

Exercícios Sugeridos - Módulo 3

Parte I - Exercícios sugeridos de livros

✓ **Sistemas de Controle Modernos** (Dorf, 8ª edição)

Capítulo 8 - Métodos da Resposta em Frequência: E8.1 a E8.8 e P8.1 a P8.10.

Capítulo 9 - Estabilidade no Domínio da Frequência: E9.1 a E9.6, E9.12 a E9.13, E9.16 a E9.17, E9.24 a E9.28, P9.5, P9.7, P9.11 a P9.14.

Capítulo 10 - Projeto de Sistemas de Controle com Retoação: P10.13 a P10.16, P20.29 a P10.24 e P10.28 a P10.30.

✓ **Sistemas de Controle para Engenharia** (Franklin, 6ª edição)

Capítulo 6 - O Método de Projeto Baseado na Resposta em Frequência: 6.3 a 6.8, 6.11 a 6.13, 6.15, 6.18 a 6.21, 6.25, 6.33, 6.34, 6.36, 6.40 e 6.41, 6.49 a 6.54.

✓ **Engenharia de Controle Moderno** (Ogata, 4ª edição)

Capítulo 8 - Análise da Resposta em Frequência: B.8.8, B.8.10, B.8.17 a B.8.19, B.8.26 e B.8.29 a B.8.34

Capítulo 9 - Projeto de Controladores pela Resposta em Frequência: 9.4 a 9.9.

Parte II - Exercícios de provas (com adaptações)

Para a resolução dos exercícios de projeto de controladores considerar as mesmas restrições aplicadas anteriormente (2ª avaliação):

- deve ser **justificada a escolha** do tipo de controlador projetado;
- devem ser projetados **controladores reais** ($n \geq m$) e de **fase mínima**;
- devem ser descritas todas as etapas de projeto, **justificando a escolha dos parâmetros adotados**;
- nos projetos **não pode ser utilizado**: comparação direta de polinômios, métodos empíricos ou tentativa e erro;
- **não é permitido o uso de controladores adicionais** (pré-filtro e/ou ganho fora da malha);
- a **relação polo/zero** deve ser limitada a **20 vezes**;
- pode ser utilizado o **cancelamento polo/zero apenas dentro da região desejada** para atender as especificações de desempenho.

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

$$G(s) = \frac{5(2 - 20s)}{s(2 + 20s)(s^2 + s + 100)}$$

- (a) Traçar os diagramas de Bode de $G(j\omega)$. Determinar os valores (módulo e fase) reais e assintóticos nas frequências de corte e também nos limites $\omega = 10^{-2}$ e $\omega = 10^2$. Calcular a(s) frequência(s) e pico(s) de ressonância, caso existam. Indicar a inclinação das assíntotas. Descrever os procedimentos utilizados na obtenção dos valores indicados no gráfico.
 - (b) Calcular os valores das margens de estabilidade. O sistema é estável? Justificar a resposta.
 - (c) Esboçar a Carta de Nichols para $G(j\omega)$.
2. Seja um sistema de controle a realimentação unitária cuja função de transferência de malha aberta é dada por:

$$KG(s) = K \frac{s + 2}{(1 - s)[(s + 1)^2 + 1]}$$

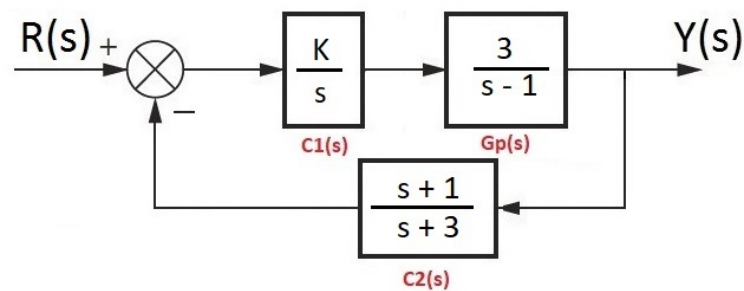
- (a) Esboçar o diagrama de Nyquist de $G(j\omega)$ em função da variação do ganho $-\infty < K < +\infty$. Determinar os valores de K para os quais o sistema é estável em malha fechada;
- (b) Para $K = -1,95$, esboçar a resposta ao degrau unitário do sistema em malha fechada. Justificar a forma do esboço.

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

$$KG(s) = \frac{0,1K(s+1)^2}{s^3}$$

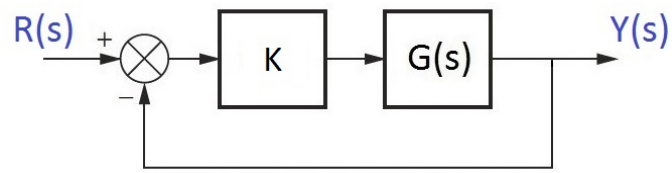
- Esboçar o diagrama de Nyquist. Explicitar parte real e parte imaginária de $G(j\omega)$, módulo e fase para as frequências de interesse ($\omega = 0$ e $\omega = \pm\infty$) e análise do comportamento em torno da origem.
- Usando o Diagrama de Nyquist, determinar a estabilidade do sistema em função da variação do ganho $-\infty < K < +\infty$. Indicar também para que valor(es) de K o sistema em malha fechada apresenta 1, 2 ou 3 pólos instáveis. Justificar as respostas.

4. Considere o sistema representado na figura abaixo.



Esboçar o diagrama de Nyquist para o sistema em função da variação do ganho $-\infty < K < +\infty$. Explicitar parte real e parte imaginária, módulo e fase para as frequências de interesse ($\omega = 0^\pm$ e $\omega = \pm\infty$) e cruzamentos com eixo real e imaginário. Explicitar a faixa de estabilidade do sistema.

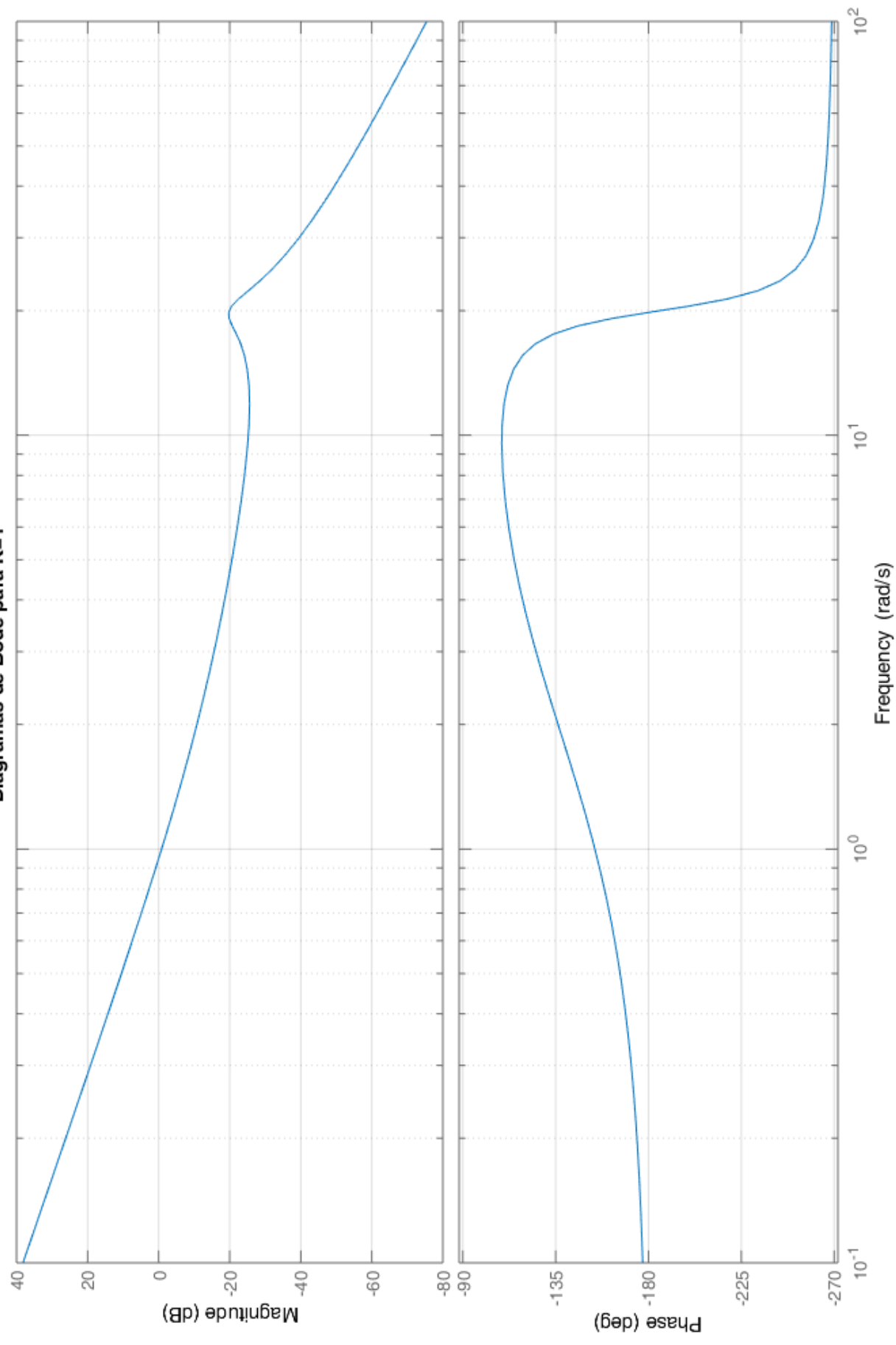
5. Considere um sistema de controle abaixo, sendo que $G(s)$ representa um sistema de fase mínima.



Considerando $K = 1$ obtém-se a resposta em frequência apresentada a seguir.

- (a) Qual o erro de regime permanente para uma entrada do tipo parábola unitária?
- (b) O ganho K poderia ser ajustado para garantir um erro de regime permanente inferior a 20%? Em caso afirmativo, determinar para que valores de K a especificação de erro poderia ser atendida.
- (c) Determinar a função de transferência $G(s)$ (aproximada). Apresentar resumidamente as considerações utilizadas na determinação da mesma.

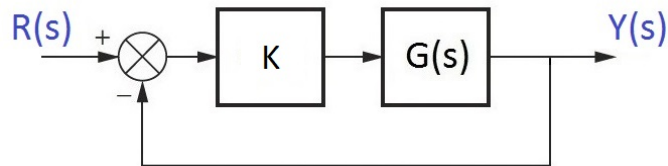
Diagramas de Bode para K=1



6. Seja um sistema de controle com realimentação unitária, cuja função de transferência de malha aberta é apresentada a seguir.

$$G(s) = \frac{4(s+1)^2}{s(s^2+36)}$$

- (a) Traçar os Diagramas de Bode para o sistema. Descrever o comportamento assintótico (inclinação das assíntotas e variação de fase). Indicar valores reais de módulo e fase para as frequências de corte e frequências limite do diagrama traçado.
- (b) Determinar, analiticamente, as margens de ganho e de fase do sistema. O sistema é estável em malha fechada? Justificar a resposta.
7. Considere o sistema de controle abaixo, sendo que $G(s)$ pode ser uma das três funções de transferência dadas seguir.

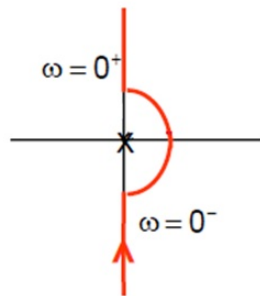


$$G_1(s) = \frac{1}{s(s-b)}$$

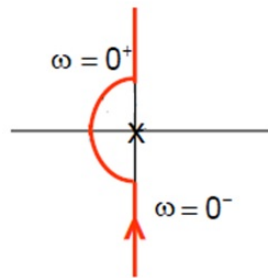
$$G_2(s) = \frac{1+bs}{s(s-a)}$$

$$G_3(s) = \frac{1}{s(as+1)(bs+1)}$$

A seguir são mostrados os Diagramas de Nyquist obtidos considerando uma das três funções (G_1 , G_2 ou G_3) e um dos seguintes contornos para o polo da origem:

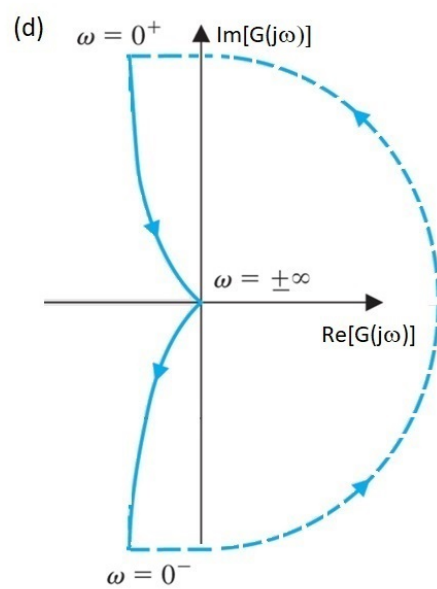
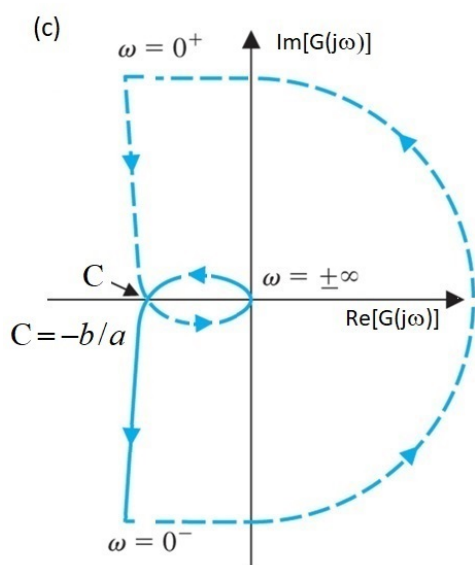
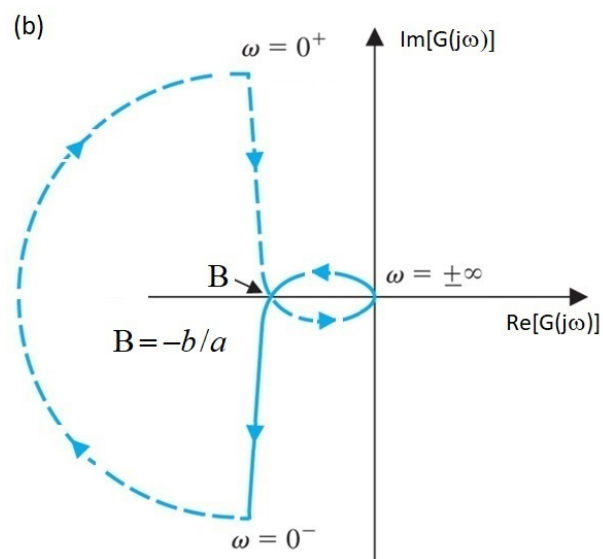
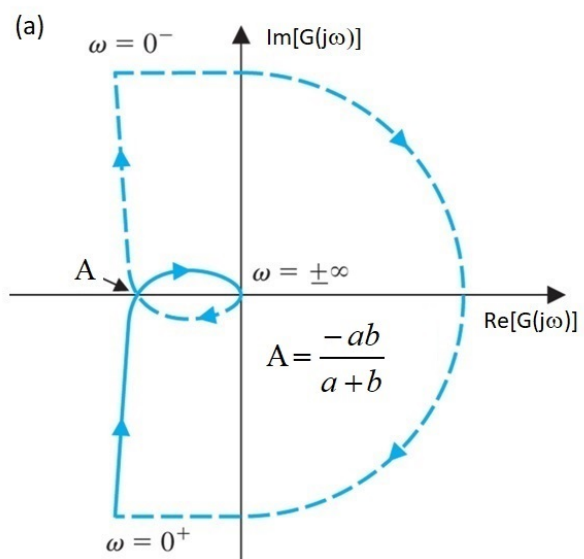


C.D. - Contorno pela direita
(sentido anti-horário)

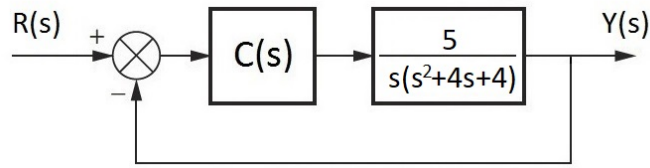


C.E - Contorno pela esquerda
(sentido horário)

Para cada um dos Diagramas de Nyquist (a, b, c, d), identificar qual a função de transferência considerada (G_1 , G_2 ou G_3), qual o tipo do contorno utilizado (CD ou CE) e analisar a estabilidade do sistema. Justificar as respostas.



8. Considere o sistema de controle abaixo.



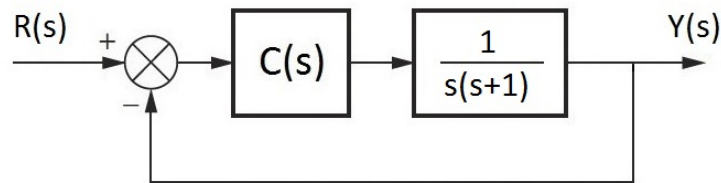
Deseja-se projetar um controlador $C(s)$ de modo a atingir os seguintes objetivos:

- Erro de regime permanente à entrada rampa unitária 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 controlador 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.

9. Seja o sistema de controle:

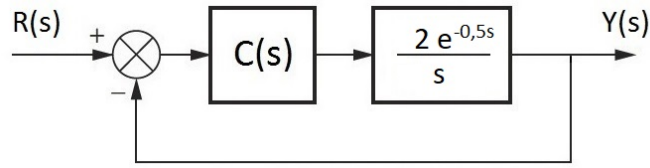


Deseja-se que a resposta do sistema atenda as seguintes especificações de desempenho:

- erro em regime permanente à entrada rampa unitária 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, para atender todas as especificações de desempenho. Mostrar que as especificações são realmente atendidas, indicando os valores obtidos para e_∞ , MF e ω_B .

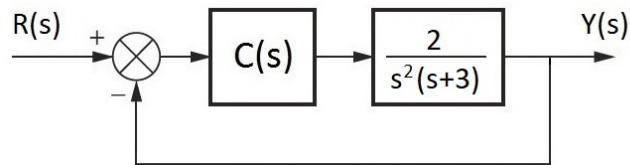
10. Considere o sistema de controle a seguir.



Deseja-se projetar um controlador $C(s)$ de modo a atender as seguintes especificações:

- margem de ganho igual ou superior a 10dB;
 - margem de fase igual ou superior a 70° ;
 - erro de regime permanente à entrada rampa unitária 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 os resultados obtidos com o controlador projetado (MG, MF e e_∞).

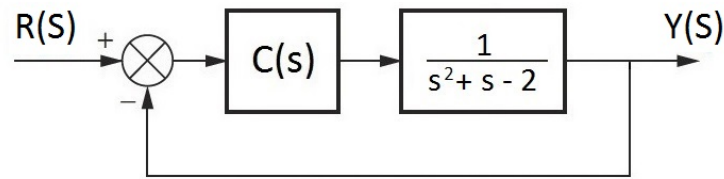
11. Considere o sistema de controle a realimentação unitária a seguir.



Deseja-se projetar o controlador $C(s)$ tal que:

- a margem de fase seja igual ou superior a 50° ;
 - o erro de regime permanente 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. Explicitar os valores obtidos de margem de fase e erro de regime permanente.

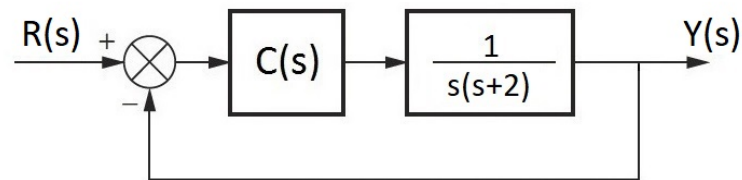
12. Seja o sistema de controle abaixo.



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

- margem de fase igual ou superior a 45° ;
 - 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° , qual seria a solução mais simples para obtê-la?
- (c) Projetar um controlador para atender as novas especificações: $MF \geq 60^\circ$ e $e_\infty < 10\%$.

13. 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° ;
- 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.