- Estabilidade interna nominal ?

    - Polos de malha fechada:

        $-6{,}0574$

        $-0{,}1246 \pm j\,0{,}5609$

    - Não há cancelamento entre polos e zeros no SPDF

    - Conclusão: Estável

- LGR

    - Ver figura

    - $\xi = 0{,}2239$

- Validação do projeto.

    - Modelo "real" para a simulação com:

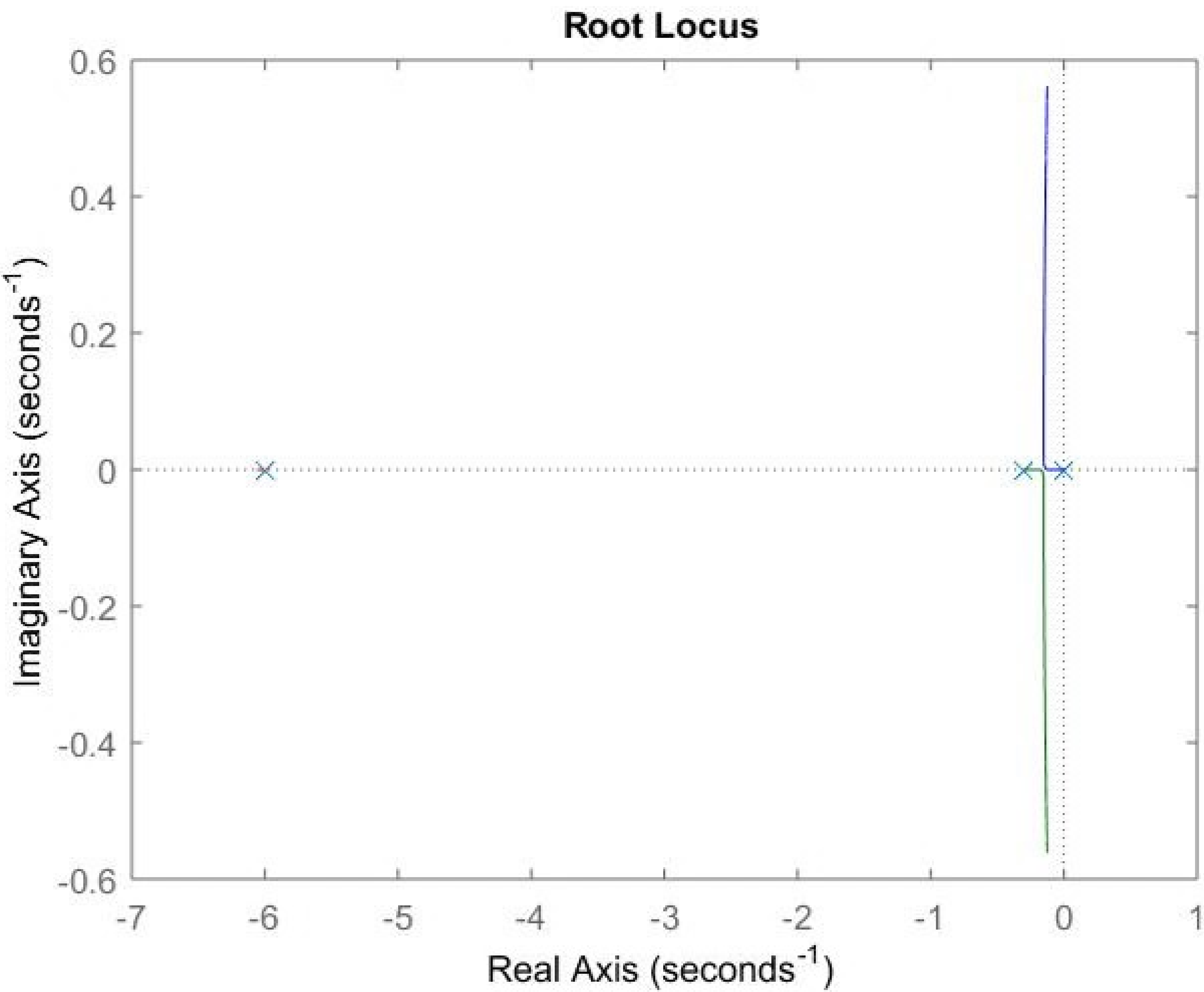
        - dinâmica torcional do eixo

        - J_L: mínimo, médio e máximo

    - Rejeição de perturbação

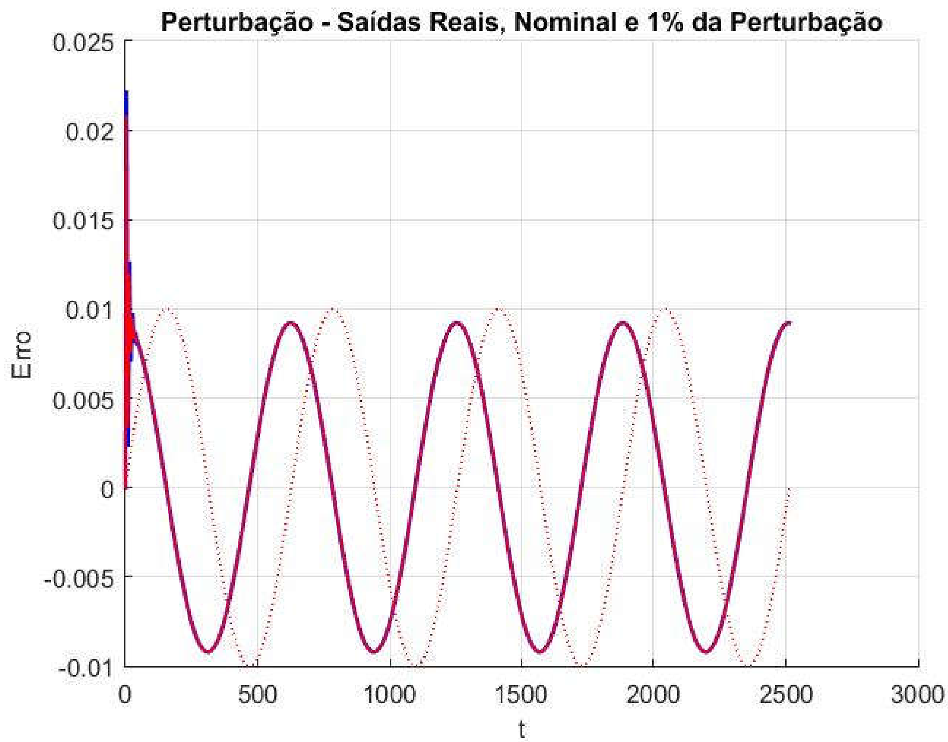
        - $d(t) = 1\,\mathrm{sen}(\omega_d t)$ $\quad(\omega_d = 0{,}01\ \mathrm{rad/s})$

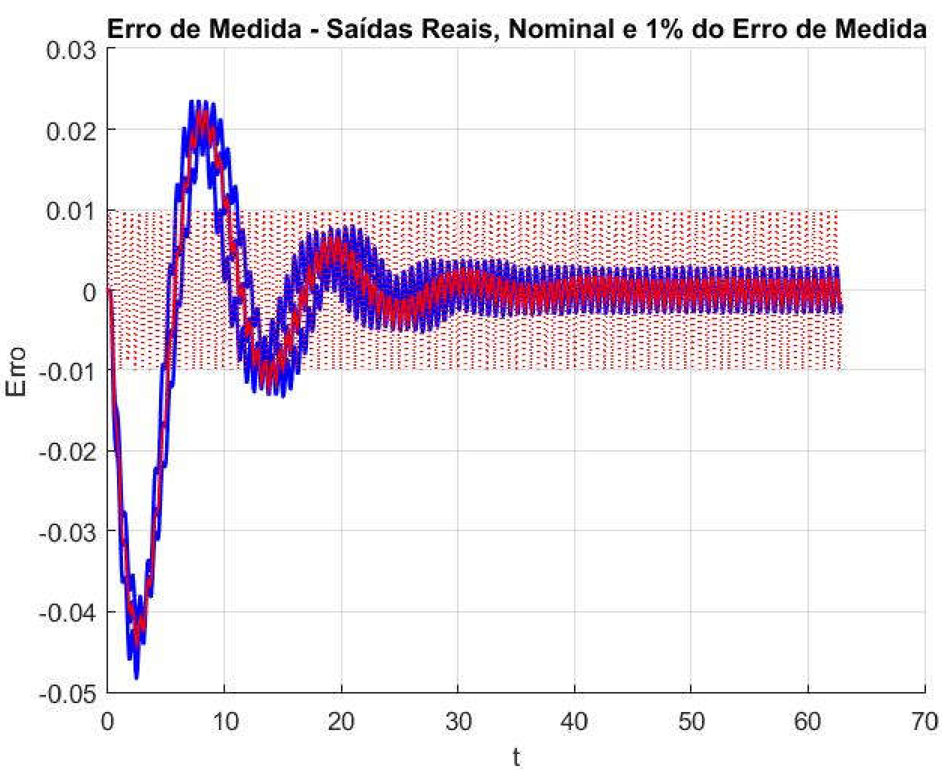
spiral


Root Locus
Imaginary Axis (seconds^{-1})
Real Axis (seconds^{-1})
0.6
0.4
0.2
0
-0.2
-0.4
-0.6
-7
-6
-5
-4
-3
-2
-1
0
1

- Ver figura
    - Azul → 3 sistemas "reais"
    - Vermelho → nominal
    - Pontilhado → $d(t)/100$

- Rejeição do erro de medida
    - $n(t) = 1 \operatorname{sen}(\omega_n t)$ $(\omega_n = 10 \text{ rad/s})$
    - Ver figura
        - Azul → 3 sistemas "reais"
        - Vermelho → nominal
        - Pontilhado → $n(t)/100$
    - Observação
        - Em regime estacionário a amplitude de $y(t)$ é visivelmente inferior a 1% de $n(t)$ porque para $\omega = 10$, $|G(j\omega)K(j\omega)|$ está $\simeq 11$ dB abaixo da barreira (atenuação adicional de 0,28).


Perturbação - Saídas Reais, Nominal e 1% da Perturbação
0.025
0.02
0.015
0.01
0.005
0
-0.005
-0.01
Erro
0
500
1000
1500
2000
2500
3000
t


Erro de Medida - Saídas Reais, Nominal e 1% do Erro de Medida
0.03
0.02
0.01
0
-0.01
-0.02
-0.03
-0.04
-0.05
Erro
0
10
20
30
40
50
60
70
t

5.8.3 - ESCOLHA DO PRÉ-FILTRO PARA COMPATIBILIDADE COM A MALHA FECHADA

- $K(s)$: o mesmo do exemplo anterior, projetado para: i) estabilidade robusta; ii) rejeição de perturbação robusta; iii) rejeição robusta do erro de medida

$$K(s) = \frac{2.5}{\frac{s}{6} + 1}$$

- $r(s) = \frac{1}{s} \Rightarrow y(t)$ conforme a figura

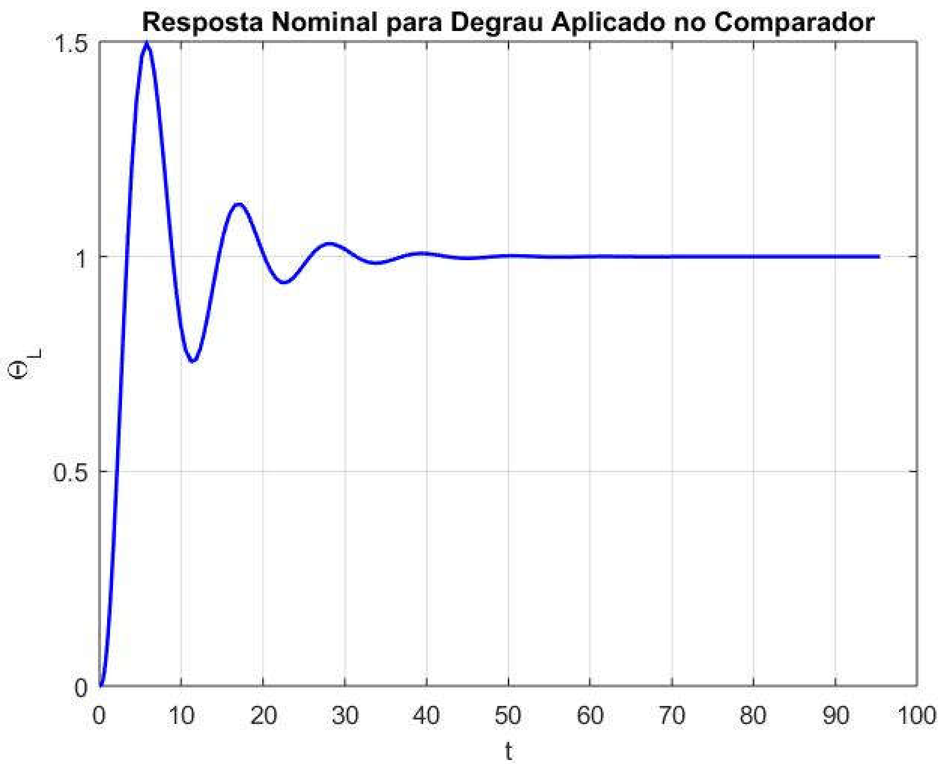
  $M_p = 50\%$ muito alto

  Deseja-se $M_p \leq 5\%$

- Definição do pré-filtro.

$$F(s) = \frac{\omega_N^2}{s^2 + 2\xi\omega_N s + \omega_N^2}$$

- $\xi = 0{,}7 \Longrightarrow M_p = 4{,}3\% \Longrightarrow$ ok!
- $\omega_N = ?$



Resposta Nominal para Degrau Aplicado no Comparador
1.5
1
0.5
0
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
t
Θ_L

- **Escolha de ω_N**

  - Critério: mínimo tempo de acomodação

    $$t_s(2\%) \simeq \frac{4}{\xi \omega_N} \Rightarrow \omega_N \text{ máximo}$$

  - Robustez da compatibilidade entre o pré-fitro e a malha fechada:

    $$\boxed{|F(j\omega)[T(j\omega)-1]| \leq [1-\ell_m(\omega)]\,\delta_F(\omega)} \qquad (\omega \leq \omega_b)$$

  - Problemas:

    - $\omega_b = ?$

    - $\delta_F(\omega) = ?$

  - 1ª Tentativa de $\delta_F(\omega)$

    - $\delta_F(\omega) = 0,1$

  - Escolha de ω_b

    - Suponhamos que p/ $\omega = \omega_b$,

      $|F(j\omega_b)| = 0,1 = -20\text{ dB}$

      isto é, as frequências que o pré-filtro deixa passar "sem distorção" são aquelas para as quais $|F(j\omega)| \geq 0,1$

- Para um sistema de 2ª ordem com

$\xi = 0{,}7$:

$$F(s) = \frac{\omega_N^2}{s^2 + 1{,}4\,\omega_N s + \omega_N^2}$$

$$|F(j\omega_b)| = 0{,}1 \Rightarrow \omega_b \simeq 3\omega_N$$

- Portanto o problema se reduz a:

$$\omega_N = ?$$

- Veja figura com gráficos de

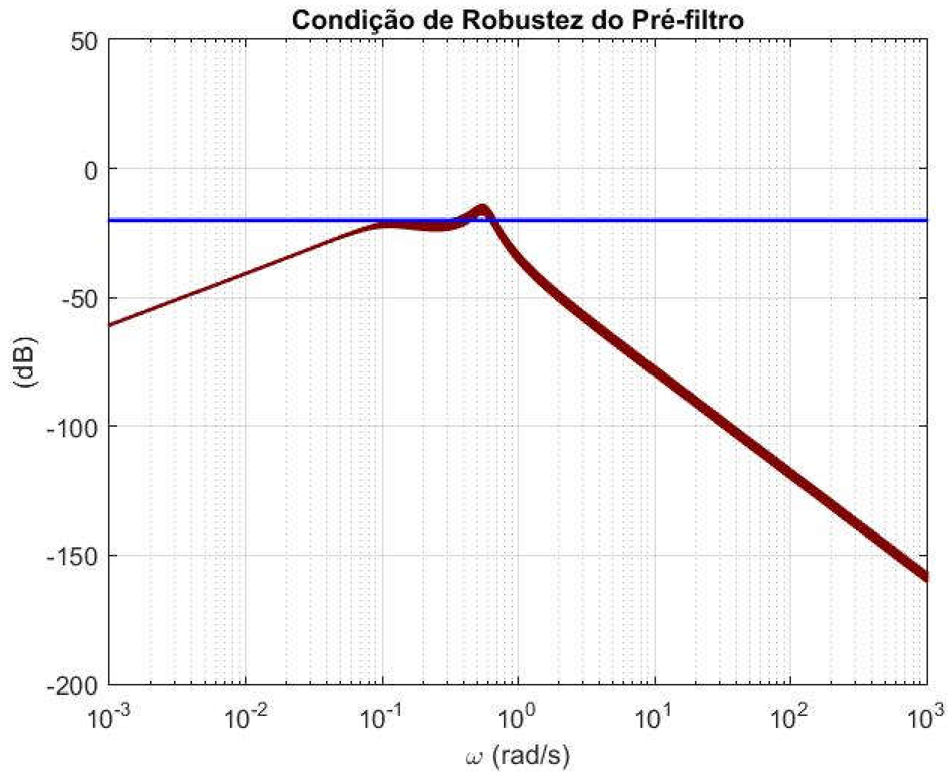
$$\frac{|F(j\omega)|\,|T(j\omega) - 1|}{1 - \ell_m(\omega)}$$

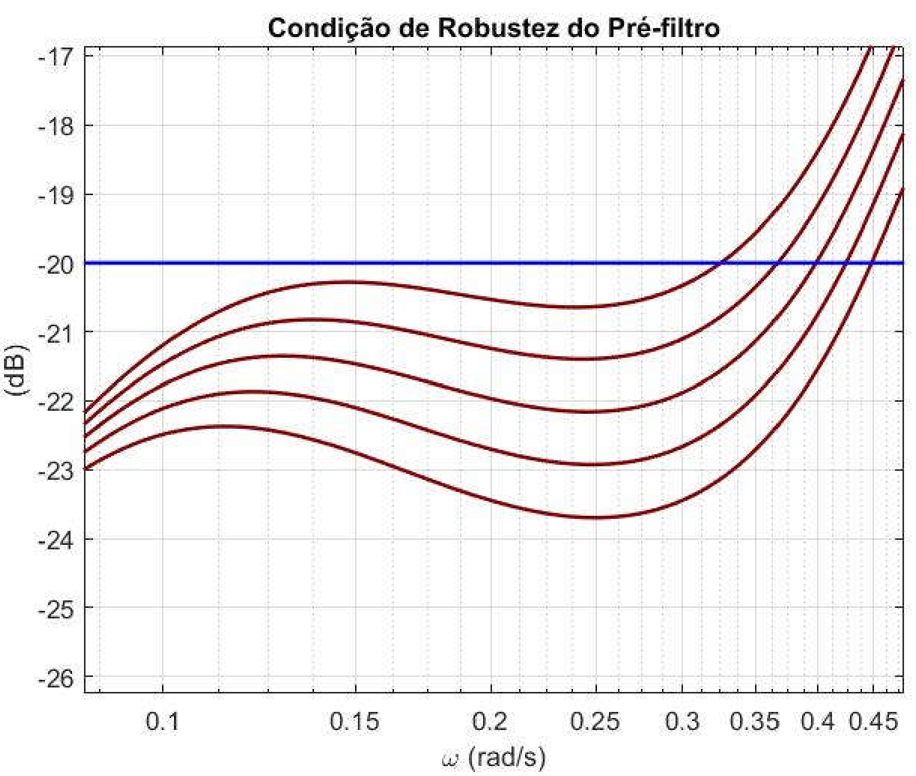
para 5 valores de ω_N uniformemente espaçados, em escala logarítmica entre 0,10 e 0,12, isto é,

0,10 0,1047 0,1095 0,1147 e 0,12

(intervalo [0,10 0,12] obtido após algumas tentativas!)

- Veja figura com zoom p/ $0{,}1 \leq \omega \leq 0{,}45$ rad/s


Condição de Robustez do Pré-filtro
50
0
-50
-100
-150
-200
(dB)
10^{-3}
10^{-2}
10^{-1}
10^{0}
10^{1}
10^{2}
10^{3}
ω (rad/s)


Condição de Robustez do Pré-filtro
-17
-18
-19
-20
-21
-22
-23
-24
-25
-26
(dB)
0.1
0.15
0.2
0.25
0.3
0.35
0.4
0.45
ω (rad/s)

- A curva correspondente a

$$\omega_N = 0{,}12 \text{ rad/s}$$

é a mais próxima de -20 dB, mas ainda abaixo de -20 dB.

- Assim:

$$\omega_b = 0{,}36 \text{ rad/s}$$

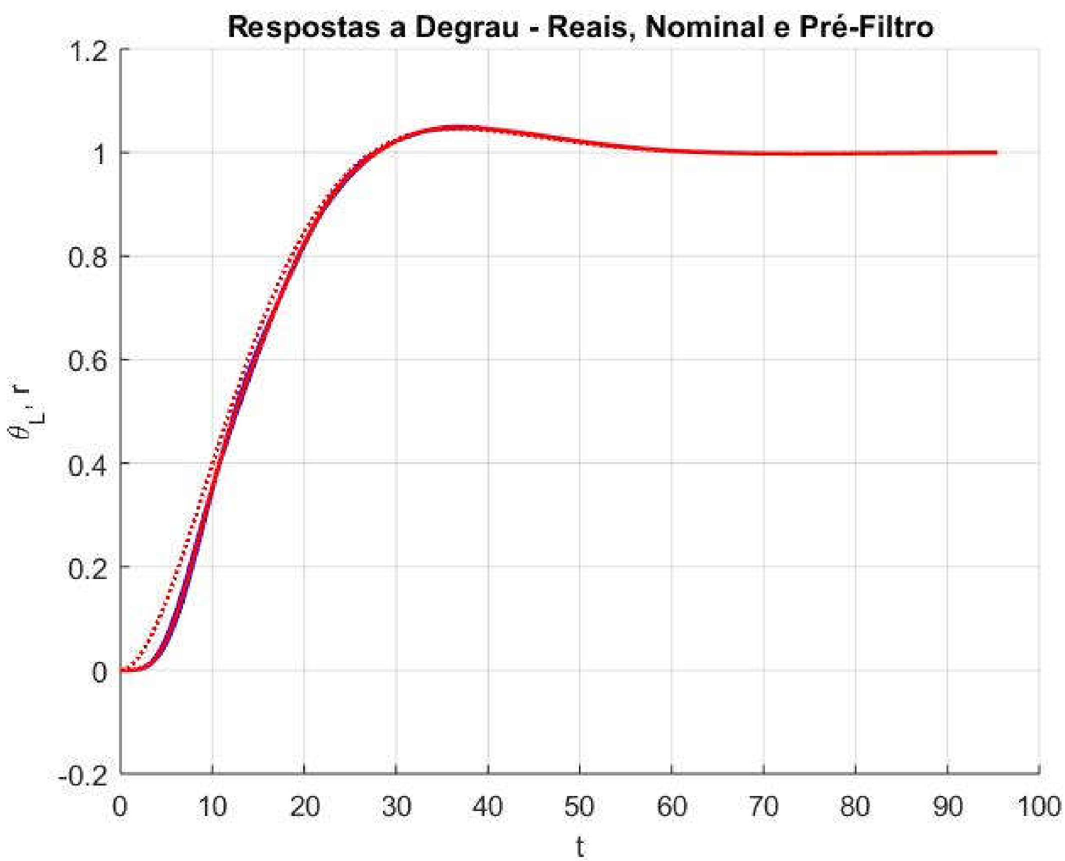
- Validação do projeto

- Modelo "real" para a simulação com:
  - dinâmica torcional do eixo
  - J_L: mínimo, médio e máximo

- Resposta a degrau unitário → Ver figura
  - Azul → 3 sistemas "reais"
  - Vermelho → nominal
  - Pontilhado → resposta do pré-filtro

- Considerando que os resultados sejam satisfatórios, não refinamos o projeto por meio de ajustes nas variáveis

spiral


Respostas a Degrau - Reais, Nominal e Pré-Filtro
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
-0.2
θ_L, r
0
10
20
30
40
50
60
70
80
90
100
t

- Para completar a validação

  - sistema "real"

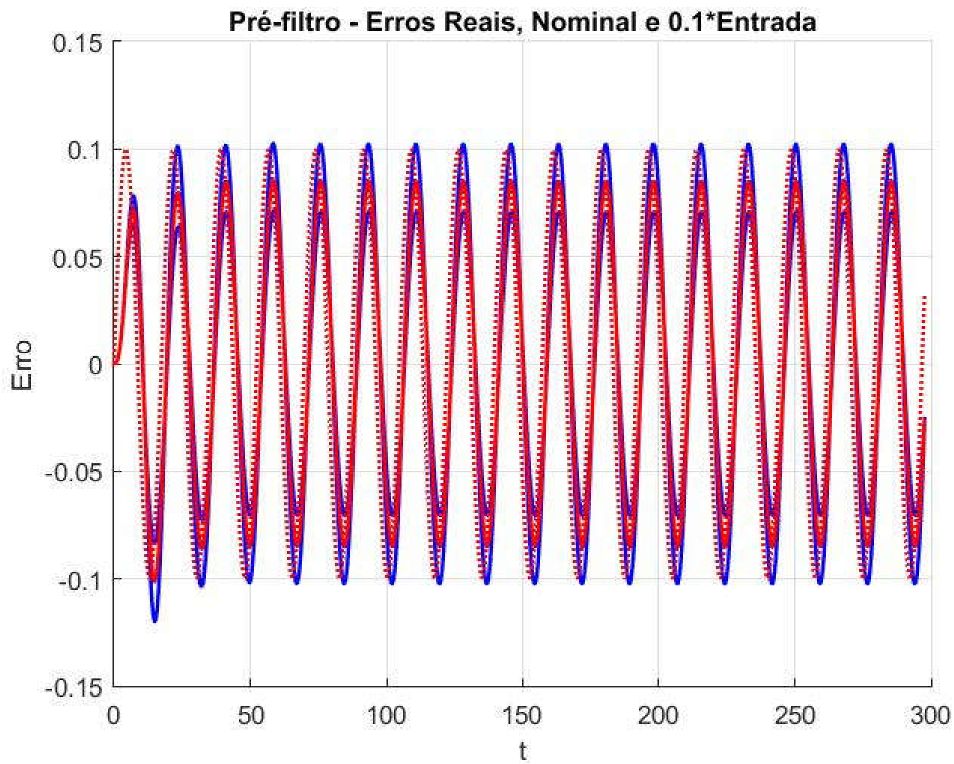
  - $r_1(t) = 1 \operatorname{sen}(\omega_b t)$ $(\omega_b = 0{,}36 \text{ rad/s})$

- Resposta: erro na saída do comparador

  - Azul → 3 sistemas "reais"

  - Vermelho → nominal

  - Pontilhado → $0{,}1\, r_1(t)$


Pré-filtro - Erros Reais, Nominal e 0.1*Entrada
Erro
t
0.15
0.1
0.05
0
-0.05
-0.1
-0.15
0
50
100
150
200
250
300

5.8.4 - PROJETO DA MALHA FECHADA PARA COMPATIBILIDADE COM O FILTRO

- Dado o pré-filtro:

$$F(s) = \frac{\omega_N^2}{s^2 + 2\xi\omega_N s + \omega_N^2}$$

$$\omega_N = 0{,}12 \text{ rad/s} \qquad \xi = 0{,}7$$

- Especificações de projeto

  - rejeição de perturbação

$$\delta_d = 0{,}01 \qquad \omega_d = 0{,}01 \text{ rad/s}$$

  - rejeição do erro de medida

$$\delta_n = 0{,}01 \qquad \omega_n = 10 \text{ rad/s}$$

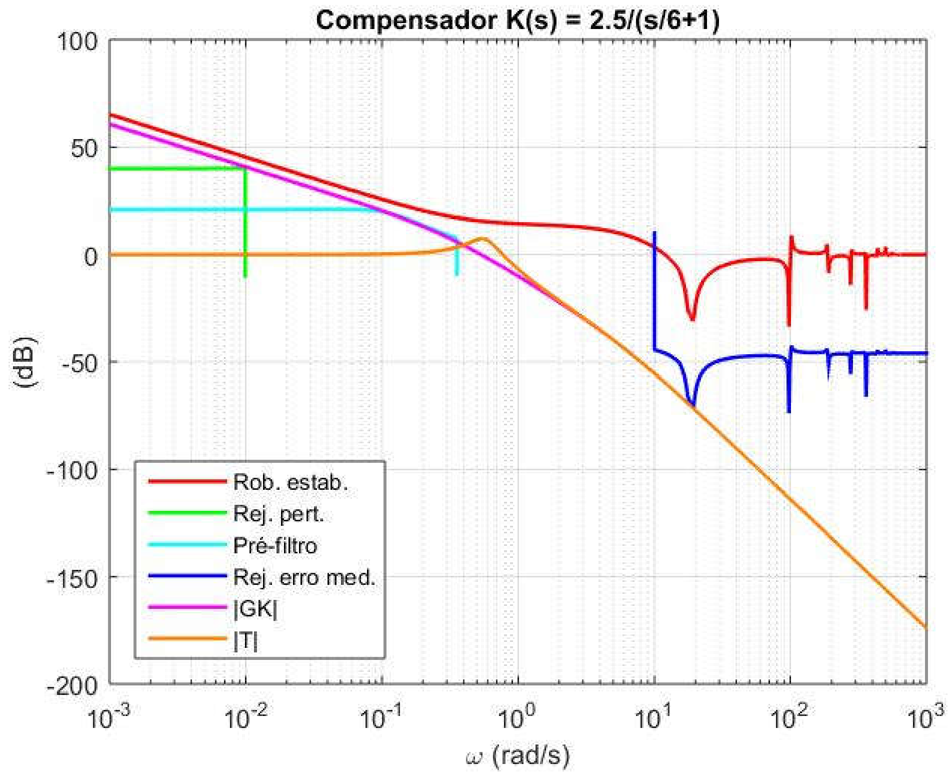
- Constatação

  - dos dois exemplos anteriores

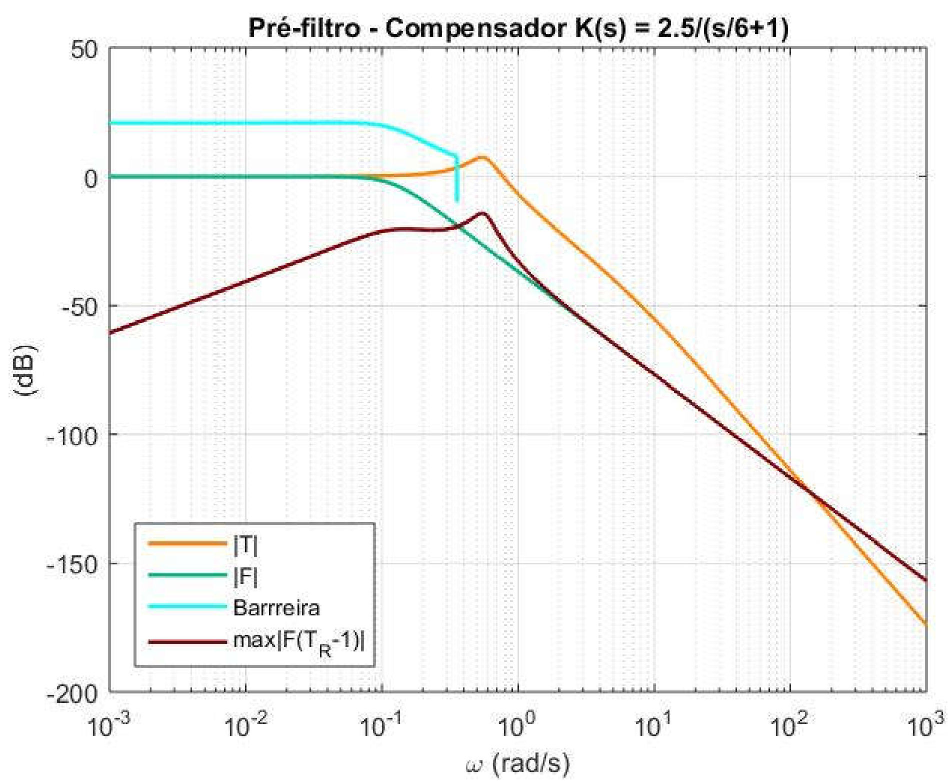
$$K(s) = \frac{2.5}{\frac{s}{6} + 1}$$

resolve o problema!

  - Ver figura



Compensador K(s) = 2.5/(s/6+1)
100
50
0
-50
-100
-150
-200
(dB)
10^{-3} 10^{-2} 10^{-1} 10^{0} 10^{1} 10^{2} 10^{3}
ω (rad/s)
Rob. estab.
Rej. pert.
Pré-filtro
Rej. erro med.
|GK|
|T|



Pré-filtro - Compensador K(s) = 2.5/(s/6+1)
50
0
-50
-100
-150
-200
(dB)
10^{-3} 10^{-2} 10^{-1} 10^{0} 10^{1} 10^{2} 10^{3}
ω (rad/s)
|T|
|F|
Barrreira
max|F(T_R-1)|