

Nome: \_\_\_\_\_

Matrícula: \_\_\_\_\_

3ª Prova – CONTROLE DE SISTEMAS DINÂMICOS 2023.2

1ª Questão: (3,0) Considere a resposta em frequência  $G(j\omega)$  de um sistema que tem um polo no semi-plano direito.

a) (1,5) Para quais valores de  $-\infty \leq K \leq \infty$ ,

$$T(s) = \frac{KG(s)}{1+KG(s)}$$

é estável (Nyquist)?

[1,627; 562,37]

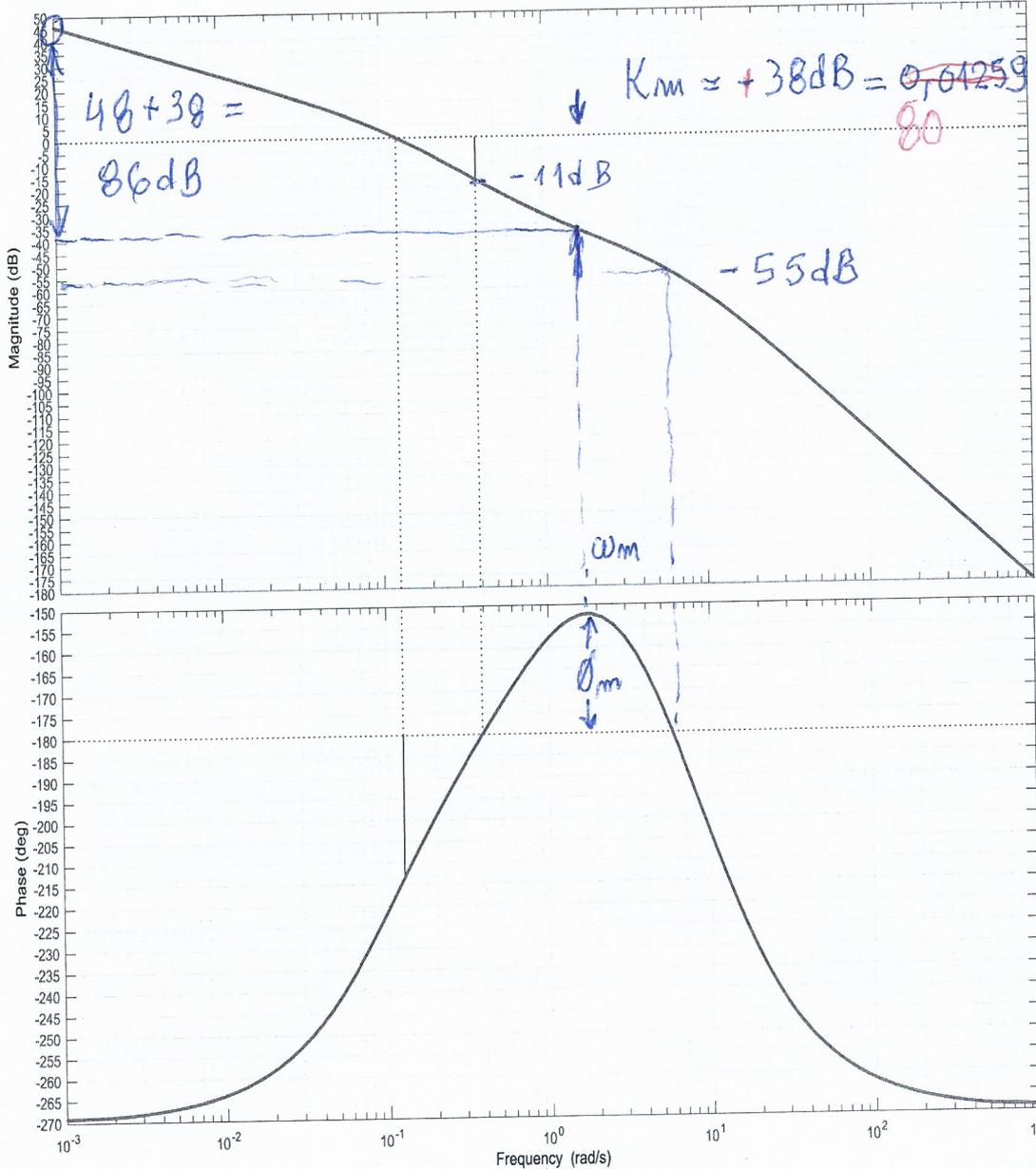
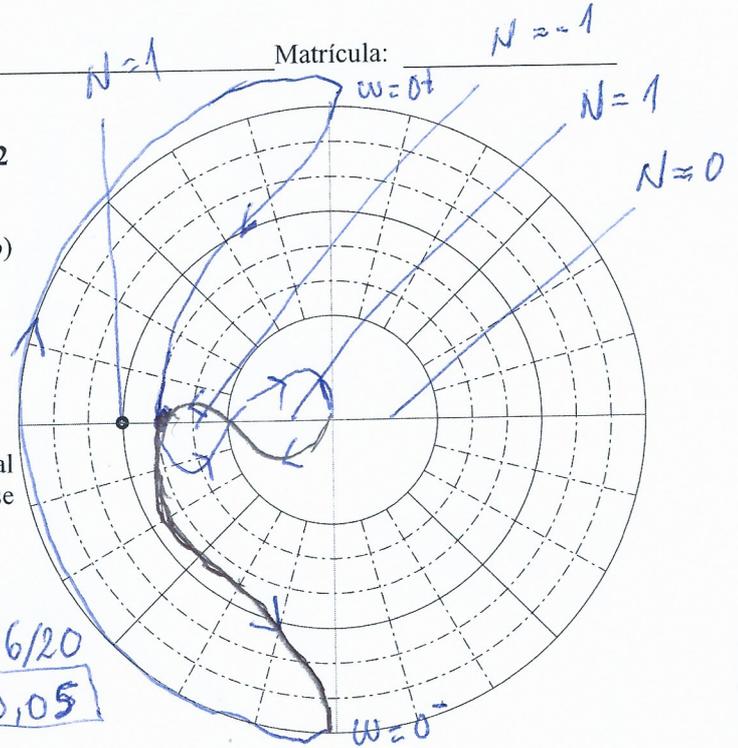
b) (0,5) Projeto de controle proporcional. Para qual valor,  $K_m$ , obtém-se a maior Margem de Fase possível?

$K_m = 0,04259$  (80)

c) (1,0) Em malha fechada, com  $K_m$ , qual o erro a uma rampa unitária de referência?

$$K_v = \lim_{s \rightarrow 0} sG(s) = 10^{-3} \times 10 \times 86/20 = 10^{-3} \times 430 = 0,43$$

$e_{ss} = 0,05$



$-11 \text{ dB} = 0,6144$   
 $-55 \text{ dB} = 0,001778$   
 $\frac{1}{0,6144} = 1,6276$   
 $\frac{1}{0,001778} = 562,366$

2ª Questão: (3,0) Considere o diagrama de Bode de um sistema que não tem, em malha aberta, polos no semi-plano direito. Assumindo-se nesta questão, que a saturação do atuador não permite aumentar a banda passante, projete um controlador por atraso de fase,  $D_{at}(s)$ , para que o sistema apresente, em malha fechada:

- Erro ao degrau unitário, em regime permanente,  $|e_{ss}| \leq 0,01$ ;
- Sobrepasso percentual da resposta ao degrau,  $M_p \leq 20\%$ ;

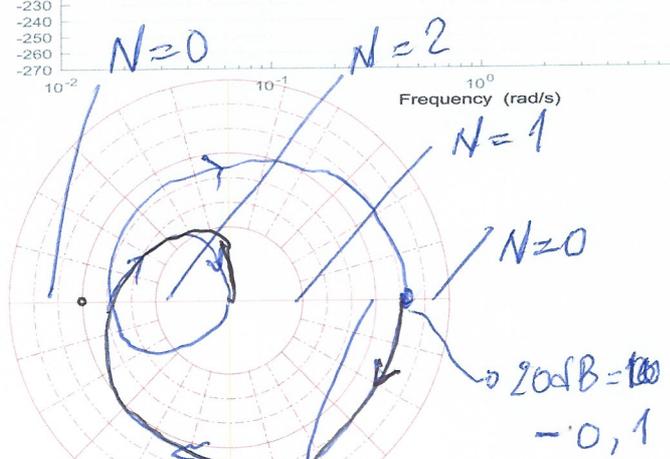
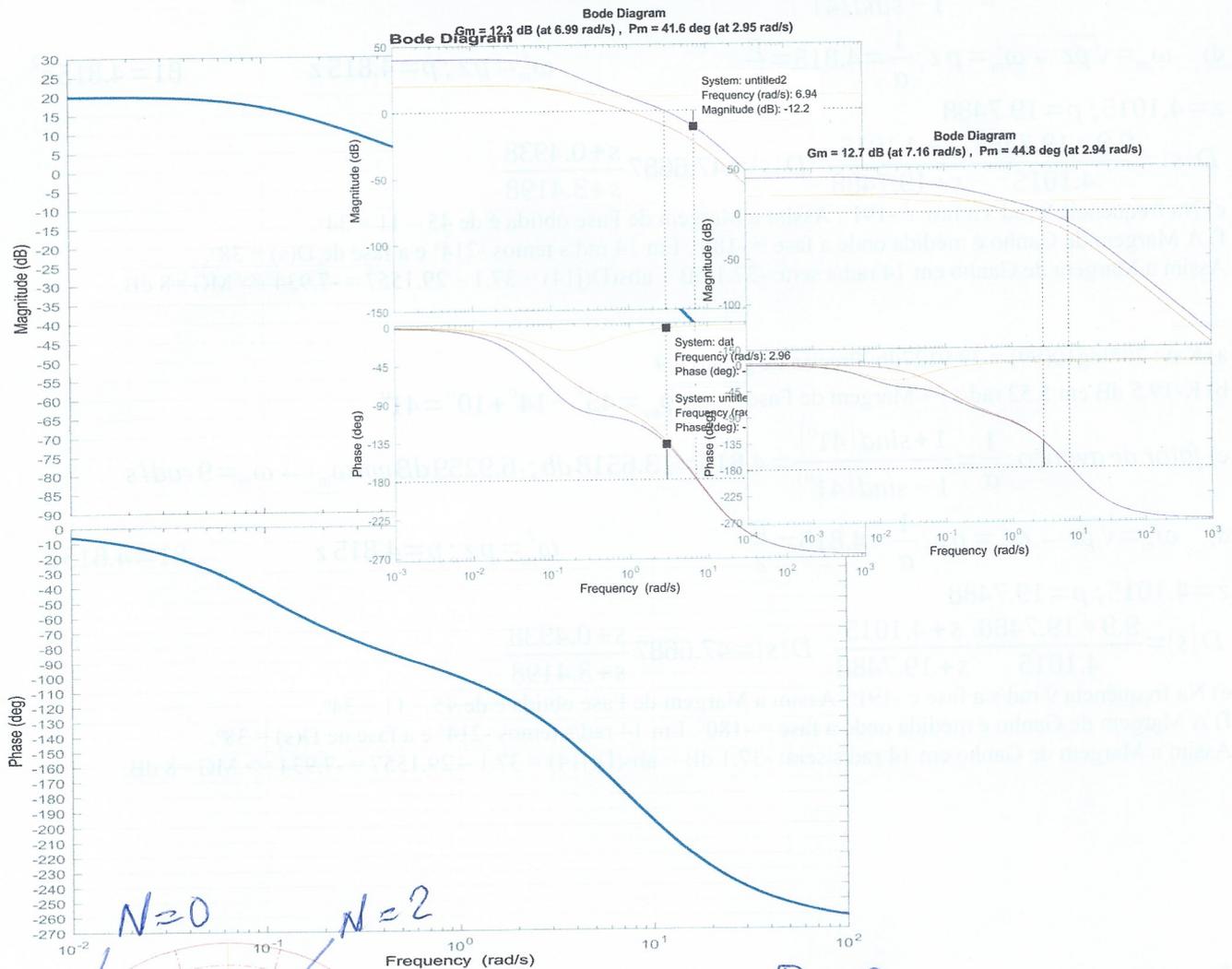
- a) (1,0) Para quais valores de  $-\infty \leq K \leq \infty$ , este sistema é estável (Critério de Nyquist)?
- b) (0,5) Escolha, inicialmente, o ganho em baixas frequências,  $K_{at}$ , para atender a especificação de erro.
- c) (1,0) Para obter a Margem de Fase especificada, acrescente um compensador em atraso,  $\frac{s+z}{s+p}$ .

$-0,1 \leq K \leq 17,78$   
 $19,91 \text{ dB}$

- d) (0,5) Qual Margem de Ganho obtida com o projeto,  $D_{at}(s) = K_{at} \frac{s+z}{s+p}$  ?  $MG: 9 \text{ dB}$  ( $15 \text{ rad/s}$ )

== 39.91 já tem 20 dB faltam 19.91. Nova linha de 0 dB  $\rightarrow MF = 14^\circ$ ; em 2.97 rad/s temos  $45^\circ$  e  $8,9 \text{ dB} = 2.786$  absoluto.  $D(s) = \frac{9.897 * 0.1}{0.2786} \frac{s+0.2786}{s+0.1}$   $D(s) = 3.5524 \frac{s+0.2786}{s+0.1}$  (zero está a 1/10 de  $\omega_m$ ) melhor

$$D(s) = 3.55 \frac{s+0.028}{s+0.01}$$



$P=0$   
Estável  $0 \leq K \leq 17,78$   
 $-0,10 \leq K \leq 0$   
 $-0,1 \leq K \leq 17,78$

**3ª Questão:** (4,0) Considere o mesmo sistema da 2ª questão, assumindo no entanto agora que a banda passante pode ser aumentada. Projete um **controlador por avanço de fase**,  $D(s)$ , para que o sistema presente em malha fechada:

- Erro ao degrau unitário, em regime permanente,  $|e_{ss}| \leq 0,01$ ;
- Sobrepasso percentual da resposta ao degrau,  $M_p \leq 20\%$ ;

- a) (0,5) Escolha, inicialmente, o ganho em baixas frequências,  $K_{av}$ , para atender a especificação de erro.
- b) (0,5) Calcule o avanço de fase necessário  $\phi_{av}$ , considerando uma tolerância de  $10^\circ$ .
- c) (0,5) Para contrapor o ganho do compensador em avanço, obtenha  $\omega_m$ , 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) (1,5) Complete o projeto, calculando  $K$ ,  $z$  e  $p$ .  $D(s) = \frac{K(s+z)}{s+p}$ .
- e) (0,5) Qual a Margem de Fase efetivamente obtida?
- f) (0,5) Qual a Margem de Ganho obtida (procedimento iterativo de busca do novo ponto de  $-180^\circ$ )?

a)  $K_{av} = 20 \cdot \log_{10}(99) = 39.9127 \text{ dB}$ ; Precisa de ganho 9.9

b)  $K = -19.5 \text{ dB}$  em  $5.52 \text{ rad/s} \rightarrow$  Margem de Fase =  $14^\circ$ ;  $\phi_{av} = 45^\circ - 14^\circ + 10^\circ = 41^\circ$

c) *fator de avanço*:  $\frac{1}{\alpha} = \frac{1 + \sin(41^\circ)}{1 - \sin(41^\circ)} = 4.815$  (13.6518 dB); 6.9259 dB em  $\omega_m \rightarrow \omega_m = 9 \text{ rad/s}$

d)  $\omega_m = \sqrt{pz} \rightarrow \omega_m^2 = pz$ ;  $\frac{1}{\alpha} = 4.815 = \frac{p}{z}$   $\omega_m^2 = pz$ ;  $p = 4.815z$   $81 = 4.815z^2$   $z = 4.1015$ ;  $p = 19.7488$

$$D(s) = \frac{9.9 \cdot 19.7488}{4.1015} \frac{s+4.1015}{s+19.7488} \quad D(s) = 47.67 \frac{s+4.1}{s+19.75}$$

e) Na frequência 9 rad/s a fase é  $-191^\circ$ . Assim a Margem de Fase obtida é de  $45 - 11 = 34^\circ$ .

f) A Margem de Ganho é medida onde a fase =  $-180^\circ$ . Em 14 rad/s temos  $-214^\circ$  e a fase de  $D(s) = 38^\circ$ .

Assim a Margem de Ganho em 14 rad/s será:  $-37.1 \text{ dB} + \text{abs}(D(j14)) = 37.1 - 29.1557 = -7.934 \Rightarrow \text{MG} = 8 \text{ dB}$ .

