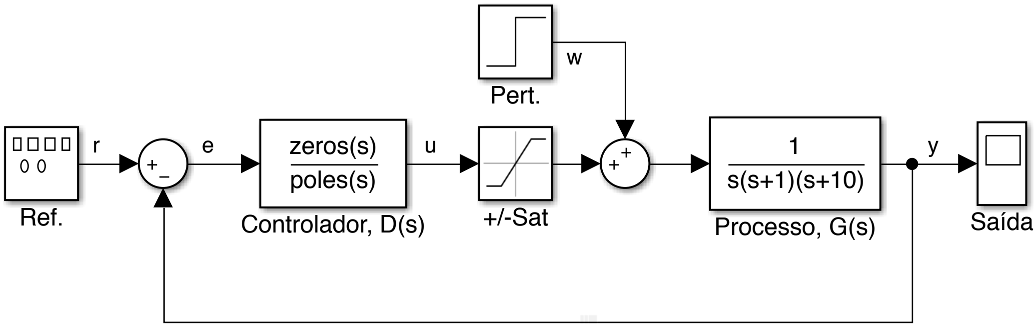
3ª Prova - CONTROLE DE SISTEMAS DINÂMICOS - 1°/2019

1ª **Questão** (4,5) Considere o projeto de um controlador D(s), no Lugar Geométrico das Raízes.



Especificações da resposta em malha fechada:

i) *Sobrepasso percentual*, $M_p \leq 25{,}3\%$.
ii) *Tempo de acomodação*, $t_{s(2\%)} \leq 5{,}2\ s$.
iii) *Tempo de pico*, $t_p \leq 1{,}0472\ s$.
iv) *Tempo subida*, $t_{r(10\text{-}90\%)} \leq t_p/2$.
v) $e_{ss} = 0$, *para degraus de perturbação.*

a) (1,0) Mapeie as especificações transitórias no plano s (no caderno de respostas). Escolha a posição dos polos dominantes, s_0, que atendam todas as especificações transitórias. Calcule a fase necessária para que o LGR passe por s_0. (inclua nos cálculos, caso necessário, 1/s do controlador).
b) (0,5) Escolha a estrutura do controlador (P, PD, avanço, atraso, PI, PID etc.). Justifique.
c) (1,5) Projete $D(s)$, para atender à todas as especificações de projeto.
d) (1,0) Realize $D(s)$ utilizando valores comerciais de R, C e AmpOp ideais. (sem associação de componentes).
e) (0,5) Qual a diferença percentual entre fase calculada em a) e a fase obtida em d)?

Obs:
- Considere que a saturação limita a amplitude de u, mas há folga para aumentar a banda passante.
- Caso projete um compensador em avanço – método da Bissetriz (favorece o e_{ss})
- Caso projete um compensador em atraso – verifique a realização com componentes comerciais.
- Se o avanço for maior que 90º, considere o uso de 2 compensadores em cascata.
- Se projetar um PID, considere que o polo interno ao operacional, torna o sistema próprio.
- Caso projete um PID, considere o zero duplo como estratégia de projeto mais simples.
- Valores comerciais de R e C: 10^X(10,12,15,18,22,27,33,39,47,56,68,82)

2ª **Questão:** (3,5) Considere o diagrama de bode em malha aberta (caderno de respostas) de um sistema que tem, em malha aberta, um polo no semi-plano direito. Projete um **controlador por avanço de fase**, $D(s)$, para que o sistema apresente em malha fechada:

- Erro em regime permanente (rampa), $e_{ss} \leq 5e-4$;
- Sobrepasso percentual da resposta ao degrau, $M_p \leq 25{,}3\%$;
- Margem de ganho, MG ≥ 8 dB.

a) (1,0) Para quais valores de $-\infty \leq K \leq \infty$, este sistema é estável (Nyquist)?
b) (0,5) Qual o ganho em baixas frequências para que seja atendida a especificação de erro?
c) (0,5) Calcule o avanço de fase necessário, acrescentando uma tolerância, $\phi_{tol} = 30°$.
d) (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).
e) (0,5) Complete o projeto, calculando K, z e p. $D(s) = \frac{K(s+z)}{s+p}$.
f) (0,5) Qual a Margem de Ganho e a Margem de Fase efetivamente obtidas?

3ª Questão: (2,0) Assinale **V**erdadeiro ou **F**also (na folha de respostas), justificando cada aspecto que considere incorreto. Itens considerados **V**erdadeiros não precisam ser justificados.

a) (0,5) O modelo no domínio da frequência é mais fácil de ser obtido que a representação paramétrica. Basta aplicar senóides à entrada do processo e medir a saída em regime permanente. O gráfico logarítmico do módulo e da fase em função da frequência é conhecido como diagrama de Bode. O projeto de controladores pode ser feito no diagrama de Bode, pois todas as especificações de projeto utilizadas no LGR têm equivalência no domínio-ω.
b) (0,5) As especificações no domínio do tempo são mapeadas em regiões no plano-s. A utilização s_0 "mais próximo da origem" visa a redução da amplitude do sinal de controle u. A utilização de s_0 na interseção de restrições é justificada pela programação linear. Com t_s, t_r, t_p, e M_p duas especificações são atendidas e a demais são "sobre-atendidas". O projeto no LGR só garante o atendimento destas especificações atendidas exatamente por s_0.
c) (0,5) A banda passante é medida no diagrama de Bode de malha fechada, onde ocorre -3dB. Ela pode também ser vista, de forma aproximada, no diagrama de bode de malha aberta se levarmos em conta o ganho acrescentado pelo controlador em baixas frequências.
d) (0,5) No projeto no domínio da frequência não é possível calcular o erro em regime permanente devido a um sinal de perturbação.

--- B O A   P R O V A ---

F O R M U L Á R I O

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

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

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

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

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

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

$\sigma = \zeta\omega_n$

$t_{s(2\%)} = 4/\sigma$

$$\zeta = \frac{-\ln\left(\frac{Mp}{100}\right)}{\sqrt{\pi^2 + ln^2\left(\frac{Mp}{100}\right)}}$$

$t_p = \pi/\omega_d$

$\omega_d = \omega_n\sqrt{1-\zeta^2}$

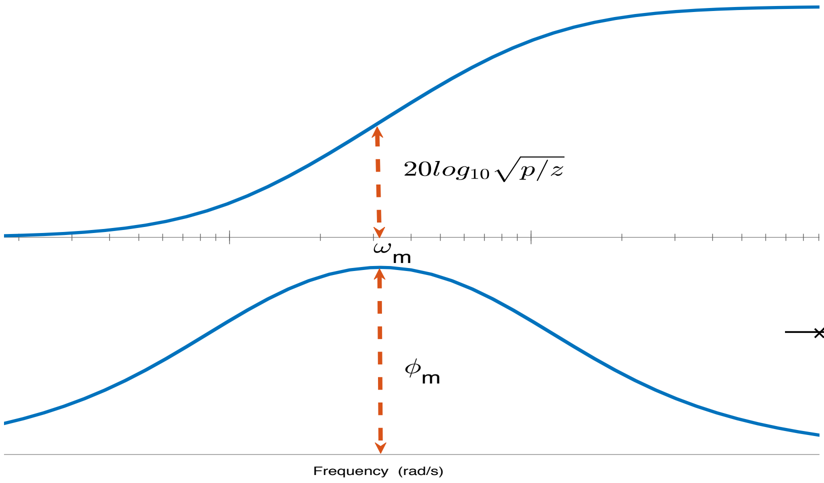
$t_{r(10\text{-}90\%)} \approx t_p/2$

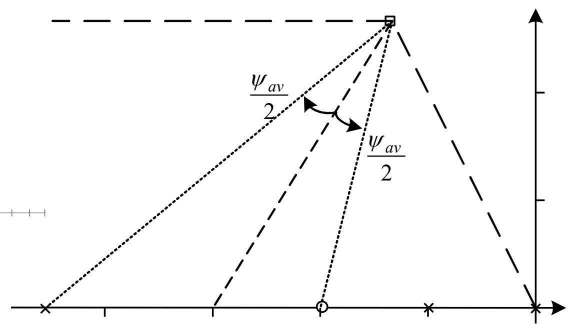
$p/\zeta = 0{,}5\ \ t_r \approx 1{,}8/\omega_n$

$p/\zeta = 0{,}4\ \ t_r \approx 1{,}7/\omega_n$

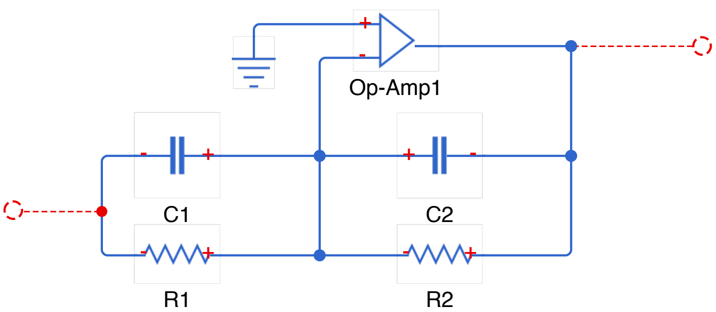
$p/\zeta = 0{,}3\ \ t_r \approx 1{,}65/\omega_n$

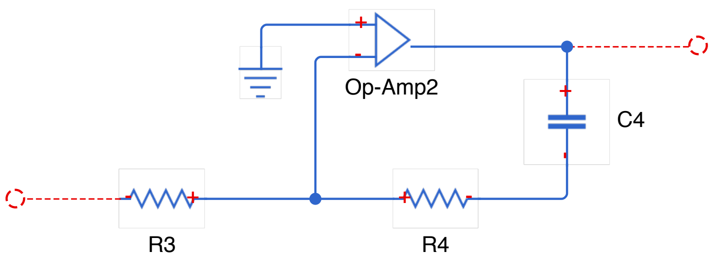
$p/\zeta = 0{,}2\ \ t_r \approx 1{,}6/\omega_n$

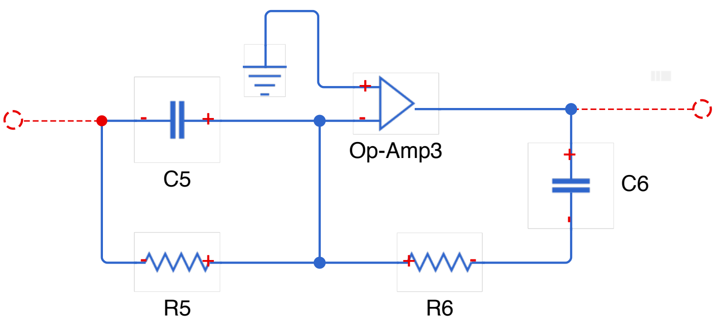


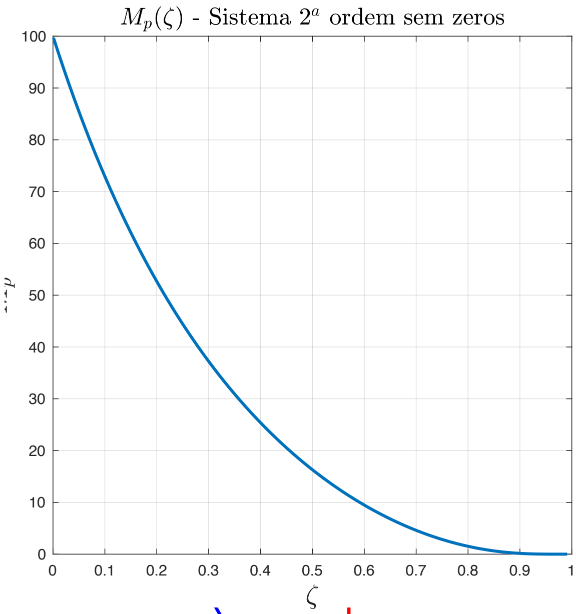


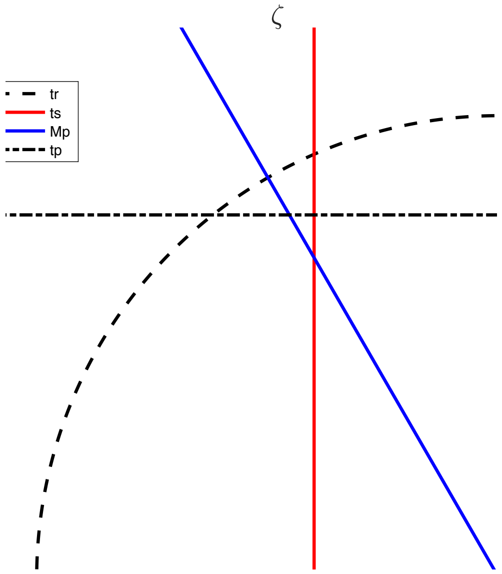
$t_{s(2\%)} = 4/\sigma$ $\quad 1 + K\dfrac{b(s)}{a(s)} = 0$ $\quad \alpha = \dfrac{\sum p\acute{o}los - \sum zeros}{n-m}$ $\quad \theta = \dfrac{180°(2k+1)}{n-m}$ $\quad$ se $m < n - 1 \Rightarrow \sum_{MA} p_i = \sum_{MF} p_j$











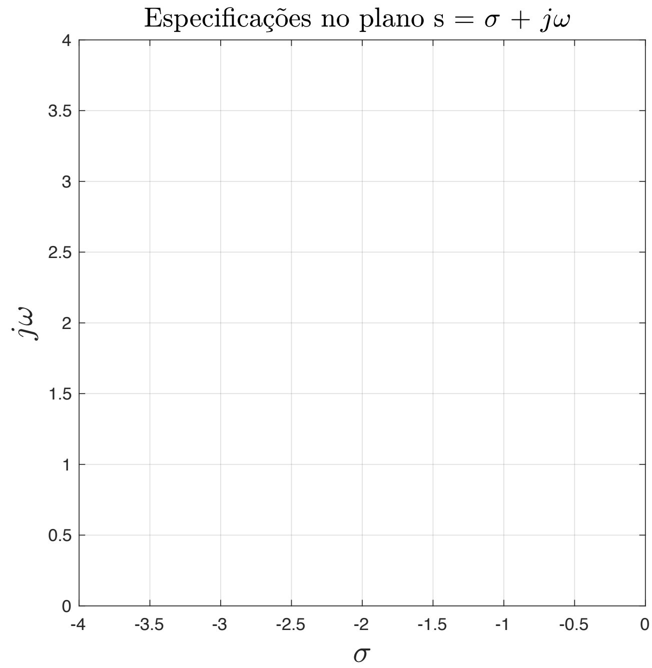
3ª Prova - CONTROLE DE SISTEMAS DINÂMICOS – 128601 - 1°/2019

CADERNO DE RESPOSTAS

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!!



1ª Questão: (4,5) LGR.

a) (1,0) $s_0 =$ $\phi_{av} =$

b) (0,5) Controlador =
Justificativa:

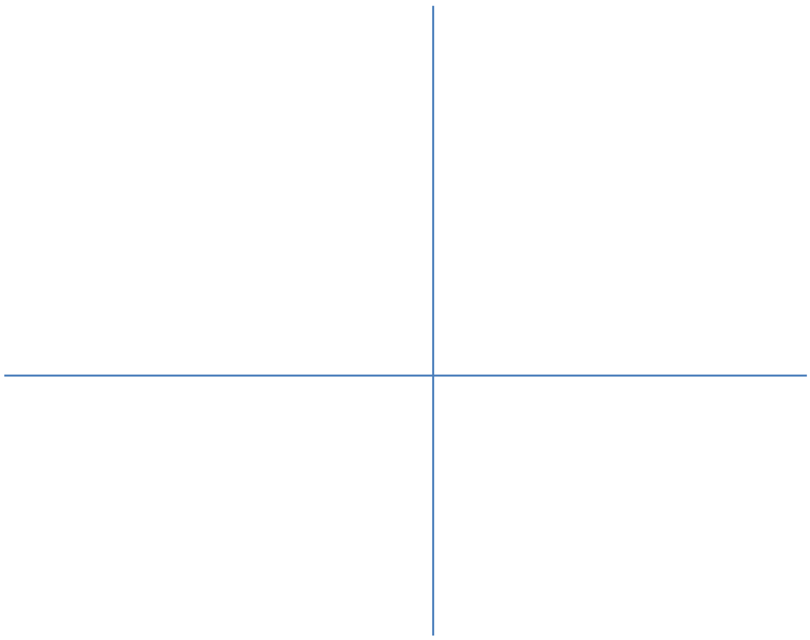
c) (1,5) $D(s) =$

d) (1,0) Realização

e) Diferença percentual =

2ª Questão (3,5) Domínio- ω.

a) (1,0) faixas de K estável:



Esboço Diagrama de Nyquist

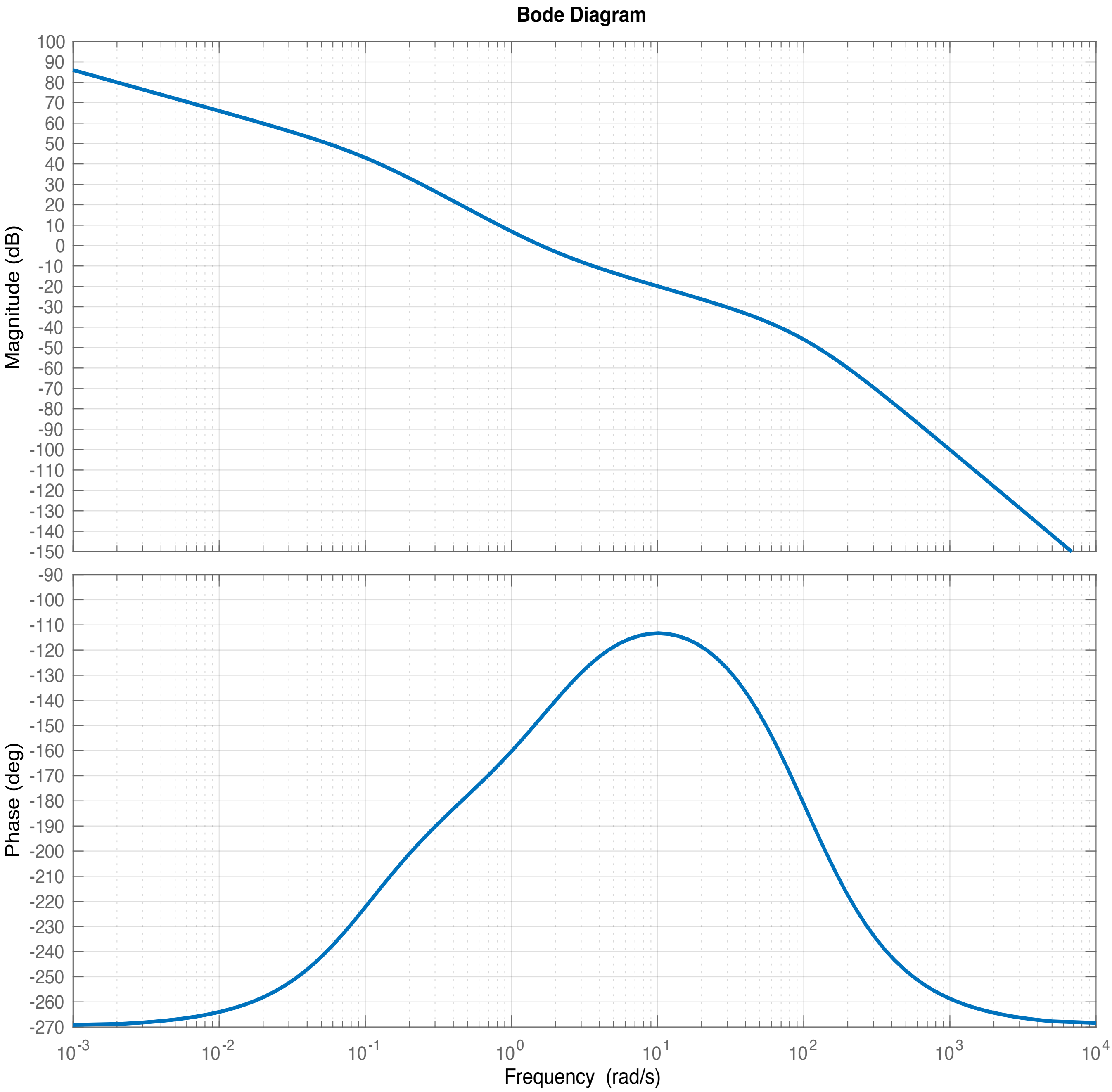
b) (0,5) K para $e_{ss} =$

c) (0,5) $\phi_{av} =$

d) (0,5) $\omega_m =$

e) (0,5) $D(s) =$

f) (0,5) MG = MF =



3ª Questão: (2,0) V/F.

a) (0,5) ( ) V / ( ) F Justificativa:

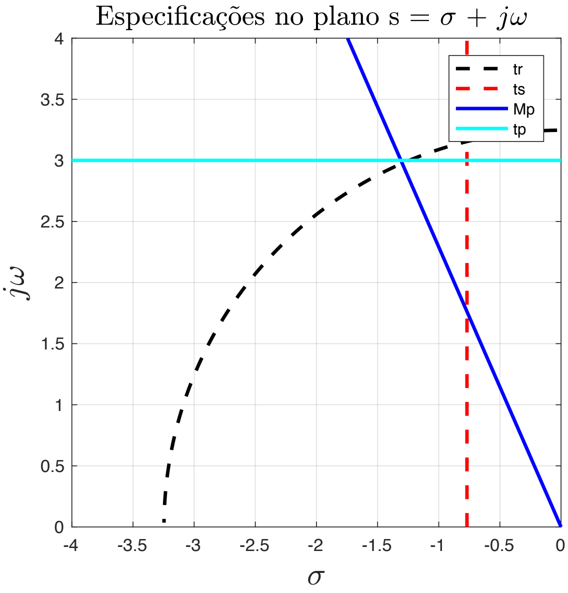
b) (0,5) ( ) V / ( ) F Justificativa:

c) (0,5) ( ) V / ( ) F Justificativa:

d) (0,5) ( ) V / ( ) F Justificativa:

GABARITO

1ª Questão: (4,5)



a) (1,0) s = -1,31 + 3,0i

$\emptyset_{av}$ = 180º - angle(1/(s*s*(s+1)*(s+10)))*180/pi;

$\emptyset_{av}$ = 162,124º

b) (0,5) Erro nulo à perturbação → é necessário integrador antes do ponto de atuação da perturbação (em *D*(*s*)).
Com fase de 162,124º → **só o PID atende**.

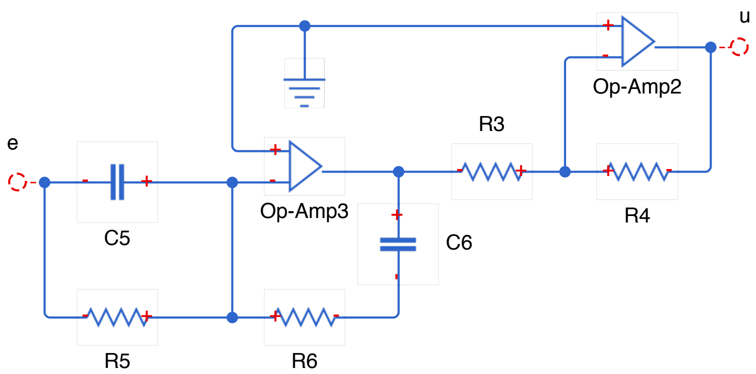
c) (1,5) PID com zero duplo: $\emptyset_{av}/2$ = 81,062º

Δ = 3/tand(81,062º) = 0,4718; → z = -1,782

K=abs(s*s*(s+1)*(s+10)/((s+1.782)*(s+1.782))) = 32,216

$$\boxed{D = \frac{32{,}216(s+1{,}782)^2}{s}}$$

d) (1,0) Realização



$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{R_4 Z_2}{R_3 Z_1}; \quad Z_2 = R_6 + \frac{1}{sC_6};$$

$$Z_1 = \frac{\frac{R_5}{sC_5}}{R_5 + \frac{1}{sC_5}}; \quad \frac{U(s)}{E(s)} = \frac{R_4}{R_3}\frac{\frac{R_6 sC_6 + 1}{sC_6}}{\frac{R_5}{R_5 sC_5 + 1}};$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{R_4}{R_3}\frac{(sR_5C_5+1)(sR_6C_6+1)}{sR_5C_6};$$

$$\boxed{\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{R_4}{R_3}\frac{C_5 R_6 (s+1/R_5C_5)(s+1/R_6C_6)}{s}}$$

Assumindo $C_5 = C_6 = 1\mu F;\ R_3 = 10\ K\Omega;$

$$\frac{R_4 C_5 R_6}{R_3} = 32{,}217; \quad \frac{R_4 0{,}56}{R_3} = 32{,}217; R_4 = 575{,}32\ K\Omega;\ R_5 = R_6 = 561{,}2\ K\Omega$$

$$\boxed{Valores\ Comerciais: R_3 = 10\ K\Omega; R_4 = R_5 = R_6 = 560\ K\Omega;\ C_5 = C_6 = 1\mu F};$$

e) (0,5) Diferença Percentual na fase:

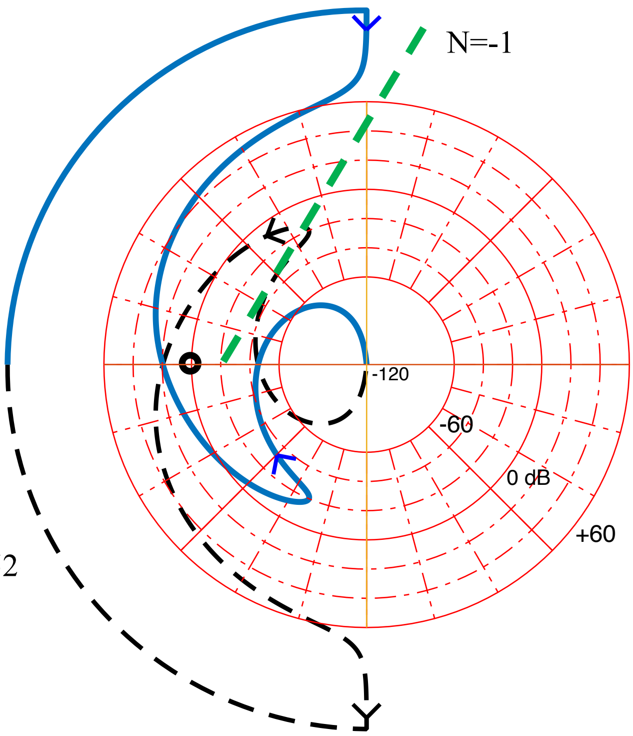
s=-1.31+3i;C=1e-6;R=560e3; angle((s+1/(R*C))*(s+1/(R*C)))*180/pi = 161.9791

$$\boxed{erro\% = 100 * (161.9791 - 162.124)/162.124 = -0.0894\%}$$

$$\boxed{Com: R_3 = R_4 = 10\ K\Omega; R_5 = 560\ K\Omega; R_6 = 33\ M\Omega;\ C_5 = 1\mu F;\ C_6 = 18\ nF};$$

$$\boxed{erro\% = 100 * (163.8927 - 162.124)/162.124 = 1.091\%}$$

2ª Questão: (2,0)



a) (1,0) P =1 → N= -1, para estabilidade (Z = P + N)

Interseções com -180º no diagrama de Nyquist
G(0,455 rad/s) = 19,7 dB = 9,6
G(94 rad/s) = - 45 dB = -0,0052

$1 + KG(j\omega) = 0 \rightarrow G(j\omega) = -1/K$

$1/9{,}6 \leq K \leq 1/0{,}0052$ $\boxed{0{,}1042 \leq K \leq 191}$

b) (0,5) Sistema do tipo 1,
considerando a menor frequência no Bode:

w1*G(w1) = 10^{-3}*G(10^{-3})= 10^{-3}*10^(85,7/20) =19,2752

→ $e_{ss} = 1/K_v$ = 0,0519 (erro atual)

Ganho necessário $ara\ atender\ e_{ss}$:
0,0519/5e-4 = $\boxed{103{,}8\ =\ 40{,}324\ dB\ \approx 40\ dB}$

c) (0,5) MF com ganho de 40 dB = 19,6º em 68,2 rad/s;
$M_p \leq 25{,}3\% \ \rightarrow \zeta \geq 0{,}4 \rightarrow MF \geq 40°$

$\boxed{\phi_m\ =\ 40° - 19{,}6°\ + 30°\ =\ 50{,}4°}$

d) (0,5) $\frac{1}{\alpha} = \frac{p}{z} = \frac{1+sen(50.4°)}{1-sen(50.4°)} = 7{,}151 = 17{,}087\ dB$ na frequência ω_m o ganho é de 8,8734 dB

-8,8 dB ocorrem em $\boxed{\sim 112\ rad/s\ =\ \omega_m}$

e) (0,5) $\frac{1}{\alpha} = \frac{p}{z} = 7{,}151;\quad \omega_m = \sqrt{pz};\quad z = 42; p = 300;$
o ganho de 7,143=300/42, para não alterar o ajuste feito para e_{ss}. $\boxed{D(s) = 714{,}3\frac{(s+42)}{s+300}}$

f) (0,5) Para fazer o projeto, a MF = 19,6º, foi medida inicialmente em 68,2 rad/s.
Com $D(s)$, 0 dB acontece $em\ \omega_m = 112\ rad/s,$

$MF = 180° + \angle D(j\omega_m) + \angle G(j\omega_m)$
$= 180° + \quad 50{,}4° \quad - 191{,}2°$ = 39,2º (no ML ocorre em 117 rad/s)

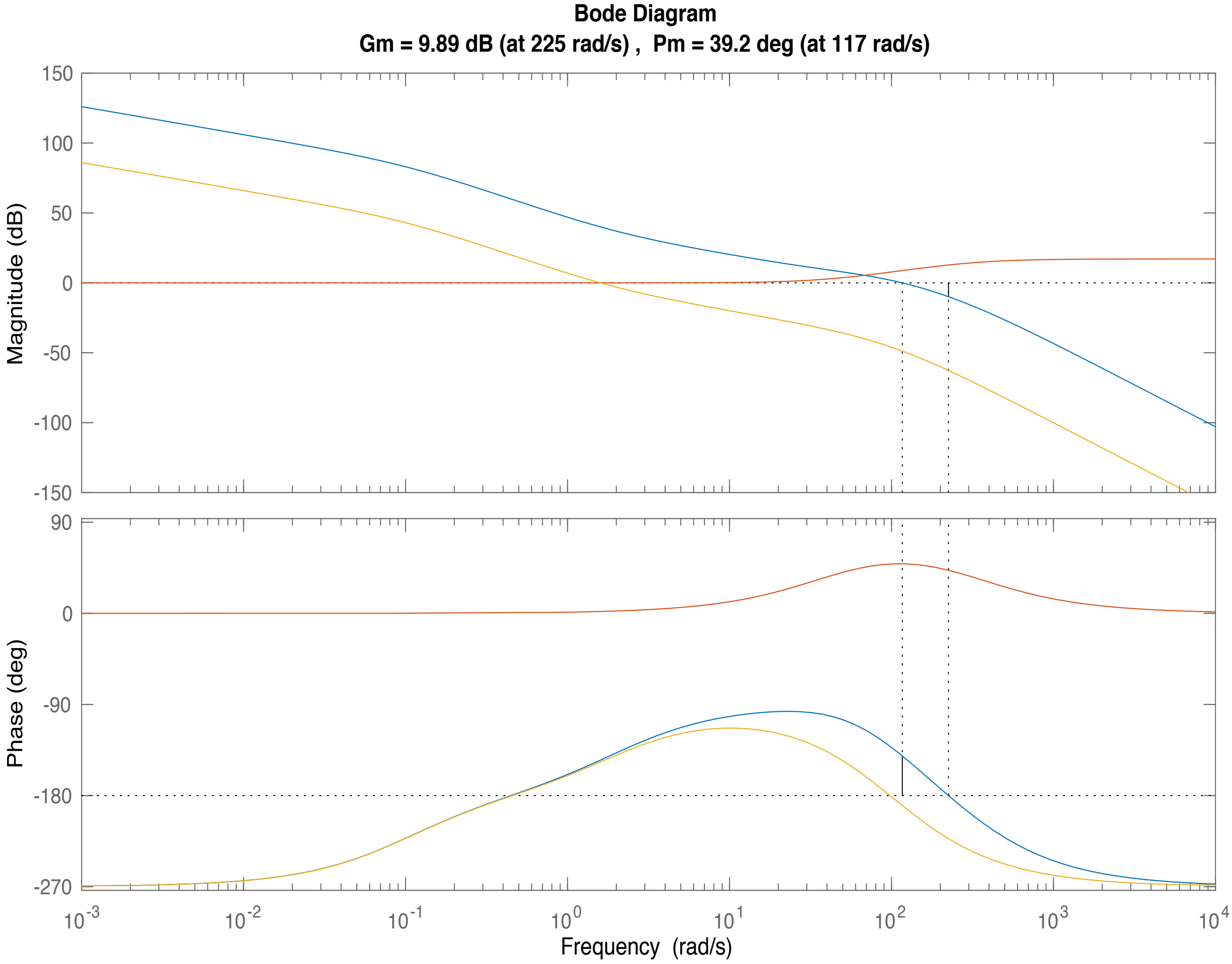
MG: ESTE ITEM FOI CANCELADO
(nenhuma resposta obtida na P3CSD 2019/1, via ω_{cf}. **MF vale 0,5**)

A MG é medida na frequência de corte, ω_{cf}, $\angle D(j\omega_{cf}) + \angle G(j\omega_{cf}) = 180°$
Temos o gráfico de $\angle G(j\omega)$ e a equação $D(s) = 714{,}3\frac{(s+42)}{s+300}$, para alguns valores de ω:

ω	$\angle G(j\omega)$	$\angle D(j\omega)$	$\angle G(j\omega)+\angle D(j\omega)$
193	-216	44,96	-171
418	-243	29,92	-213
225	-223	42,55	-180.44

Em $\omega_{cf} = 225\ rad/s,\ \ |G(j\omega_{cf})| + |D(j\omega_{cf})|$ = -62,7 + 40 + 12,8 = -9,9 $\boxed{\rightarrow MG\ =\ 9{,}9\ dB}$

d=zpk(-42,-300,7.143);g=zpk(-2,[0 .1 -100 100],10000);bode(g); margin(100*g);margin(100*d*g),



3ª Questão: (2,0)

a) F – tr, tp, por exemplo não são utilizadas no domínio w.

b) F - O projeto não garante nenhuma especificação, pois só vale para sistema de 2ª ordem sem zeros.

c) V

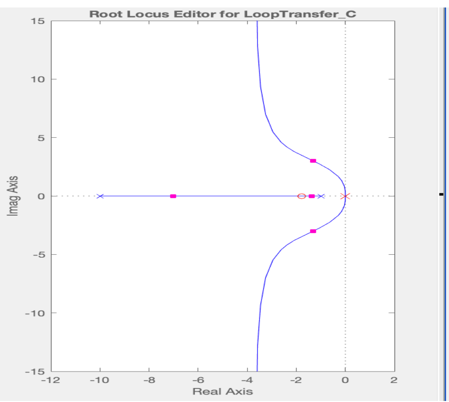
d) F Realimentação unitária E(s) = G(s)/(1+D(s)G(s)); E(s) = G(s)/(1+D(s)G(s));

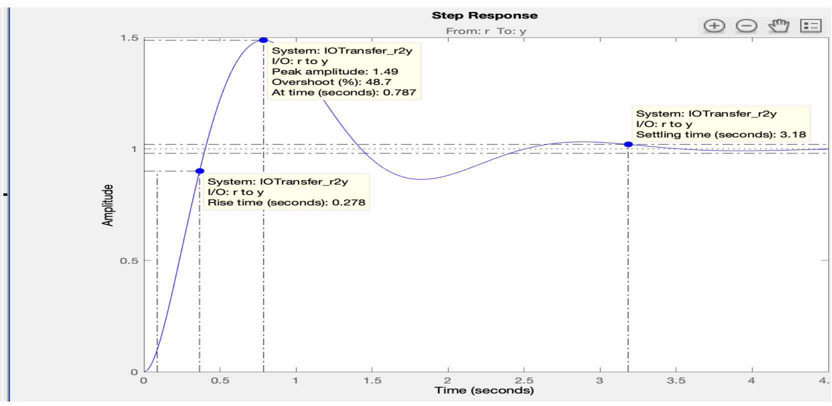
Verificação computacional Q1 – (Não faz parte da prova!)

Especificações: $t_r = 0{,}5326$; $t_p = 1{,}0472$; $t_s = 5{,}2$; $M_p = 25{,}37\%$

SISOTOOL: $t_r = 0{,}278$; $t_p = 0{,}787$; $t_s = 3{,}18$; $\boldsymbol{M_p = 48{,}7\%}$

3 polos e 1 zero próximos à origem – não é bem aproximado por sistema de 2ª ordem sem zeros!!





1ª Questão: **Gabarito alternativo Avanço**

"ignora" a especificação de erro nulo para perturbação.

a) (1,0) s = -1,31 + 3,0i
$\emptyset_{av}$ = 180º - angle(1/(s*(s+1)*(s+10)))*180/pi = 48,5348º

b) ~~(0,5)~~ → Ignorando a especificação e ess um **Compensador em Avanço** fornece $\emptyset_{av}$.

c) (1,5) Método da bissetriz $\frac{\emptyset_{av}}{2}$ = 24,265º; 56,8º $\pm$24,265º = {81,065º; 32,535º}

$\frac{\Delta}{3} = tand(8{,}935°)$; Δ=0,4717; z = - 1,782
$\frac{\Delta}{3} = tand(57{,}465°)$; Δ=4,7027; p = - 6,0127

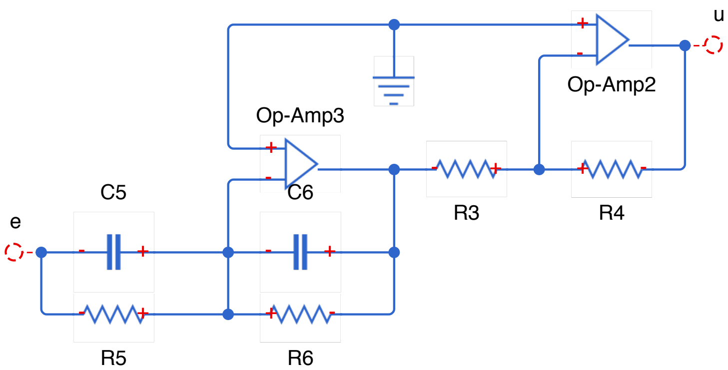
K=abs((s+6,0127)*s*(s+1)*(s+10)/(s+1.782)) = 166,7

$$\boxed{D = \frac{166{,}7(s + 1{,}782)}{s + 6{,}0127}}$$

d) (1,0) Realização

$$\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{R_4 Z_2}{R_3 Z_1};$$

$$\boxed{\frac{U(s)}{E(s)} = \frac{R_4\, C_5(s+1/R_5C_5)}{R_3\, C_6(s+1/R_6C_6)}}$$



Assumindo $C_6 = 1\mu F$; $R_3 = R_4 = 10\ K\Omega$;

$C_6 = 166{,}7\mu F$; $R_5 = 3{,}37\ K\Omega$; $R_6 = 166{,}3\ K\Omega$

$\boxed{Valores\ Comerciais: R_3 = 10\ K\Omega; R_5 = 3{,}3\ K\Omega;\ R_6 = 180\ K\Omega; C_5 = 180\mu F; C_6 = 1\mu F}$;

e) (0,5) Diferença Percentual na fase:

s=-1.31+3i; angle((s+1/(R5*C5))*(s+1/(R6*C7)))*180/pi = 47,657 º

$\boxed{erro\% = 100 * (47{,}657 - 48{,}5348º)/48{,}5348º = -1{,}798\%}$

1ª Questão: **Gabarito alternativo PD** $\boxed{D(s) = 22{,}67(s + 3{,}96)}$

– Não realizável, ignora a especificação de erro nulo para perturbação

1ª Questão: **Gabarito alternativo PI** $\boxed{D(s) = \frac{K(s-8)}{s}}$
- Controlador com fase não mínima.