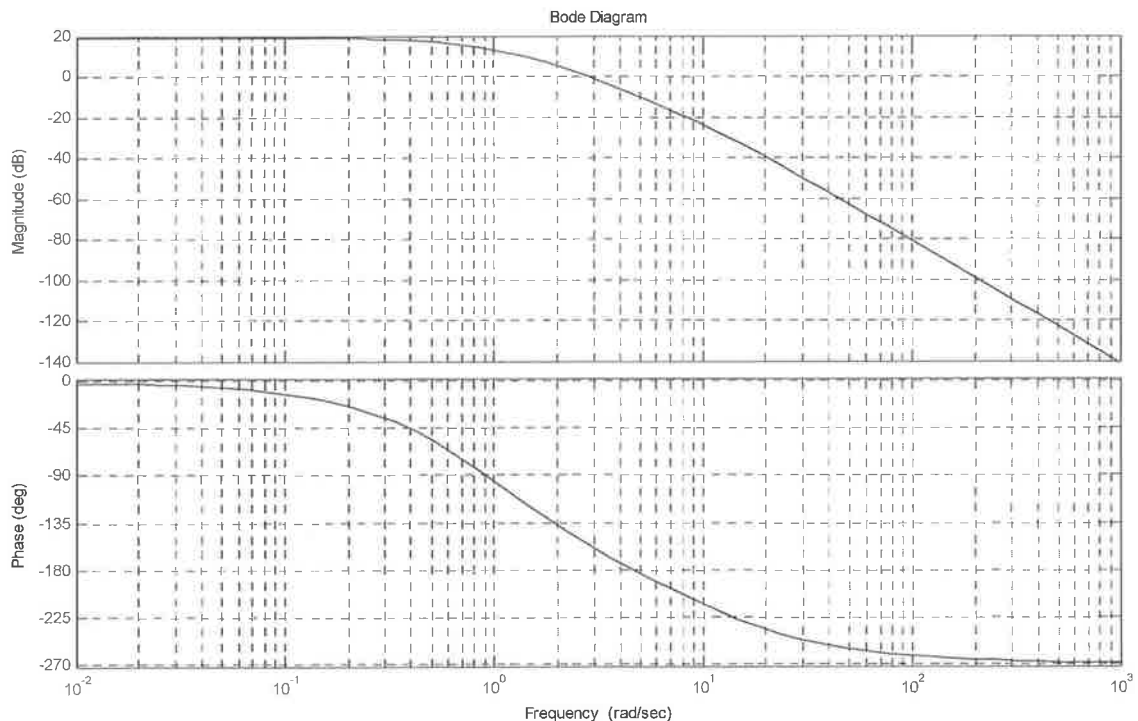


1) Dado um sistema G cujo gráfico de Bode em malha aberta é dado na figura abaixo.

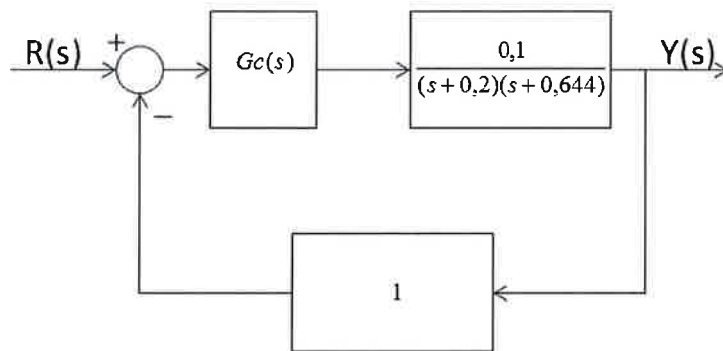
a) obtenha (a partir do próprio gráfico) a margem de ganho e de fase para este sistema. Esboce a resposta a uma entrada degrau unitário considerando-o em malha fechada, com realimentação unitária. Calcule o valor em regime para este caso.



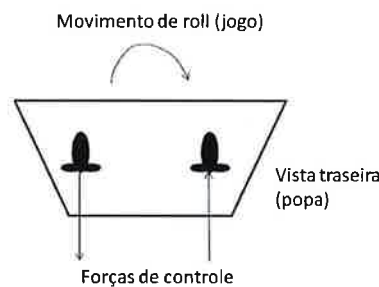
b) Projete um controlador para reduzir o erro em regime à entrada degrau para 1%, mantendo as propriedades da resposta transitória. Explique passo a passo o projeto, e esboce o diagrama de bode do controlador e da nova função em malha aberta.

c) Projete um controlador para garantir o mesmo erro em regime em malha fechada da função original, mas com margem de fase de 50° . Explique passo a passo o projeto, e esboce o diagrama de bode do controlador e da nova função em malha aberta.

2) (Adaptado de Castrucci et al., 2011) Projete um controlador $G_c(s)$ do tipo PI para que o sistema de controle abaixo apresente sobressinal de 20% à resposta degrau, fator de amortecimento de 0,45 e erro em regime nulo.



3) O jogo de um navio de recreação deve ser minimizado, a fim de garantir o conforto dos passageiros. Uma das técnicas que se está estudando para este fim, no laboratório TPN-USP em parceria com uma empresa incubada, é a utilização de propulsores gerando forças reativas para baixo e para cima, compensando tal movimento, como mostrado na figura abaixo.

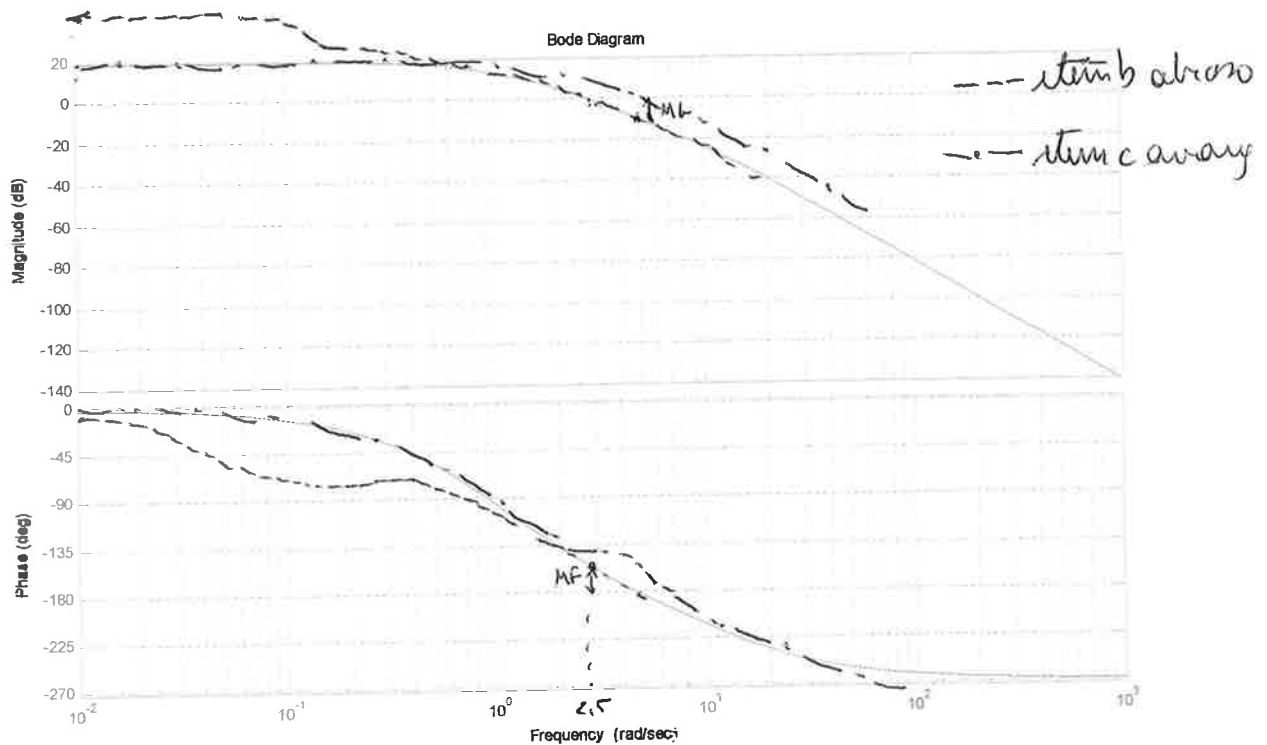


O modelo matemático obtido para um barco modelo (escala reduzida), sendo θ o ângulo de jogo (roll) medido por um inclinômetro e M o momento (binário) gerado pelos propulsores de controle é:

$$30 \ddot{\theta} + 100 \dot{\theta} + 2500 \theta = M$$

Projete um sistema de controle por realimentação $M(\Theta(s))$ que garanta que o sistema em malha fechada apresente fator de amortecimento de 0,7 e frequência natural de 12rad/s. A escolha destes parâmetros não é foco do presente problema, mas advém da necessidade de fazer o sistema responder pouco às ondas incidentes.

1



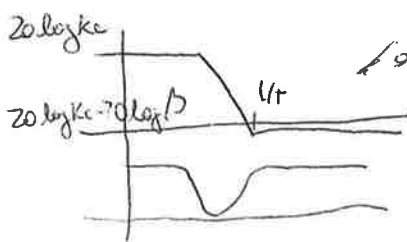
a) $MF \approx 23^\circ$
 $MC \approx 10 \text{ dB}$
 $\lim_{s \rightarrow 0} G(s) \approx 19 \text{ dB} \Rightarrow 9 \Rightarrow \lim_{s \rightarrow 0} \frac{B(s)}{1+B(s)} = 0.9 \Rightarrow \text{erro em regime} = 0.1$



b) $\lim_{s \rightarrow 0} \frac{G(s)G_c(s)}{1+G(s)G_c(s)} = 0.99 \Rightarrow \frac{9K}{1+9K} = 0.99 \Rightarrow K = 11$

$$G_c(s) = 11 \cdot \frac{1+sT}{1+\beta sT}$$

ideia usar o ganho em l.f. de compensador para abrandar mantendo as propriedades em h.f.



alternativa

$\Rightarrow \beta = K = 11$
 $\frac{1}{T} = \frac{1}{10} \cdot 2.5 = 0.25 \Rightarrow T = 4$

$\Rightarrow G_c(s) = 11 \cdot \frac{1+4s}{1+44s}$

c) $MF_{nova} = 50^\circ \Rightarrow \text{amplitude } 27^\circ + 6^\circ = 33^\circ \Rightarrow \sin 33^\circ = \frac{1-d}{1+d} \Rightarrow d = 0.13$

Nova $\omega_c \Rightarrow \omega$ em que ganho $20 \log \frac{1}{\sqrt{2}} = -3.2 \text{ dB} \approx -4 \text{ dB}$

$\Rightarrow \frac{1}{\sqrt{2} \cdot T} = 4 \Rightarrow T = 0.45 \Rightarrow$

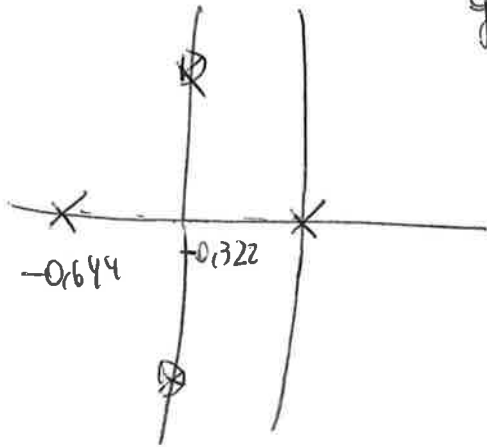
$$G_c = \frac{1+0.45s}{1+0.13s} \leftarrow \text{avanzado}$$

2) Polos desejados: $s = -0,322 \pm 0,63j$

como a planta não integrada deve-se introduzir o PI do tipo

$$G_c(s) = K_P \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \Rightarrow G_{ma}(s) = K_P \left(\frac{s + 1/T_i}{s} \right) \cdot \frac{0,1}{(s+0,2)(s+0,644)}$$

Supondo $\frac{1}{T_i} = 0,2 \Rightarrow T_i = 5$, cancela-se o zero e polo em M_a , e o L.R. resulta que para sobre os polos desejados p/ K_P tal que satisfaça a condição de módulo



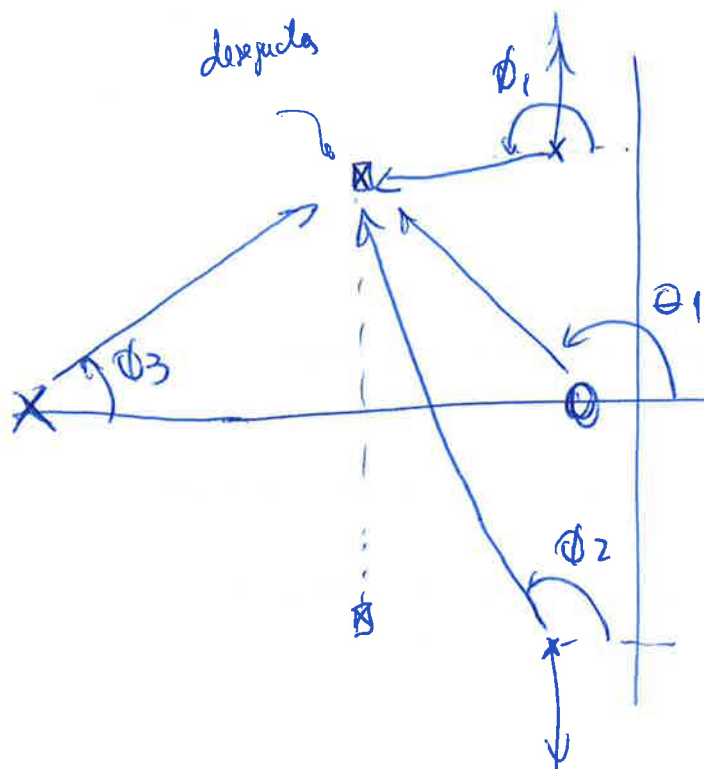
$$\left| \frac{K_P \cdot \frac{0,1}{s + 0,644}}{s} \right|_{s = -0,322 + 0,63j} = 1$$

$$\Rightarrow K_P = 5 \Rightarrow \boxed{G_c(s) = 5 \left(1 + \frac{1}{5s} \right)}$$

$$3) \quad \frac{\Theta(s)}{U(s)} = \frac{1}{30s^2 + 100s + 2500}$$

$$\text{polo MA} = -1,67 \pm 8,9j$$

$$\begin{aligned} \text{polos de p.p.} &= 12\left(\frac{\sqrt{2}}{2} \pm \frac{\sqrt{2}}{2}j\right) = \\ &= -8,5 \pm 8,5j \end{aligned}$$



Controlador de avanço

$$K_c \left(\frac{1+sT}{1+sT'} \right)$$

$$\phi_1 \approx 180^\circ$$

$$\phi_2 = 111^\circ$$

$$\Rightarrow \theta_1 - \phi_3 = 111^\circ$$

fixando polo controlado em -60

$$\Rightarrow \phi_3 = 10^\circ$$

\Rightarrow zero controlado em -3,3

$$\Rightarrow G_c = K_c \left(\frac{s+3,3}{s+60} \right)$$

K_c obtido por

$$K_c \cdot \frac{s+3,3}{s+60} \cdot \frac{1}{30s^2 + 100s + 2500} \bigg|_{s = -8,5 \pm 8,5j} = 1 \Rightarrow K_c = 2 \cdot 10^4$$