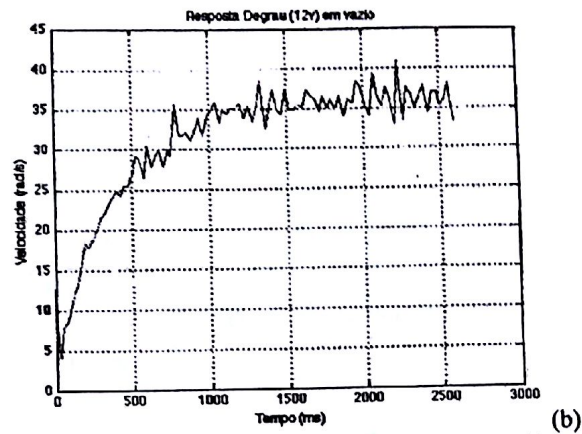
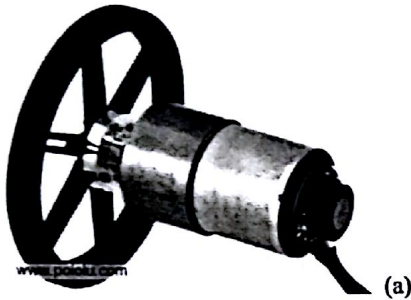


PROVA 2 - PMR2360: Controle e Automação I – 27/11/2014

Prof. Eduardo Aoun Tannuri

Nome: _____ No. USP: _____

Esta prova versa sobre o projeto de um sistema de controle para um moto-reductor DC de 12V, dotado de um encoder. A figura (a) abaixo ilustra o motor com uma roda montada em seu eixo. A figura (b) contém o resultado do ensaio de entrada em degrau (12V) aplicado em $t=0s$. A velocidade foi obtida a partir de um sistema de aquisição de dados.

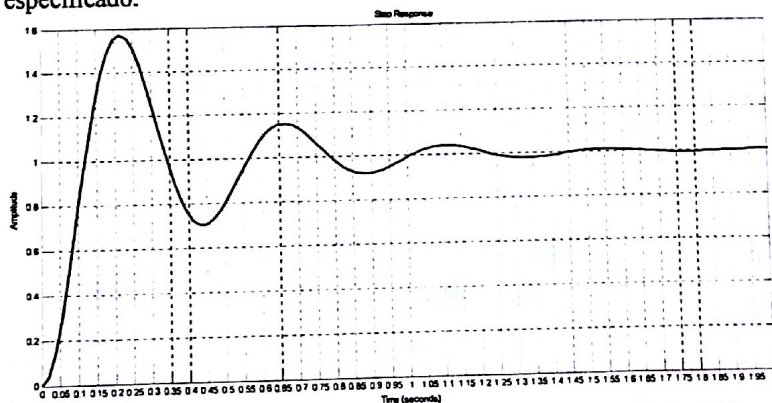


a) (Valor 0,5) Assumindo a simplificação de que a função de transferência do sistema seja da forma $\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{K}{s(Ts+1)}$, sendo $\theta(s)$ o ângulo (em rad) do eixo de saída do moto-reductor e $V(s)$ a tensão aplicada, obtenha os parâmetros K e T . Justifique todos os passos e hipóteses.

A partir deste item, independentemente de ter ou não resolvido o item (a), assumo $\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{2,9}{s(0,3s+1)}$

b) (Valor 1,5) Projete um controlador PD da forma $K_P(1 + T_D s)$ considerando que o sistema deverá possuir, em malha fechada, tempo de estabilização 2% menor que 0,5s e sobressinal menor que 10%. Dica: Utilize o diagrama de polos e zeros e a técnica de lugar das raízes, notando que o controlador apenas introduz um zero ao sistema em malha aberta.

c) (Valor 3,0) O controlador foi implementado com um tempo de amostragem muito rápido (da ordem de 1ms) de forma a garantir que a amostragem e digitalização não influíssem a resposta em malha fechada. Ao testar o servomotor a uma entrada na referência em degrau, obteve-se a resposta abaixo, com sobressinal bem maior que o especificado.



A causa disso é creditada à existência de uma dinâmica elétrica (devido à indutância do motor) desprezada na fase de modelagem e projeto do controlador, do tipo $\frac{1}{T_E s + 1}$. A partir do gráfico acima, estime o valor da constante de tempo elétrica T_E .

d) (Valor 3,0) Projete um compensador de avanço do tipo $\frac{Kc(1+Ts)}{(1+\alpha Ts)}$ para pelo método da resposta em frequência, tendo como requisito erro estático de velocidade de $K_v=20$ e margem de fase de 45° . O gráfico de Bode da função $\frac{\theta(s)}{V(s)} = \frac{2,9}{s(0,3s+1)}$ é dado na figura em anexo, sendo que todas as informações necessárias para o projeto do compensador podem ser obtidas diretamente a partir deste gráfico. Você pode destacar, colocar o nome e anexar o gráfico na sua folha de respostas.

2) Projete um compensador que mantenha a margem de ganho do sistema $\frac{(10)}{s(s^2+2s+1)}$ e garanta erro para entrada na referência em rampa em regime 5 vezes menor do que a simples realimentação unitária.

GABARITO

1) a) $\frac{\Omega(s)}{V(s)} = \frac{K}{Ts+1}$ com $K = \frac{35 \text{ rad/s}}{12V} = 2,9 \text{ rad/s/V}$

$$\Sigma(\zeta) = 0,632 \times 35 = 22,2 \text{ rad/s} \Rightarrow \text{puls. gr. fix}$$
$$\zeta = 0,3 \text{ s (300 ms)}$$

$$\Rightarrow \frac{f(s)}{v(s)} = \frac{29}{s(0.3s+1)} \quad \downarrow$$

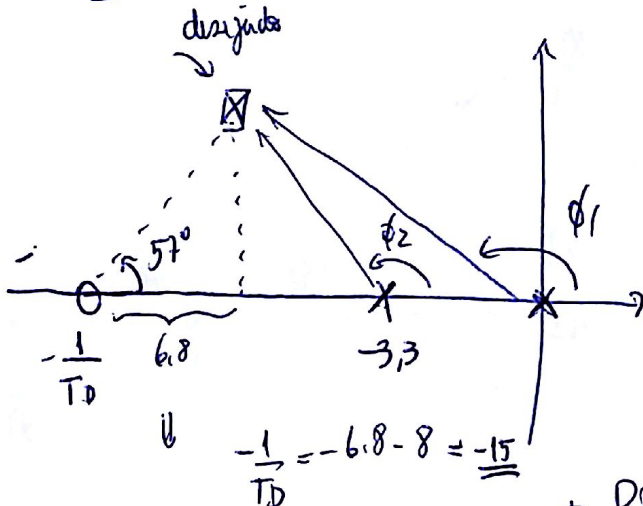
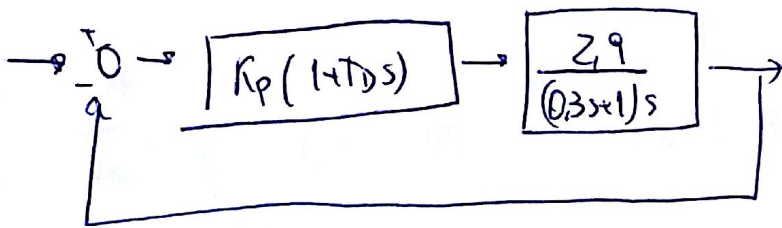
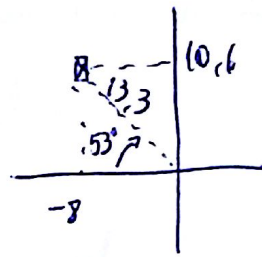
↑ integrador

$$b) \quad t_s = 0,5s \Rightarrow \frac{4}{\zeta \omega_n} = 0,5 \Rightarrow \zeta \omega_n = 8$$

$$M_p \leq 10\% \Rightarrow \zeta = 0,6 \quad \text{polos disyados} = -8 \pm j10,6$$

$$\exp\left(\frac{-\pi \zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right) = 0,1$$

$$\frac{\pi \zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}} = 2,3$$



$\phi_1 = 123^\circ$ cond. fuse
 $\phi_2 = 114^\circ$

$$\Rightarrow -\phi_1 - \phi_2 + \theta = -180^\circ$$

$$\theta = 57^\circ$$

Coord. modules

$$-\frac{1}{T_D} = -6.8 - 8 = \underline{\underline{-15}}$$

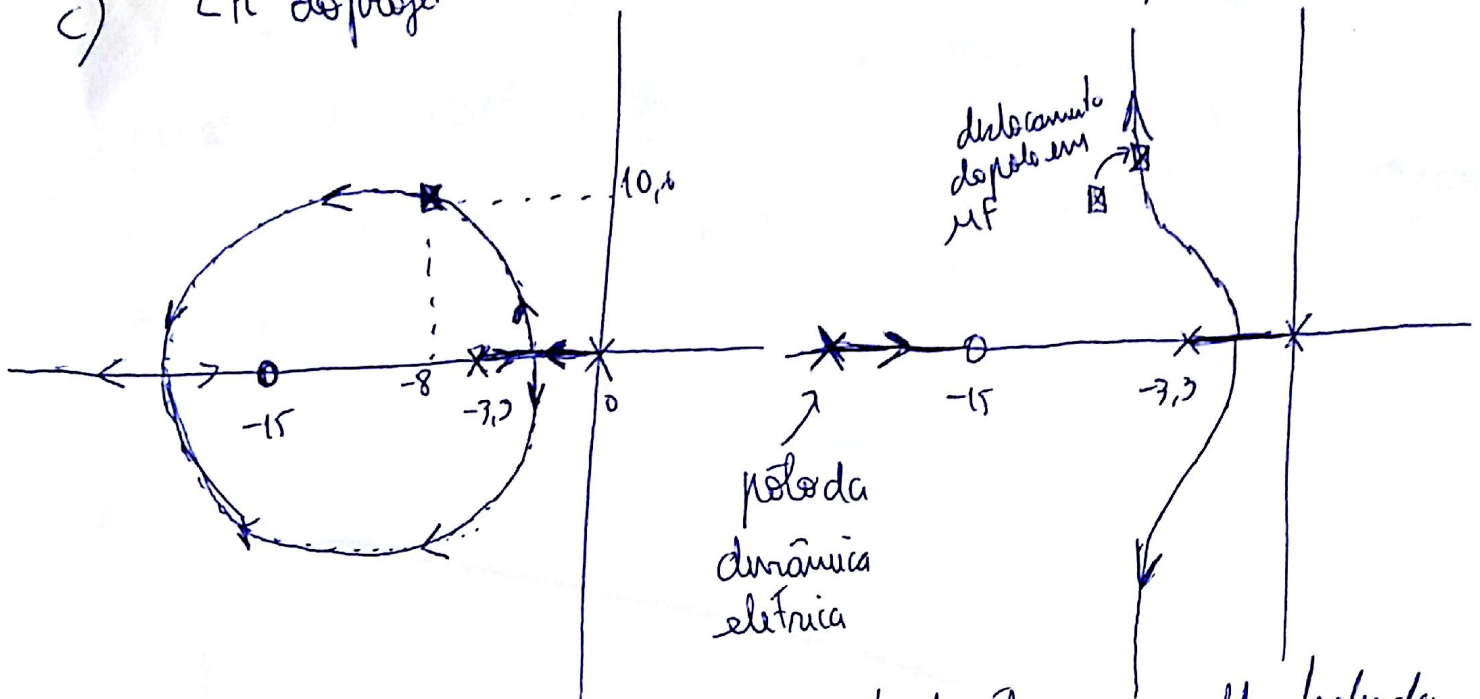
$$T_D = \underline{\underline{0.067s}}$$

$$\Rightarrow PD = K_p (1 + 0,067s)$$

$$\left| K_p (1 + 0.1067s) \cdot \frac{29}{(0.35s + 1)s} \right|_{s = -8 \pm 10.6j} = 1 \rightarrow K_p = 18.75$$

c) LR do projeto

LR considerando pólo eletrônico



O pólo eletrônico causa um deslocamento do pólo em malha fechada.
 pelo gráfico da resposta temporal ao degrau:

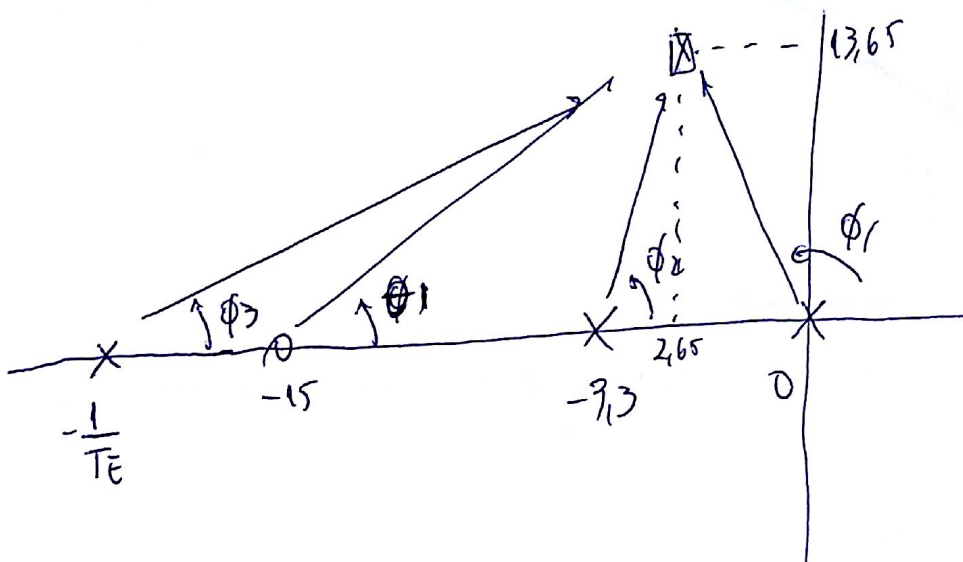
$$M_p \approx 55\%$$

$$T_m \approx 0,65 - 0,2 = 0,45s$$

$$\Rightarrow \zeta = 0,2$$

$$\omega_n = 13,92$$

$$\Rightarrow \text{polo dominante} = -2,65 \pm j13,65$$



$$\phi_1 = 101^\circ$$

$$\phi_2 = 87^\circ \Rightarrow \phi_3 = 39^\circ$$

$$\theta_1 = 47^\circ$$

obtem-se a posição
do pólo eletrônico

$$\frac{1}{T_E} = 19,5$$

$$\boxed{T_E = 0,05s}$$

d) $\lim_{s \rightarrow 0} s \cdot K_c \cdot G(s) = 20 \Rightarrow K_c = 6,9$

$$G_c = K_c \cdot \frac{1+Ts}{1+\alpha Ts}$$

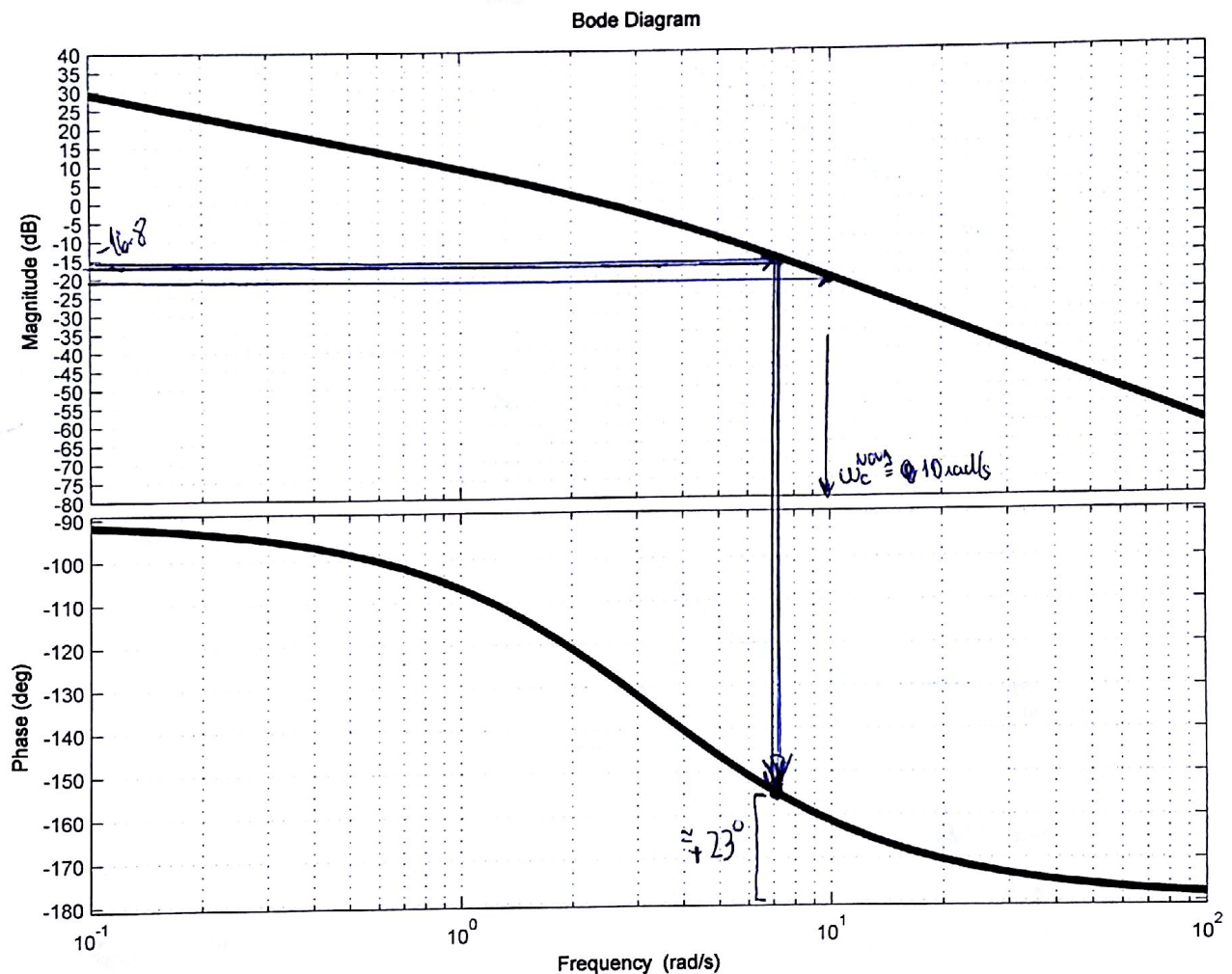
MF atual de $K_c \cdot G(s) \approx +23^\circ$ (do gráfico)

$20 \log 6,9 = 16,8 \text{ dB}$

gráficos de Bode de $K_c \cdot G(s)$ e da figura abaixo deslocado 16,8 dB para cima.

MF nova = $45^\circ \Rightarrow$ amplitude $45 - 23 + 16 = 28^\circ$

$\Rightarrow \text{sen } \phi_m = \frac{1-\lambda}{1+\lambda} \Rightarrow \lambda = 0,36$



nova $\omega_c \Rightarrow$ ω em que o ganho é $-20 \log \frac{1}{\sqrt{2}} = 4,43 \text{ dB}$

\Downarrow

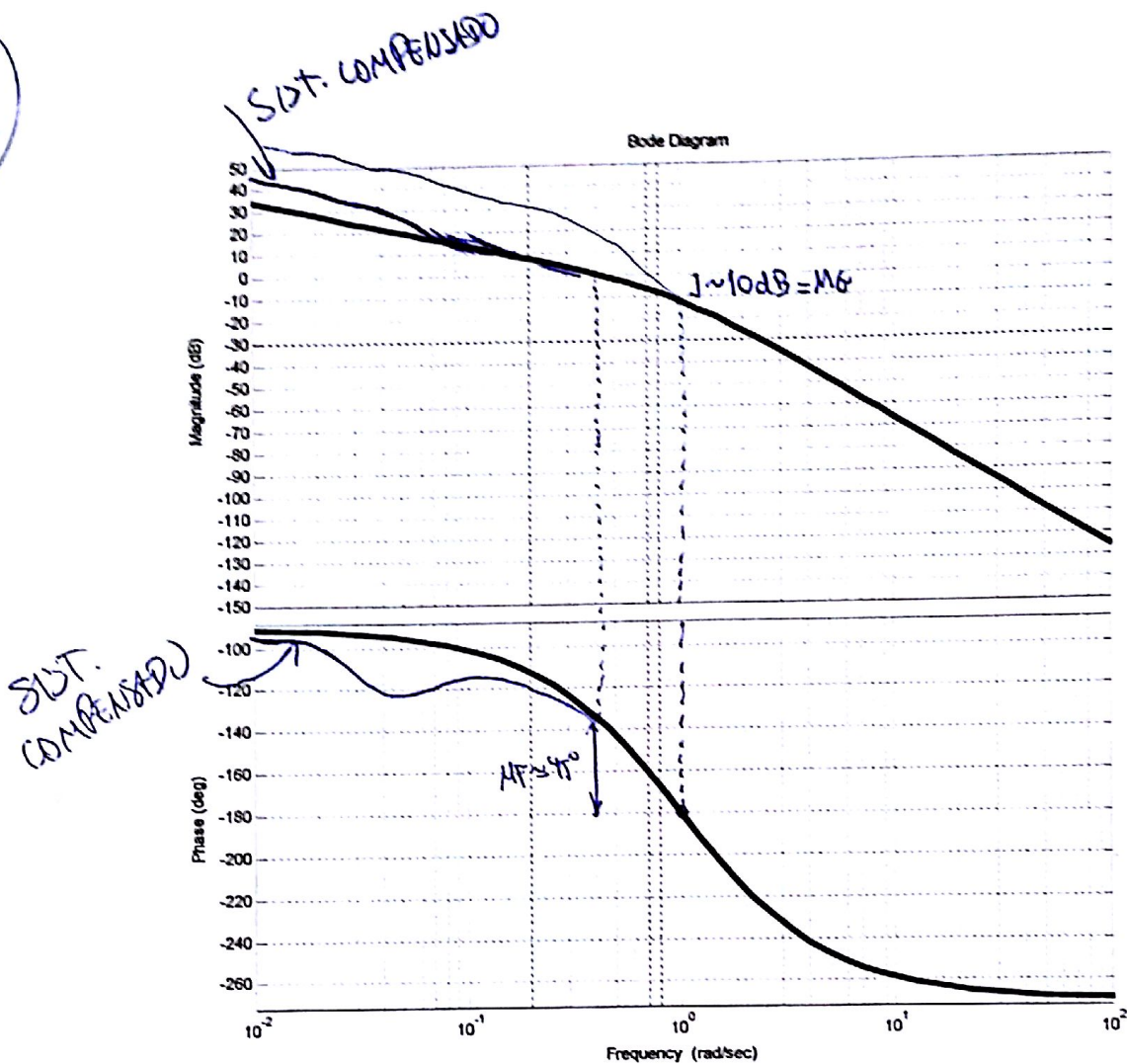
$\frac{1}{\sqrt{2} \cdot T} = 10 \Rightarrow T = 0,166$

$\Rightarrow G_c(s) = 6,9 \cdot \frac{1+0,166s}{1+0,06s}$

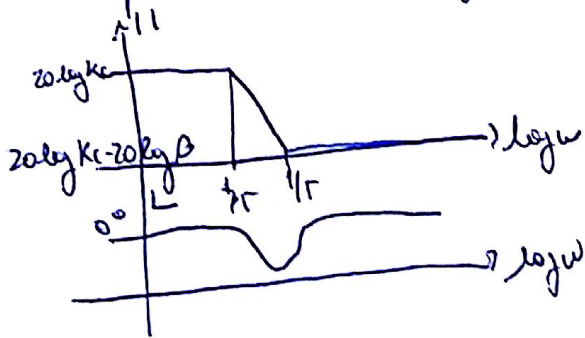
$\omega_c \text{ nova} = 10 \text{ rad/s}$

parâmetros gráficos considerados $\neq 16,8 \text{ dB} = -21,23 \text{ dB}$

(2)



compensados de atraso. aumentar o ganho em baixas frequências e manter o comportamento em freq. médias e altas $G_c = K_c \cdot \frac{1+Ts}{1+P Ts}$ $\beta > 1$



O ganho $K_c = 5$ para prover aumento de 5 vezes no ganho em baixas freq. e reduzir o erro estacionário em 5. Além disso $K_c = \beta$ para garantir ganho = 0dB em freq. médias e altas

o parâmetro T deve ser grande para não influenciar a fase na região de

$$\omega_c \approx 0,4 \text{ rad/s} \Rightarrow \frac{1}{T} \approx \frac{1}{10} \cdot 0,4 \Rightarrow T = 25 \Rightarrow$$

$$K_c = 5 \cdot \frac{1+2Ts}{1+12Ts}$$