EA722 - Laboratório de Controle e Servomecanismos

Controle Não Colocado

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação
Universidade Estadual de Campinas

2^o Semestre 2017

Controle não-colocado

- Da experiência 4 para os sistemas retilíneo e torcional:
  - o controle colocado é efetivo no controle da posição do primeiro elemento (carro #1 (x_1) ou disco #1 (θ_1)),
  - do ponto de vista do controle do segundo elemento (carro #2 (x_2) ou disco #2 (θ_2)), a estratégia de alto ganho mostrou-se inadequada,
  - o controle da posição do elemento #2 através apenas da realimentação de x_1 (ou θ_1) leva a uma estratégia de baixos ganhos.

- Proposta a ser estudada controle não-colocado

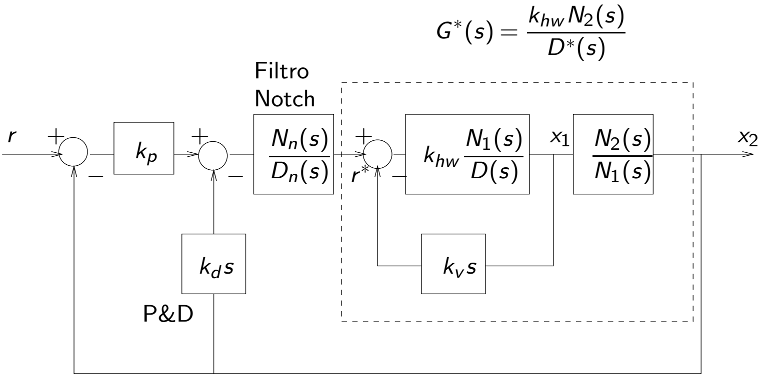
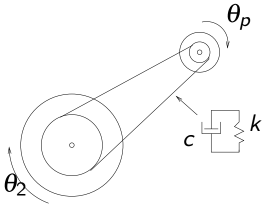


Figura: Diagrama para controle não-colocado.

- **Emulador**: dois discos, de tração e de carga, conectados através da correia flexível:



Funções de transferência em malha aberta:

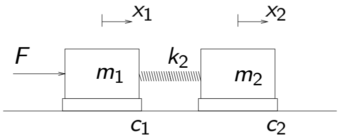
$$\frac{\theta_1(s)}{T(s)} = k_{hw}\frac{N_1(s)}{D(s)}, \qquad \frac{\theta_2(s)}{T(s)} = k_{hw}\frac{N_2(s)}{N_1(s)},$$

$$\begin{aligned} N_1(s) &= J_\ell s^2 + c_2 s + k, \quad N_2(s) = k_{hw} k/g_r \\ D(s) &= J_d^* J_\ell s^4 + (c_2 J_d^* + c_1 J_\ell)s^3 + [(J_d^* + J_\ell g_r^{-2})k + c_1 c_2]s^2 \\ &\quad + (c_1 + c_2 g_r^{-2})ks \end{aligned}$$

Onde,

J_ℓ	inércia total no disco de carga
J_p	inércia do pino SR
$g_r = 4, \quad g_r' = 2$	relação de velocidades 4 : 1
k	constante elástica da correia flexível
k_{hw}	ganho de hardware
$c_1, \quad c_2$	coeficientes de atrito viscoso nos discos
$J_d^* = J_d + J_p(g_r')^{-2}$	inércia total no disco de atuação

- **Retilínio:** dois carros conectados por uma mola de dureza média:



Funções de transferência de malha aberta:

$$\frac{X_1(s)}{T(s)} = \frac{N_1(s)}{D(s)}, \qquad \frac{X_2(s)}{T(s)} = \frac{N_2(s)}{D(s)}$$

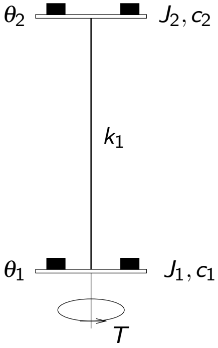
$$N_1(s) = m_2 s^2 + c_2 s + k_2, \quad N_2(s) = k_{hw} k_2$$

$$D(s) = m_1 m_2 s^4 + (c_1 m_2 + c_2 m_1) s^3 + [(m_1 + m_2) k_2 + c_1 c_2] s^2 + \\ + (c_1 + c_2) k_2 s$$

onde,

m_1, m_2	massa dos carros
c_1, c_{m2}	coeficientes de atrito dos carros
k	constante de mola
k_{hw}	ganho de hardware

- **Torsional**: dois discos conectados pela mola torcional, com pesos adicionais:



Funções de transferência de malha aberta:

$$\frac{\theta_1(s)}{T(s)} = \frac{N_1(s)}{D(s)}, \qquad \frac{\theta_2(s)}{T(s)} = \frac{N_2(s)}{D(s)}$$

$$N_1(s) = J_2 s^2 + c_2 s + k_1, \quad N_2(s) = k_{hw} k_1$$
$$D(s) = J_1 J_2 s^4 + (c_1 J_2 + c_2 J_1) s^3 + [(J_1 + J_2) k_1 + c_1 c_2] s^2 + \\ + (c_1 + c_2) k_1 s$$

onde

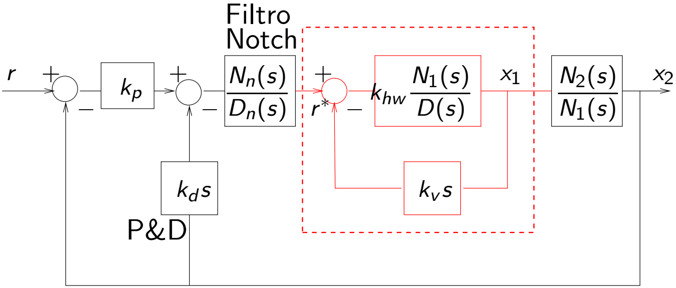
$J_1, \quad J_2$	momento de inércia total nos discos 1 e 2
$c_1, \quad c_2$	coeficientes de atrito viscoso dos discos
k_1	constante torcional da mola
k_{hw}	ganho de hardware

$\longrightarrow$ os três sistemas são análogos

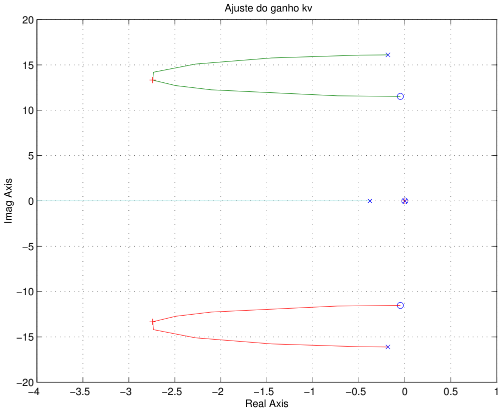
Reescrevendo a f.t. entre x_2 e a força f na forma

$$\frac{X_2(s)}{F(s)} = \frac{N_1(s)}{D(s)}\frac{N_2(s)}{N_1(s)},$$

- **Malha Interna**: responsável pelo controle da variável x_1 (ou θ_1) e o ajuste do amortecimento



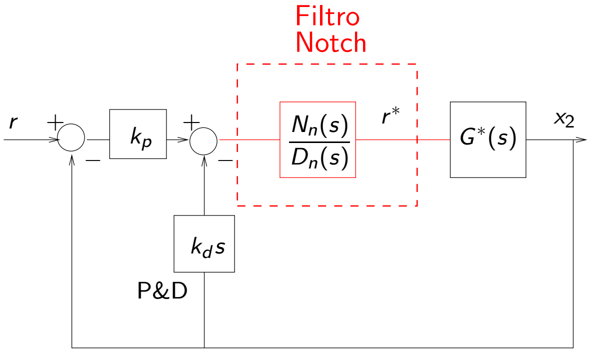
- **Passo 1**: Calcula-se o ganho k_v através do lugar das raízes da malha interna, de modo que o amortecimento dos pólos em malha fechada de $X_1(s)/R^*(s)$ seja o maior possível



Obtém-se a função de transferência $G^*(s)$:

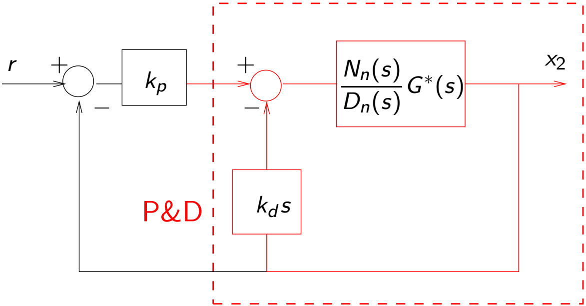
$$G^*(s) = k_{hw}\frac{N_1(s)}{D^*(s)}\frac{N_2(s)}{N_1(s)} = k_{hw}\frac{N_1(s)}{D^*(s)}$$

- **Passo 2**: Calculam-se os parâmetros do filtro notch $N_n(s)/D_n(s)$ de modo que:
  1. os dois zeros do filtro cancelem dois pólos de $G^*(s)$ (tipicamente pólos pouco amortecidos),
  2. o filtro possua dois pares de pólos complexos de frequência natural dadas e $\xi = \sqrt{2}/2$ para ambos,
  3. o coeficiente do termo de maior grau do polinômio $D_n(s)$ deve ser 1 (polinômio mônico) e o ganho estático (DC) da f.t. do filtro deve ser unitário.

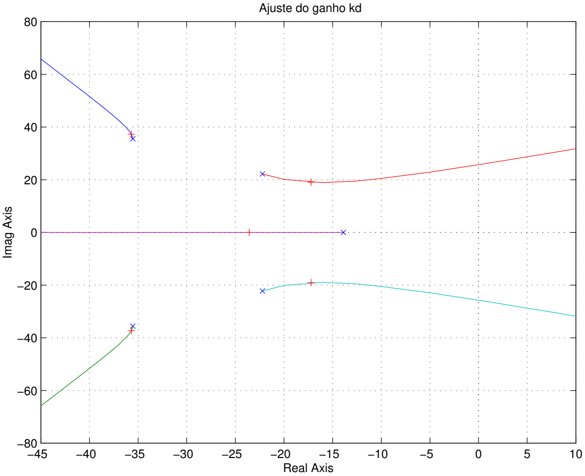


- **Passo 3**: Os parâmetros do controlador P&D são obtidos através do diagrama do lugar das raízes

Ajuste do ganho k_d: máximo amortecimento para os pólos dominantes em malha fechada

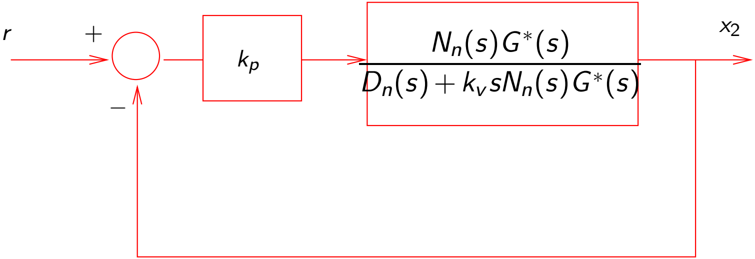


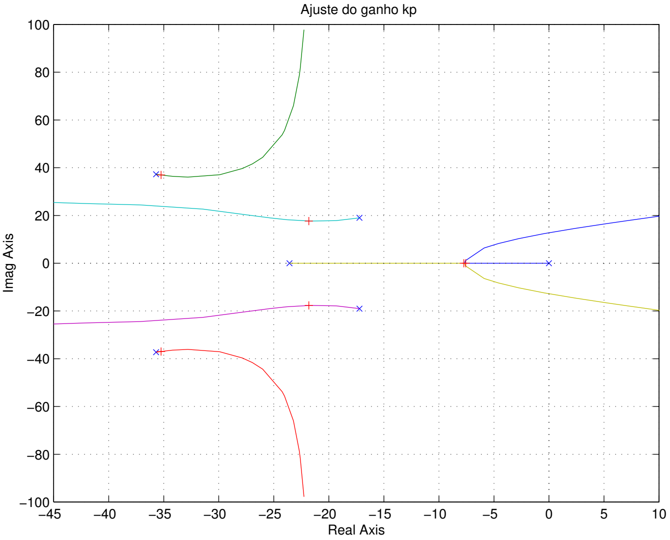
r
$+$
$-$
k_p
$+$
$-$
$\frac{N_n(s)}{D_n(s)} G^*(s)$
x_2
P&D
$k_d s$



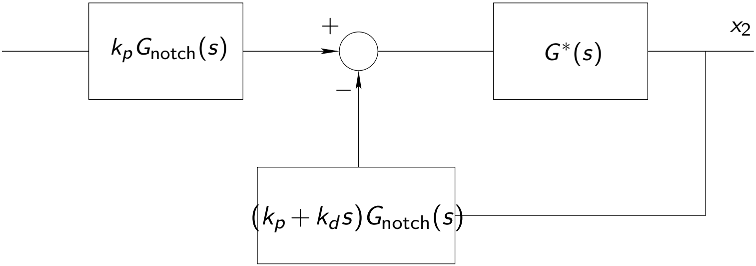
Ajuste do ganho k_p: mesmo critério de máximo amortecimento para os pólos dominantes em malha fechada

Projeto de Controle VII




Ajuste do ganho kp
Imag Axis
Real Axis
100
80
60
40
20
0
−20
−40
−60
−80
−100
−45
−40
−35
−30
−25
−20
−15
−10
−5
0
5
10

- **Passo 4**: Implementação no software ECP



Representação do filtro notch + P&D no ECP

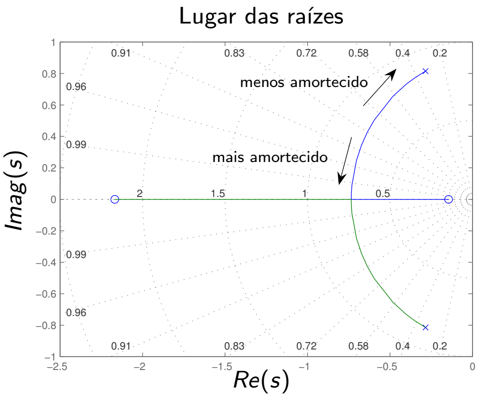
- O bloco $k_p G_{\text{notch}}(s)$ é implementado através dos polinômios $t(s)$ (numerador) e $r(s)$ (denominador).
- O bloco $(k_p + k_d s) G_{\text{notch}}(s)$ é implementado através dos polinômios $s(s)$ (numerador) e $r(s)$ (denominador).

Para o filtro notch sejam $N_n(s) = n_2 s^2 + n_1 s + n_0$ e $D_n(s) = s^4 + d_3 s^3 + d_2 s^2 + d_1 s + d_0$. A relação entre os polinômios N_n, D_n e t, r, s é

$$
\begin{aligned}
t_0 &= n_0 k_p & s_0 &= n_0 k_p & r_0 &= d_0 \\
t_1 &= n_1 k_p & s_1 &= n_0 k_d + n_1 k_p & r_1 &= d_1 \\
t_2 &= n_2 k_p & s_2 &= n_1 k_d + n_2 k_p & r_2 &= d_2 \\
& & s_3 &= n_2 k_d & r_3 &= d_3 \\
& & & & r_4 &= 1
\end{aligned}
$$

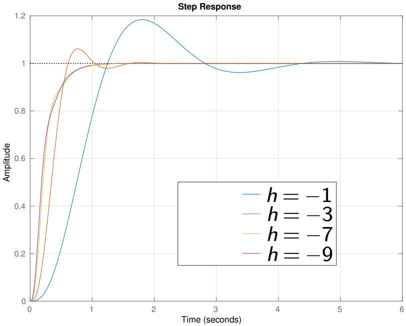
Observando o fator de amortecimento no Matlab

- Usando os comandos `rlocus` e `grid` no Matlab, é possível computar um ganho de modo que o fator de amortecimento resultante associado a um polo possa ser facilmente identificado graficamente (linhas radiais), como ilustra a figura apresentada a seguir

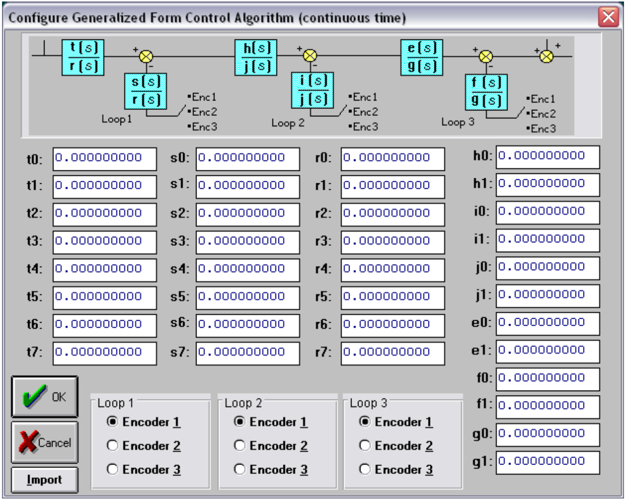


Lugar das raízes com grid

- Considere a resposta ao degrau de uma função de transferência sem zeros e cujos os polos são: $p_1 = -5$, $p_2 = -h + 2h$, $p_3 = -h - 2h$. A figura mostrada a seguir mostra os casos $h \in \{-1, -3, -7, -9\}$. Quando $h = -1$, os polos complexos conjugados dominam (mais à direita), gerando uma resposta oscilatória e que demora mais para acomodar (tempo de estabelecimento longo). Por outro lado, quando $h = -9$, o polo real domina, produzindo uma resposta amortecida e com tempo de estabelecimento menor.



Resposta ao degrau de
$G(s) = 1/$`poly[-5 h-2hj h+2hj]`
para $h \in \{-1, -3, -7, -9\}$



Tela de configuração do controlador genérico

Dicas Gerais:

- Retilíneo – atenção às malhas de realimentação: Loop 3 $\rightarrow$ encoder 1 (posição do carro 1), Loop 1 $\rightarrow$ encoder 2 (posição do carro 2).
- Torcional – atenção às malhas de realimentação: Loop 3 $\rightarrow$ encoder 1 (posição do disco 1), Loop 1 $\rightarrow$ encoder 3 (posição do disco 3).
- Emulador – atenção às malhas de realimentação: Loop 3 $\rightarrow$ encoder 1 (posição do disco de atuação), Loop 1 $\rightarrow$ encoder 2 (posição do disco de carga).
- Atenção à malha de realimentação Loop 2: a mesma não está sendo utilizada, portanto $i_0 = 0$
- Atenção aos denominadores de $g(s)$ e $j(s)$: fazer $g_0 = j_0 = 1$ para não ter divisão por zero.
- Atenção aos numeradores de $h(s)$ e $e(s)$: fazer $h_0 = e_0 = 1$ para não "abrir" a malha (não passa sinal).
- Atenção à implementação do ganho k_v: o mesmo deve ser implementado em f_1.

Referências Bibliográficas

- P. A. V. Ferreira. Introdução aos sistemas de controle. Notas de aula do Prof. Paulo Valente, FEEC-UNICAMP, 1999, `http://www.dt.fee.unicamp.br/~jbosco/ea722/rotaula0.pdf`.
- G. F. Franklin, J. D. Powell, and A. Emami-Naeini. Feedback Control of Dynamic Systems. Pearson, Upper Saddle River, NJ, 6 edition, 2009.
- J. C. Geromel and A. G. B. Palhares. Análise Linear de Sistemas Dinâmicos: Teoria, Ensaios Práticos e Exercícios. Blucher, São Paulo, SP, 2004.
- K. Ogata. Engenharia de Controle Moderno. Prentice-Hall do Brasil, Rio de Janeiro, RJ, 3 edition, 1998.