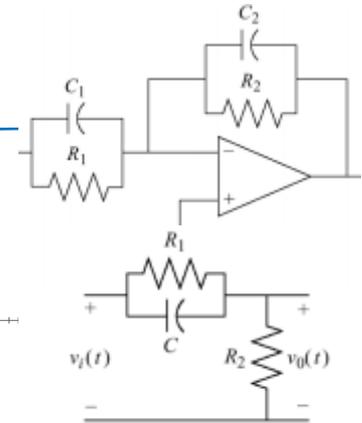
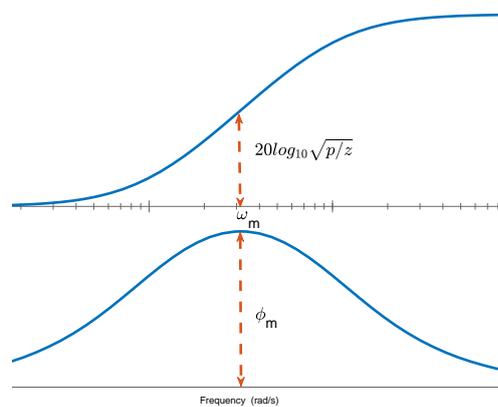
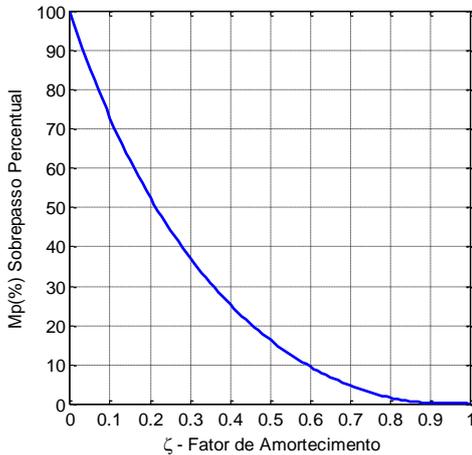




Nome: \_\_\_\_\_ Matrícula: \_\_\_\_\_ Curso: Eng, \_\_\_\_\_

## 1:9 2ª PROVA – 111911 CONTROLE DINÂMICO - 1º/2017



$$t_r(10-90\%) = 1,8/\omega_n$$

$$\sigma = \zeta \omega_n \quad t_s(2\%) = 4/\sigma$$

$$D(s) = K \frac{Ts+1}{\alpha Ts+1} = K' \frac{s+z}{s+p}; \quad \frac{1}{\alpha} = \frac{p}{z} = \frac{1+\sin\phi_m}{1-\sin\phi_m} \rightarrow \text{fator de avanço}; \quad \phi_m \rightarrow \text{avanço máximo em } \omega_m = \sqrt{pz} = \frac{1}{\sqrt{\alpha}T}$$

Valores comerciais de R e C:  $10^n \times 10, 12, 15, 18, 22, 27, 33, 39, 47, 56, 68, 82$

**1ª Questão (1,0)** Considere o controle de um **processo em malha fechada com realimentação unitária** sujeito a sinais de perturbação, Assinale Verdadeiro (V) ou Falso (F), Caso considere um item falso, todos os aspectos incorretos deverão ser apontados de forma crítica,

- O critério de Nyquist utiliza a resposta em frequência em malha aberta e o conhecimento dos polos no SPD para estabelecer a faixa de ganhos de malha,  $K$ , para os quais o sistema em malha fechada, sujeito a sinais de perturbação, é estável,
- A realização passiva de compensadores dinâmicos só é possível se o ganho,  $-1 < K < 1$ ,

**2ª Questão (4,0)** Projete um compensador dinâmico para que o sistema  $G(s) = \frac{1}{s(s+1)(s+2)}$ , operando com realimentação unitária, atenda:

- Sobrepasso percentual,  $M_p \leq 20\%$
- Tempo de subida,  $t_r(10-90\%) \leq 0,8 \text{ s}$
- Coeficiente de erro de velocidade,  $K_v \geq 1,0$
- A banda passante não deve ser aumentada além do necessário (saturação!),

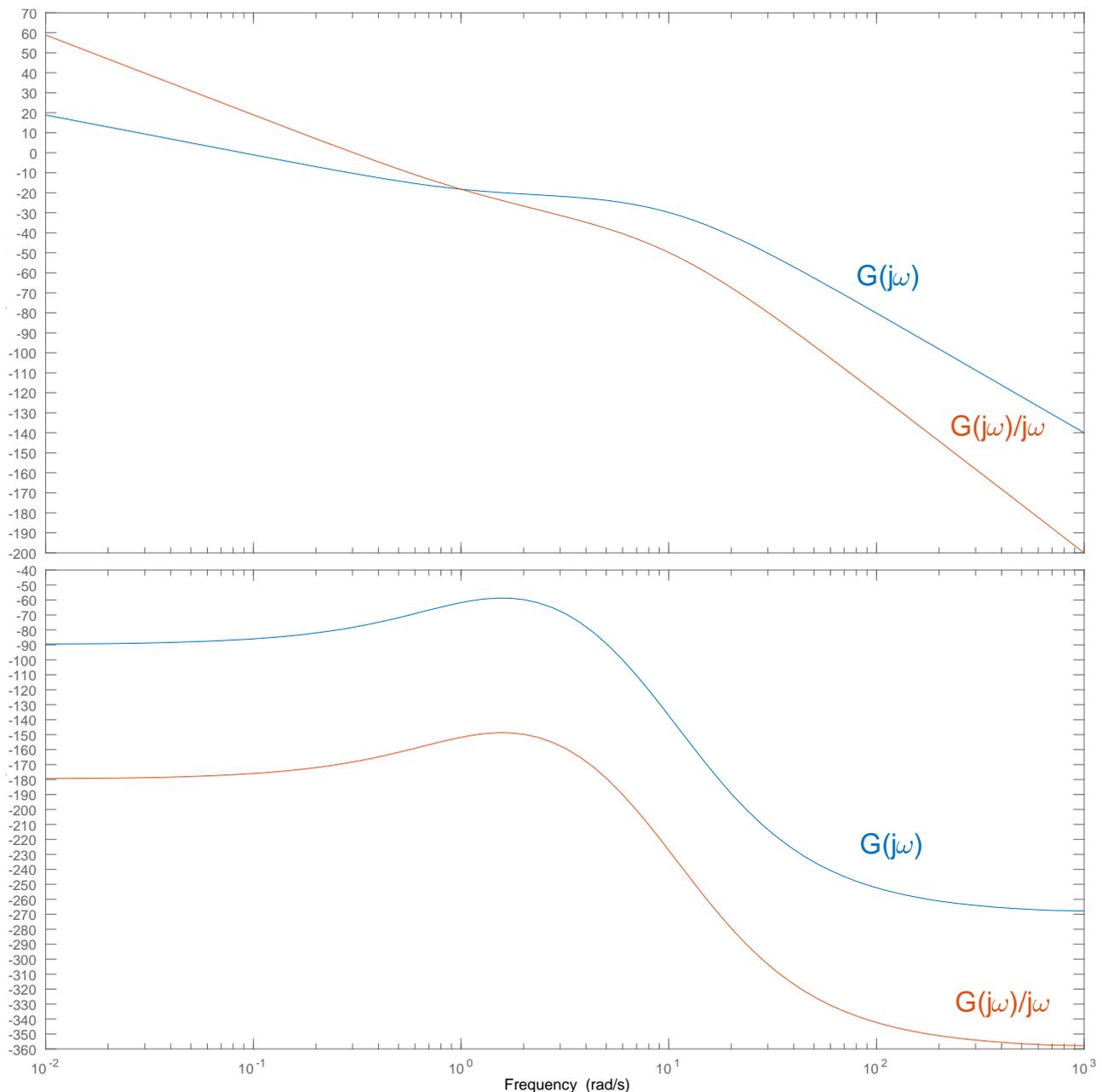
- (3,0) Projete o compensador utilizando o método da bissetriz,
- (0,5) Escolha valores de R e C (comerciais, sem associações) para realizar o compensador,
- (0,5) Qual o erro percentual em ganho e em fase fornecidos pela rede projetada?

**3ª Questão (2,0)** Considere o diagrama de Bode do,  $G(j\omega)/j\omega$ , a seguir, de um sistema dinâmico que não tem polos no SPD, Quais valores de  $K$ ,  $-\infty < K < \infty$ , produzem, em malha fechada, uma resposta estável? Para cada valor de  $K$  considerado, há quantos polos em malha fechada no SPD?

**4ª Questão (3,0)** O controlador PI é um dos mais simples e versáteis; permite melhorar tanto a resposta transitória como o regime permanente, Como no LGR também é usual no domínio da frequência já considerar no projeto  $G(j\omega)/j\omega$ , Considere nesta questão o projeto de um controlador PI para o sistema representado no domínio da frequência por  $G(j\omega)$ , para atender às seguintes especificações:

- $e_{ss}$  parábola  $\leq 1,122$
- Sobrepasso percentual,  $M_p \leq 10\%$

- a) (0,5) Calcule o parâmetro do controlador que atende à especificação em regime permanente,
- b) (0,5) Calcule o avanço de fase necessária para atender  $M_p$ , Acrescente  $10^\circ$  de tolerância,
- c) (0,5) Escolha  $\omega_c$ , a freq, de cruzamento (“*banda passante larga que ainda permita o projeto*”),
- d) (1,0) Projete o elemento PD para que forneça a fase calculada em b),
- e) (0,5) Apresente o compensador completo na forma ZPK,



## GABARITO

### 1ª Questão

- a) V - O critério de Nyquist utiliza a resposta em frequência em malha aberta e o conhecimento dos polos no SPD para estabelecer a faixa de ganhos de malha,  $K$ , para os quais o sistema em malha fechada, sujeito a sinais de perturbação, é estável,
- b) F - A realização passiva de compensadores dinâmicos só é possível se o ganho,  $-1 < K < 1$ .  
 $0 < K < 1$ , não é possível inverter o sinal de forma passiva.
- c) F - A resposta a sinais de perturbação de um satélite geoestacionário é mais lenta que a resposta à referência porque se tem como objetivo prioritário economizar energia,

*As diferentes velocidades de respostas são devidas aos zeros. O zeros, por sua vez estão associados aos sensores/atuadores utilizados. Os polos do sistema são os mesmos tanto para referência como para perturbação. Os zeros são distintos e produzem resíduos distintos ( $K_1, K_2, \dots, K'_1, K'_2, \dots$ ).*

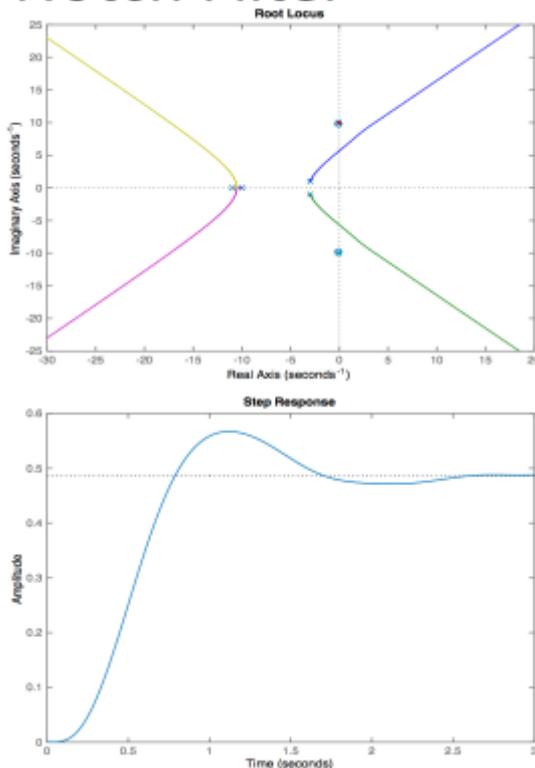
$$y_{ref} = K_1 e^{-t/\tau_1} + K_2 e^{-t/\tau_2} + \dots; y_{pert} = K'_1 e^{-\frac{t}{\tau_1}} + K'_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} + \dots; \Rightarrow t_{r,ref} \neq t_{r,pert}; t_{s,ref} \neq t_{s,pert}$$

- d) V - O cancelamento de polos pouco amortecidos ( $p_{1,2} = -\sigma \pm j\omega$ ;  $\sigma \ll \omega$ ) deve ser feito com um filtro rejeita faixa com zeros em  $z_{1,2} = -\sigma \pm j\omega_z$ ; com  $\omega_z = \omega + \delta$ , Isto é, o ângulo de partida do LGR mostra que imprecisões do modelo não ameaçam a estabilidade.

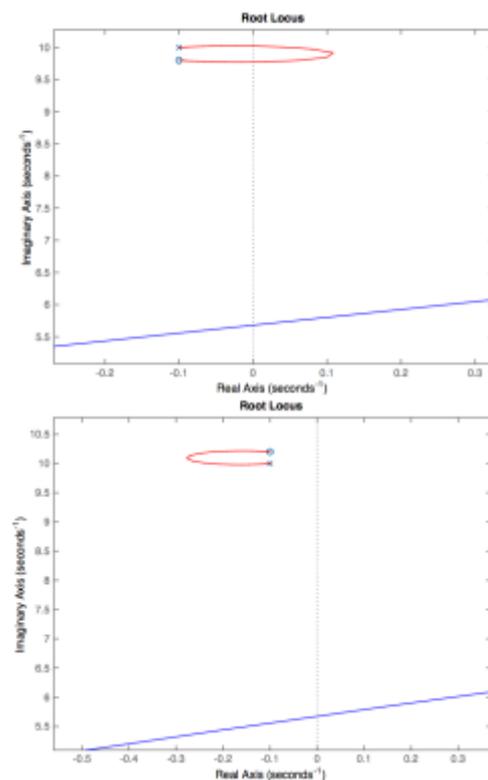
*O ângulo de partida (para a esquerda aqui) mostra que imprecisões do modelo (dentro de uma tolerância razoável) não ameaçam a estabilidade. Com  $\delta < 0$  os ramos do LGR partem para a direita, ameaçando seriamente a estabilidade do sistema.*

*Ver Complementos Notas de Aula: CDin9-LigDeslPIDheur.pdf - página 14.*

### Notch Filter



### – Cancelar pelo lado “certo”



**2ª Questão**

a)

$$Mp = 20; 25; 30 \rightarrow \zeta = 0,46; 0,40; 0,36;$$

$$t_r = 0,8; 0,9; 1,0 \rightarrow \omega_n = \frac{1,8}{t_r} = 2,25; 2,0; 1,8;$$

$$s_0 = -\omega_n \zeta + j\omega_n \cos(\text{asin}(\zeta))$$

$$\phi_{av} = 180 - \text{angle}(1/(s_0 * (s_0 + 1) * (s_0 + 2)))$$

$$(K, z, p) \text{ método da bissetriz, } D(s) = \frac{K(s+z)}{s+p}$$

$$K_v = \frac{Kz}{2p}; \Rightarrow \forall (M_p, t_r) K_v \geq 1,0$$

Pts	Param.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	$M_p$	20%	20%	20%	25%	25%	25%	30%	30%	30%
	$t_r$	0,8 s	0,9 s	1,0 s	0,8 s	0,9 s	1,0 s	0,8 s	0,9 s	1,0 s
	$\zeta$	0,46	0,46	0,46	0,4	0,4	0,4	0,36	0,36	0,36
	$\omega_n$	2,25	2,0	1,8	2,2500	2,0	1,8	2,25	2,0	1,8
0,5	$s_0$	-1.0350 + 1.9978i	-0.9200 + 1.7758i	-0.8280 + 1.5983i	-0.9000 + 2.0622i	-0.8000 + 1.8330i	-0.7200 + 1.6497i	-0.8100 + 2.0991i	-0.7200 + 1.8659i	-0.6480 + 1.6793i
0,5	$\phi_{av}$	92.6090	83.5013	74.9921	82.7255	74.1404	66.1381	76.3794	68.1161	60.4246
1,5	$K$	44.9075	24.9369	15.7673	40.4035	23.8920	15.6343	38.2696	23.3054	15.5163
	$z$	0.4998	0.5927	0.6547	0.6046	0.6763	0.7241	0.6728	0.7328	0.7724
	$p$	10.1299	6.7493	4.9491	8.3732	5.9141	4.4746	7.5246	5.4588	4.1946
0,5	$K_v$	1.1078	1.0949	1.0429	1.4587	1.3661	1.2650	1.7109	1.5642	1.4287

$$b) -D(s) = -\frac{K(s+z)}{s+p} = -K_n \frac{sT_z + 1}{sT_p + 1} = -\frac{R_2 s R_1 C_1 + 1}{R_1 s R_2 C_2 + 1} = -\frac{C_1 s + 1/R_1 C_1}{C_2 s + 1/R_2 C_2}$$

$K_n$	2.2155	2.1897	2.0857	2.9174	2.7323	2.5299	3.4217	3.1284	2.8573
$T_z$	2.0010	1.6873	1.5275	1.6540	1.4785	1.3811	1.4863	1.3647	1.2946
$T_p$	0.0987	0.1482	0.2021	0.1194	0.1691	0.2235	0.1329	0.1832	0.2384

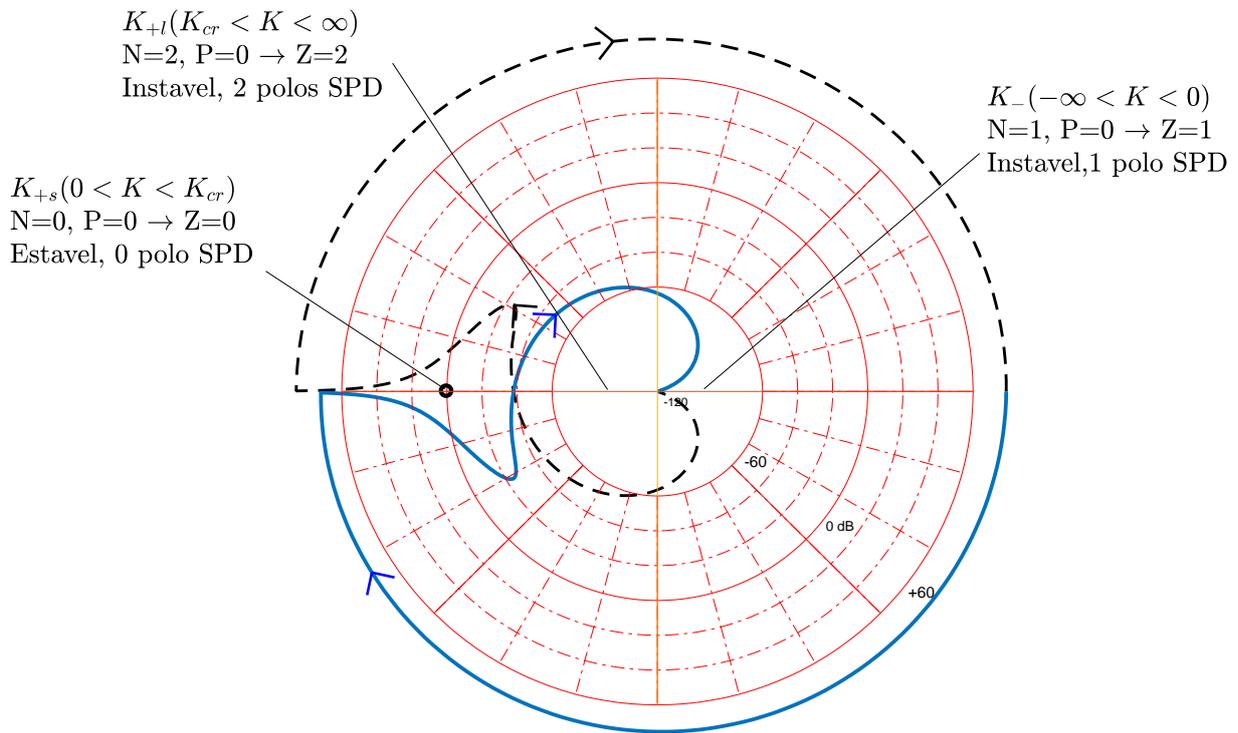
$$T_z = R_1 C_1 = 1,4836; T_p = R_2 C_2 = 0,1329; K_n = 3,4217$$

$$\rightarrow C_1 = 1 \mu F; R_1 = 1,5 M\Omega; C_2 = 27 nF; R_2 = 4,7 M\Omega;$$

$$c) \angle D(s)_{s_0} = 77,37^\circ; erro_{fase} = 1,29\%; |D(s)|_{s_0} = 3.133; erro_{mag} = 8,42\%$$

3ª Questão (2,0)

Em 5 rad/s:  $10^{(-37,8/20)} = 0,0129$   $1/0,0129 = 77,62 = K_{cr}$



4ª Questão (3,0)

- a) (0,5) Medindo  $K_a$  em 0,01 rad/s:  $K_a = (0.01)^2 * 10^{(59/20)} = 0,0891$   
 $\rightarrow e_{par} = 1 / K_a = 11.2202 \Rightarrow$  Ganho adicional necessário: 10 = 20 dB  $\Rightarrow e_{ss} = 1,122$   
 $\Rightarrow$  redesenhar nova linha de 0 dB (em -20 dB)
- b) (0,5) Em 1 rad/s  $|| = 0$  dB  $\rightarrow MF_{orig} = 30^\circ; M_p \leq 10\% \rightarrow \zeta = 0,58 \rightarrow$   $MF_{desjada} = 58^\circ$   $\Rightarrow$   $\phi_{av} = 58-30+10=38^\circ$ .
- c) (0,5) A partir de 3 rad/s a fase cai acentuadamente, assim  $\omega_c = 2$  rad/s.
- d) (1,0) Elemento PD:  
 Avanço de Fase:  $1+j\omega T = 1+j2T; \tan(38^\circ) = 2T \Rightarrow PD(s) = (1+0,39s)$ .
- e) (0,5) Compensador completo:  $0,39 * 10 * \frac{s+2,56}{s} = 3,9 \frac{(s+2,56)}{s}$

```
for i=0:2;
    if i==0, wc=.5; end
    if i==1, wc=1; end
    if i==2, wc=2; end

    subplot(3,2,i*2+1)
    d4=zpk(-wc/tand(38),0,tand(38)/wc*10)
    g4=zpk([-1],[0 0 -9 -9 -14],100), bode(g4), hold on
    g4=zpk([-1],[0 -9 -9 -14],100); bode(d4); margin(g4*d4);

    subplot(3,2,i*2+2); step(feedback(g4*d4,1))
end
```

