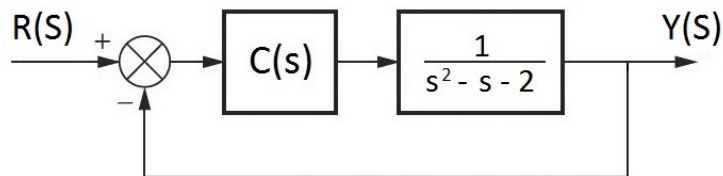


Deseja-se atender aos requisitos de desempenho a seguir:

- margem de ganho igual ou superior a 20dB;
- margem de fase igual ou superior a  $60^\circ$ ;
- erro nulo para entrada rampa unitária.

Projetar o controlador  $C(s)$ , baseado na resposta em frequência, para atender todas as especificações de desempenho. Mostrar que as especificações são realmente atendidas com o controlador projetado.

10. Seja o sistema de controle representado na figura abaixo.



Deseja-se que a resposta ao degrau unitário atenda as seguintes especificações de desempenho:

- sobressinal menor do que 10%;
  - tempo de acomodação inferior a 4 segundos.
- (a) Projetar um controlador  $C(s)$ , baseado na resposta no tempo, de modo a atender todas as especificações de desempenho. É possível afirmar que as especificações são realmente atendidas com o controlador projetado? Justificar a resposta.
- (b) Deseja-se agora que o erro de rastreamento (em módulo) à entrada degrau seja inferior a 10%. Considerando a solução mais simples possível, mostrar como esta especificação adicional poderia ser também atendida.

11. Considere um sistema de controle a realimentação unitária cuja função de transferência de malha aberta é dada por:

$$G(z) = \frac{0,5}{(z-1)(z-0,75)}$$

Para a obtenção do sistema discreto foi considerado  $T = 0,5$ .

- (a) Projete um controlador  $C(z)$  de modo que o sistema apresente em malha fechada um comportamento similar a um sistema analógico com sobresinal menor do que 10% e tempo de acomodação não superior a 8 segundos. Justifique a escolha do tipo de controlador e descreva detalhadamente as etapas do projeto. É possível afirmar que especificações são realmente atendidas com o controlador projetado? Justifique a resposta.
- (b) Suponha que seja acrescida ao problema uma especificação de erro de regime permanente devido a uma entrada rampa unitária inferior a 15%. É possível atender a essa especificação apenas ajustando o controlador já projetado? Justifique a resposta. Em caso negativo, projete um novo controlador, a ser inserido em série com o anterior, de modo que a especificação de erro também seja alcançada.

12. Considere um sistema de controle a realimentação unitária cuja função de transferência de malha aberta é dada por:

$$G(z) = \frac{0,2}{(z-1)(z-0,8)}$$

Para a obtenção do sistema discreto foi considerado  $T = 0,5$ .

- (a) Projetar um controlador discreto  $C(z)$ , em série com  $G(z)$ , de modo que o sistema apresente em malha fechada um comportamento similar a um sistema analógico com sobresinal menor do que 10% e tempo de acomodação não superior a 6 segundos. É possível afirmar que especificações são realmente atendidas com o controlador projetado? Justificar a resposta.
- (b) É possível ajustar o ganho do controlador projetado para atender uma especificação de erro de regime permanente à entrada rampa unitária inferior a 20%? Justificar a resposta. Em caso negativo, descrever detalhadamente como esta especificação adicional poderia ser satisfeita.