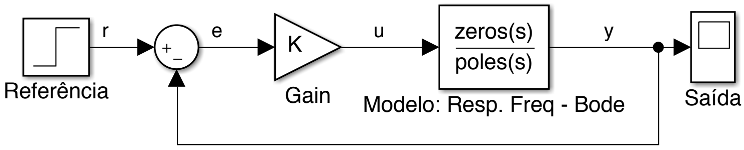
ENE/FT/UnB
Departamento de Engenharia Elétrica
Faculdade de Tecnologia
Universidade de Brasília
Prof. Adolfo Bauchspiess

Prova individual, sem consulta.
Só é permitido o uso de ***calculadora científica básica****.*
(Números complexos & funções trigonométricas)
Auditório FT, 31/10/2018, 16^{00}-18^{30}

2ª Prova - CONTROLE DINÂMICO - 2°/2018

1ª Questão (2,0) O diagrama de Bode de um sistema, que possui um polo no semi-plano direito, em malha aberta, é mostrado no caderno de respostas. O objetivo desta questão é projetar um controle proporcional.

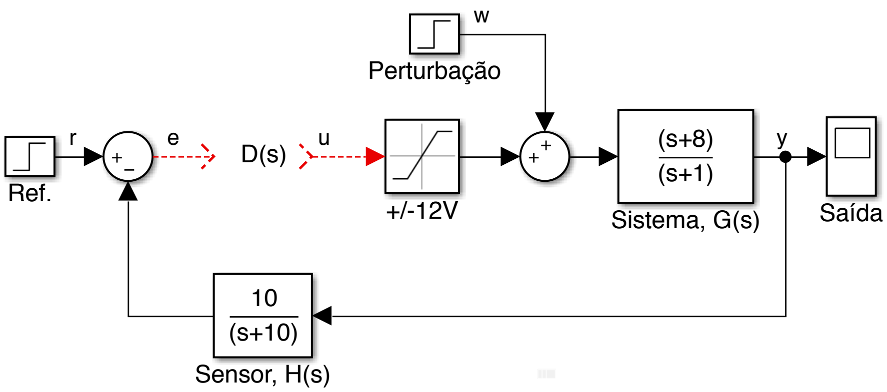


a) (1,0) Para quais valores de $-\infty \leq K \leq \infty$, este sistema é estável (Nyquist)?
b) (0,5) Qual valor de K se obtem a maior Margem de Fase possível? MF_{max} = ?
c) (0,5) Para o valor de K do item b), qual o erro em regime permanente (rampa)?

2ª Questão (3,0) Utilizando o mesmo diagrama de Bode da Questão 1 (Caderno de Respostas), projete um controlador dinâmico, $D(s)$, para que o sistema apresente em malha fechada:
- Erro em regime permanente (rampa), $e_{ss} \leq 0{,}01$;
- Sobrepasso percentual da resposta ao degrau, $M_p \leq 16\%$.

a) (0,5) Qual o ganho em baixas frequências para que seja atendida a especificação de erro?
b) (0,5) Calcule o avanço de fase necessário, considerando uma tolerância, $\phi_{tol} = 10°$.
c) (0,5) Para contrapor o ganho do compensador em avanço, obtenha ω_m, a frequência central de $D(s)$ tal que $|D(j\omega_m)|_{dB} = -|KG(j\omega_m)|_{dB}$. (frequência em que se medirá a nova MF).
d) (1,0) Complete o projeto, calulando K, z e p. $D(s) = \frac{K(s+z)}{s+p}$.
e) (0,5) Qual a Margem de Fase efetivamente obtida?

3ª Questão (5,0) Considere o projeto de um controlador D(s), no LGR, para o seguinte sistema.



Especificações:

i) *Sobrepasso percentual*, $M_p \leq 16\%$.
ii) *Tempo de acomodação*, $t_{s(2\%)} \leq 1\ s$.
iii) *Tempo subida*, $t_{r(10\text{-}90\%)} \leq 0{,}18\ s$.
iv) $|e_{ss}| \leq 0{,}01$ *para rampas de perturbação unitárias.*

a) (0,5) Calcule a posição dos polos dominantes, s_0, que atenda às especificações transistórias, considerando em especial, que a saturação limita a amplitude de u.
b) (0,5) Calcule a fase que falta para que o LGR passe por s_0. (inclua, se for o caso, 1/s)
c) (0,5) Escolha a estrutura do controlador dinâmico (P,PD,PI,PID). Justifique.
d) (2,0) Projete $D(s)$, para atender às especificações transitórias (i, ii e iii).
e) (0,5) Com $D(s)$, qual o erro em regime permanente para uma rampa unitária de perturbação?
f) (0,5) Acrescente, se necessário, um compensador em atraso, para atender iv.
g) (0,5) Para o controlador projetado, considerando o Teorema do Valor Inicial, qual a amplitude máxima de um degrau em r que não haja saturação do sinal u?

$MF \cong 100\,\zeta$; Z = N + P → N Env. Horários

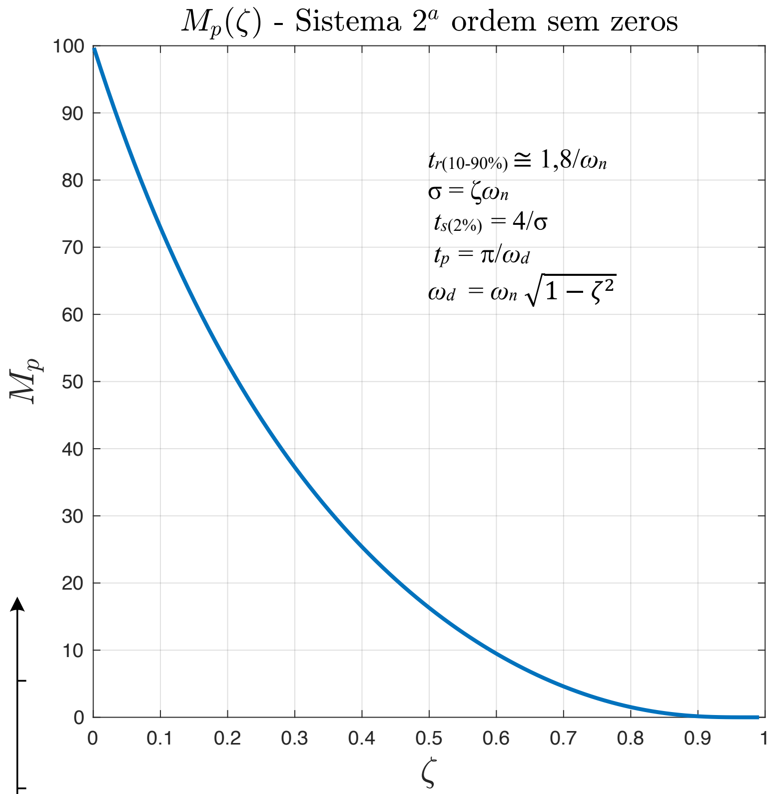
$$D(s) = K\frac{Ts+1}{\alpha Ts+1} = K'\frac{s+z}{s+p}$$

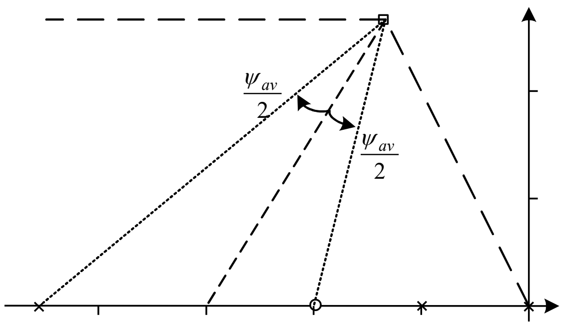
$$\frac{1}{\alpha} = \frac{p}{z} = \frac{1+sen\phi_m}{1-sen\phi_m} \quad fator\ de\ avanço$$

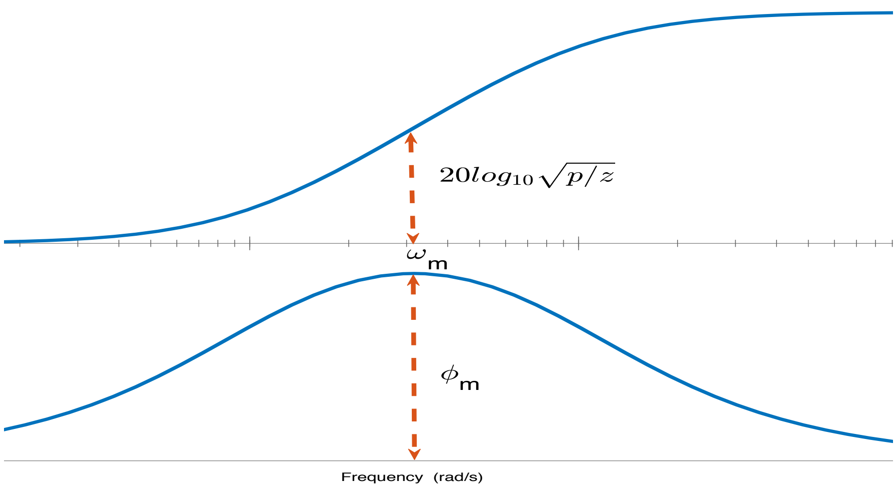
$$max\angle D(j\omega) = \angle D(j\omega_m) = \phi_m$$

$$\omega_m = \sqrt{pz} = \frac{1}{\sqrt{\alpha}T};\quad |D(j\omega_m)| = \sqrt{p/z}$$

$$x(0^+) = \lim_{t\to 0^+} x(t) = \lim_{s\to\infty} sX(s)$$



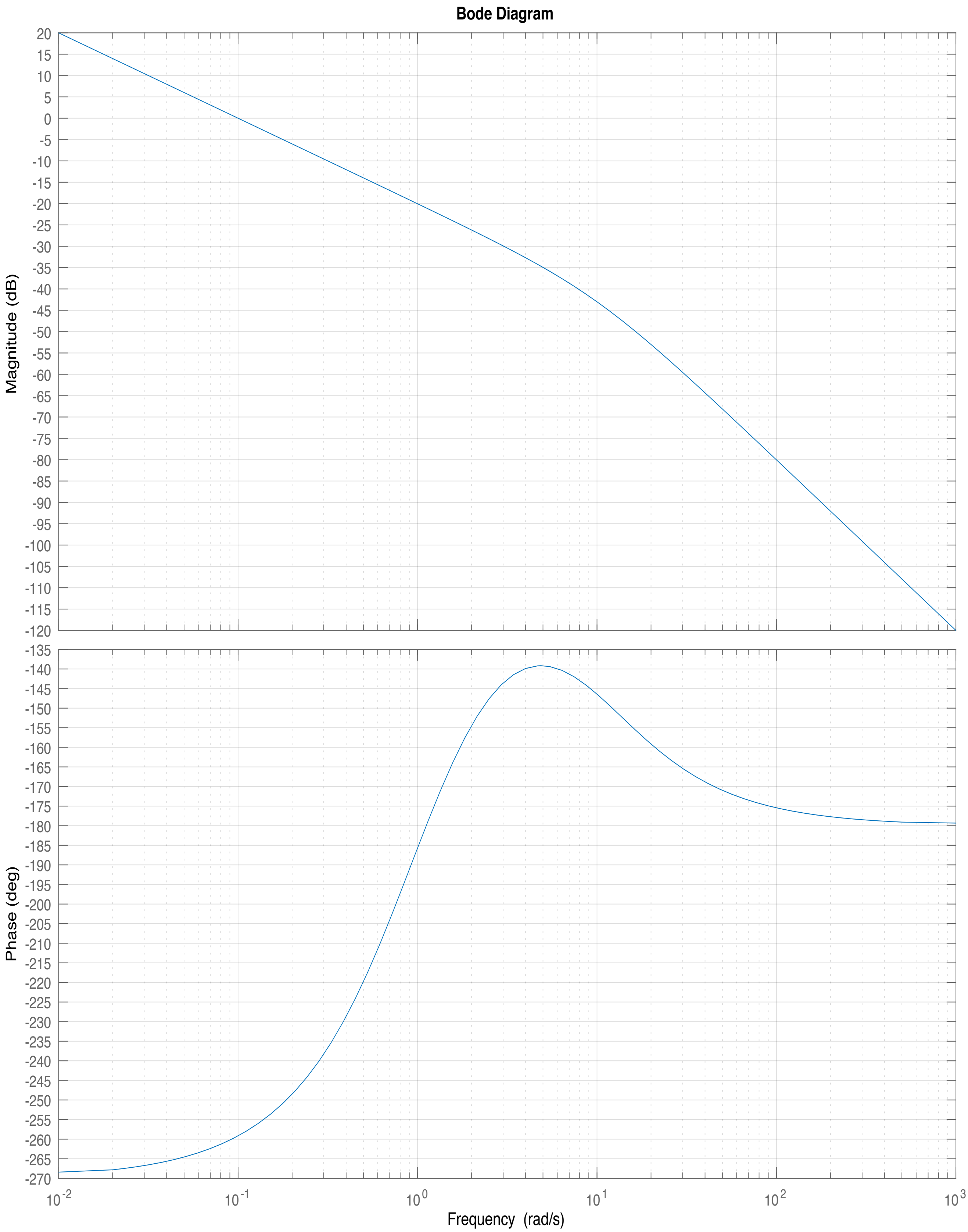




Nome: ____Matrícula: _____________ Curso: Eng. ________________

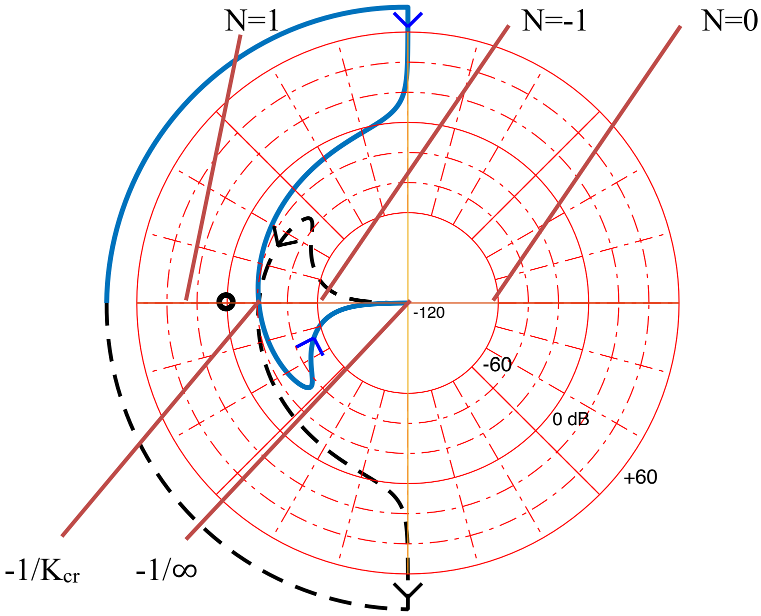
A resolução das questões, **organizada de forma clara e objetiva**, nas páginas anexas, **é considerada na correção**. **Transcreva aqui**, as respostas finais. ***Não separar***, por favor, ***as folhas*** deste caderno de repostas!!

CADERNO DE RESPOSTAS



GABARITO

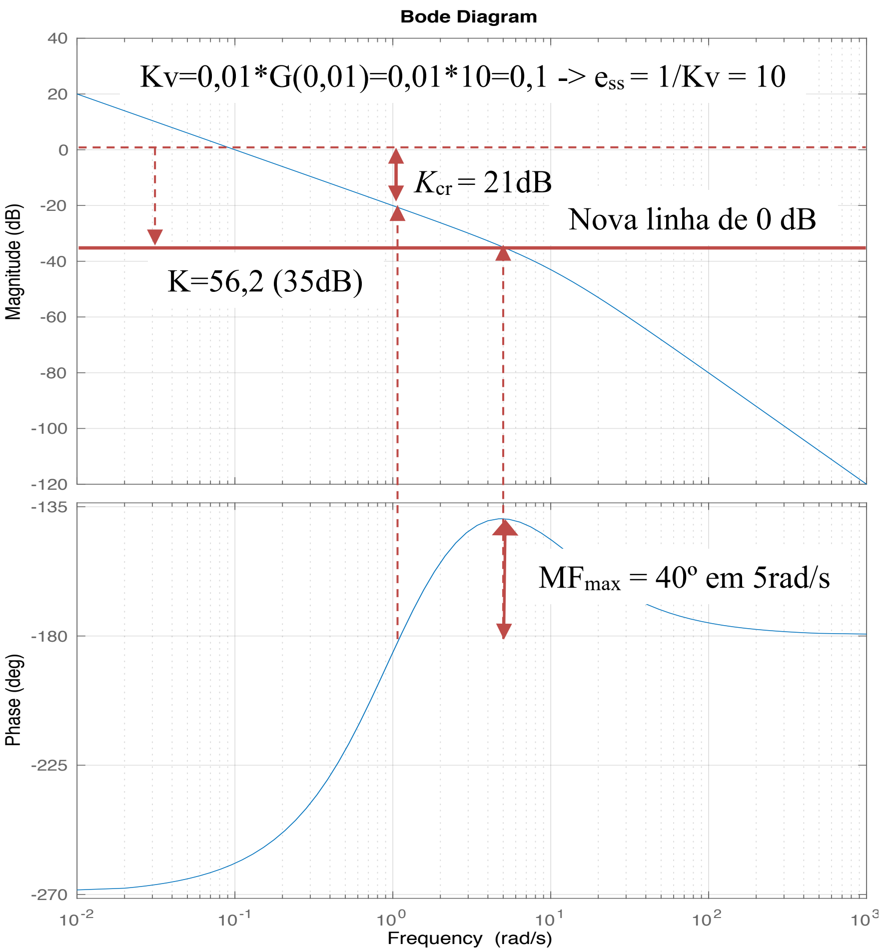
1ª Questão (2,0)



a) (1,0) O sistema é estável para $K_{cr} < K < \infty$. -1/Kcr = -0,0891. $\boxed{11,22 < K < \infty}$.
(Instável para $-\infty < K < 11,22$).

b) (0,5) Maior Margem de Fase possível ocorre para $\boxed{K = 56,2. \quad MFmax = 40^o}$.

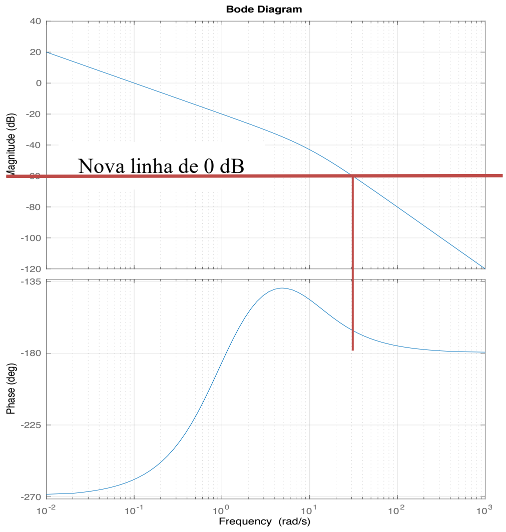
c) (0,5) Medindo em 0,01 rad/s. Kv = 0,01*G(0,01) = 0,01*10^(55/20) = 5,623 → $\boxed{e_{ss} = 1/Kv = 0,1778}$



2ª Questão (3,0)

a) (0,5) $e_{ss} = 0{,}01 \rightarrow$ Kv = 100 (40 dB).
Medindo em 1 rad/s (reta!) temos atualmente -20 dB (0,1).

Ganho deve ser de $\boxed{1000\ (60\ \text{dB})}$



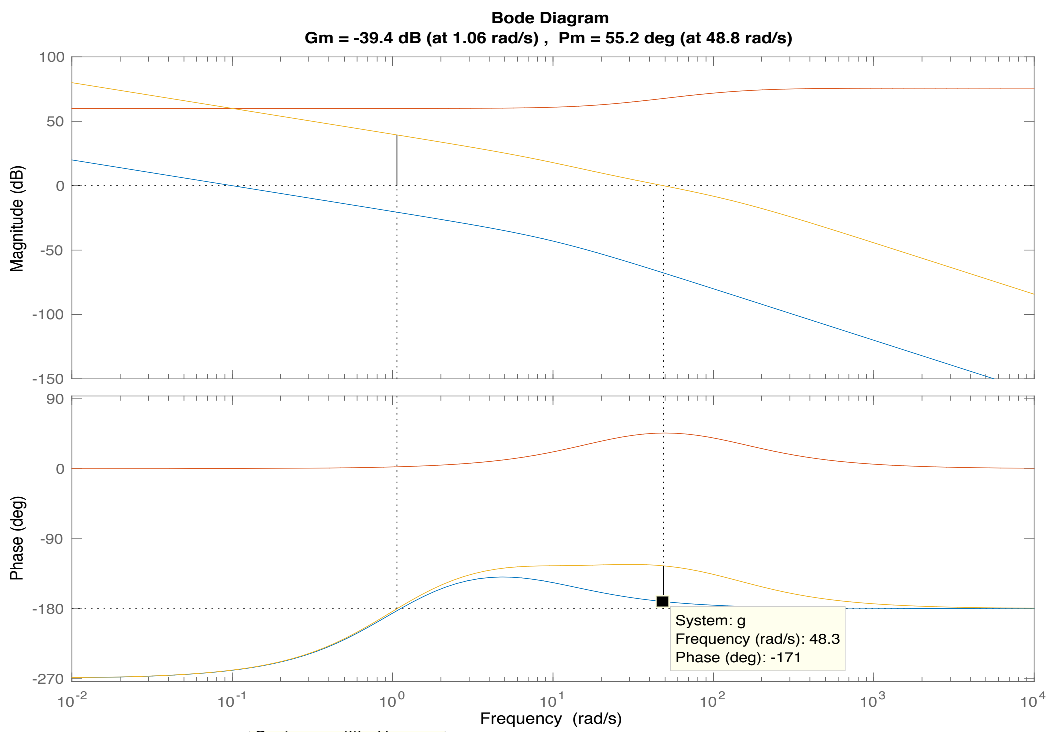
b) (0,5) Mp = 16% $\rightarrow \zeta = 0{,}5 \rightarrow MF = 50º$.
MF$_{atual}$ = 14º em 30 rad/s. $\boxed{\phi_{av} = 50 - 14 + 10 = 46º}$.

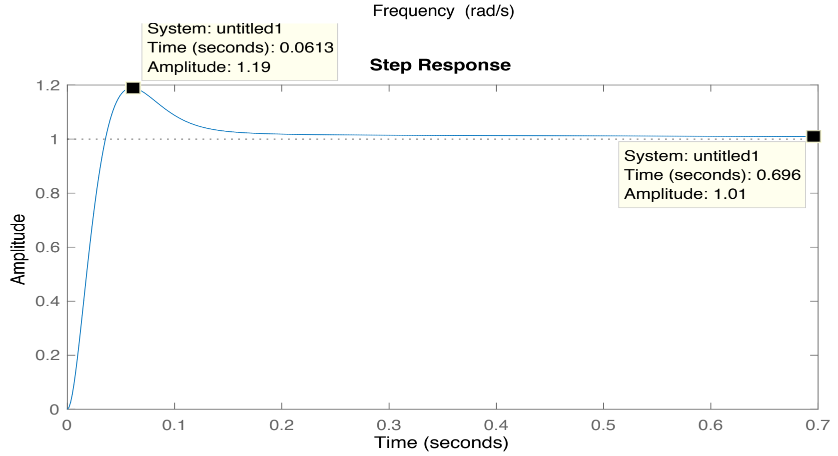
c) (0,5) 1/α = (1+sind(46))/(1-sind(46)) = $\boxed{6{,}126;\ (15.74\ \text{dB})}$.
Freq. Central $\boxed{\omega_m = 50\ \text{rad/s}\ (\sim -7{,}87\ \text{dB})}$.

d) (1,0) $6{,}126 = \frac{1}{\alpha} = \frac{p}{z}$; p=6,126*z;
$\omega_m = 50 = \sqrt{pz}$;
pz= 2500; z= 20,2; p=123,74;
K=1000*186,45/17,425 = 6125,7;

$$\boxed{D(s) = 6125{,}7\frac{(s+20{,}2)}{s+123{,}74}}$$

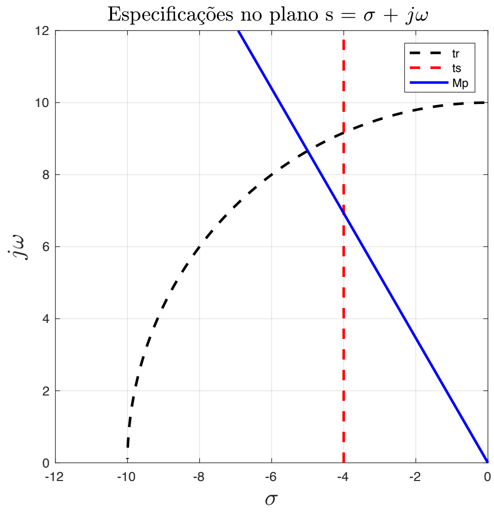
e) (0,5) em 50 rad/s a fase do sistema é de ~8º (e não 14º) assim a fase obtida é de $\boxed{46º + 8º = 54º}$.






```
g=zpk([-1],[0 1 -10],1);  D=zpk(-20.2,-123.74,6125.7); margin(D*g); step(feedback(D*g,1))
```

3ª Questão (5,0) Projeto no LGR



a) (0,5) $\boxed{s_0 = -5+8{,}7i}$

b) (0,5) G=zpk([-8],[0 -1],1);H=zpk([],-10,10);rlocus(G*H);
s=-5+8.7i; 180-angle(10*(s+8)/(s*(s+1)*(s+10)))*180/pi

$\boxed{\emptyset_{av} = 43{,}7}$

c) (0,5) PI atende e_{ss} e a fase pode ser atendida por um zero.
PID também atende mas é um "desperdício".

d) (2,0) tand(43.7) = 8.7/x; x = 9,104 => z = -14,104
s=-5+8.7i; K=abs((s*(s+1)*(s+10))/(10*(s+8)*(s+14.104))
K= 0.832

$$\boxed{D_{PI}(s) = 0{,}832\frac{(s+14{,}1)}{s}}$$

$$\boxed{D_{PID}(s) = 0{,}0195\frac{(s+26.5)^2}{s}}$$

e) (0,5) Erro para perturbação: $E = R - Y = -Y$
PI:

$$\frac{Y}{W} = \frac{\frac{(s+8)}{(s+1)}}{1+\frac{10}{(s+10)}\frac{0{,}832K_{at}(s+14{,}1)}{s}\frac{(s+8)}{(s+1)}} = \frac{s(s+8)(s+10)}{s(s+10)(s+1)+10*K_{at}0{,}832(s+14{,}1)(s+8)}$$

$$y = \lim_{s\to 0} s\frac{1}{s^2}\frac{s(s+8)(s+10)}{[s(s+10)(s+1)+K_{at}8{,}32(s+14{,}1)(s+8)]}$$

$y = \frac{10}{K_{at}8{,}32*14{,}1} = \frac{0{,}0852}{K_{at}}$. Sem K_{at} temos $\boxed{e_{ss} = -0{,}0852}$

$$K_{at} = 8{,}52\ para\ que\ ess = 0{,}01$$

PID:

$$\frac{Y}{W} = \frac{\frac{(s+8)}{(s+1)}}{1+\frac{10}{(s+10)}\frac{0{,}0195K_{at}(s+26{,}5)^2}{s}\frac{(s+8)}{(s+1)}} = \frac{s(s+8)(s+10)}{s(s+10)(s+1)+K_{at}0{,}195(s+26{,}5)^2(s+8)}$$

$$y = \lim_{s\to 0} s\frac{1}{s^2}\frac{s(s+8)(s+10)}{[s(s+10)(s+1)+K_{at}0{,}195(s+26{,}5)^2(s+8)]}$$

$y = \frac{8*10}{K_{at}0{,}195*26{,}5*26{,}5*8} = \frac{0{,}073}{K_{at}}$. Sem o compensador em atraso $\boxed{e_{ss} = -0{,}073}$

$$K_{at} = 7{,}3\ para\ que\ ess = 0{,}01$$

f) (0,5) Ganho adicional de 8,52 em baixas frequências para atender $e_{ss} = 0{,}01$.

$$\boxed{G_{at}(s) = \frac{s+0.0852}{s+0.01}\ ou\ G'_{at}(s) = \frac{s+0.852}{s+0.1}}$$

$(G_{at}(s_0) = 0.99\angle -0{,}37°; G'_{at}(s_0) = 0.96\angle -3{,}89°)$

g) (0,5)

$$\frac{U}{R} = \frac{\frac{s+0.852}{s+0.1}\frac{0{,}832(s+14{,}1)}{s}}{1+\frac{10}{(s+10)}\frac{s+0.852}{s+0.1}\frac{0{,}832(s+14{,}1)(s+8)}{s\qquad(s+1)}} = \frac{0{,}832(s+0.852)(s+14{,}1)(s+1)(s+10)}{s(s+0{,}1)(s+10)(s+1)+10*0{,}832(s+0.852)(s+14{,}1)(s+8)}$$

$$x(0^+) = \lim_{t\to 0^+} x(t) = \lim_{s\to\infty} sX(s)$$

$$u(0^+) = \lim_{s\to\infty} s\frac{1}{s}\frac{0{,}832(s+0.852)(s+14{,}1)(s+1)(s+10)}{s(s+0{,}1)(s+10)(s+1)+10*0{,}832(s+14{,}1)(s+8)} = \frac{0{,}832}{1}$$

$\boxed{u_{max} = 12/.832 = 14.423}$