

# Projeto Final -- Sistema de 3ª Ordem com Incertezas e Dinâmicas Ocultas

Fernando Sales

## Contextualização

Este desafio aborda a modelagem, análise e projeto de controladores para um sistema eletromecânico de posicionamento composto por um motor DC, um sistema de transmissão e componentes estruturais com dinâmicas adicionais não atuadas ou não medidas. Esse sistema pode ser utilizado para posicionar um braço robótico no plano xy, posicionamento de mesa de tomógrafo, ajuste de foco em sistema de microscopia, servoatuador de ventilação mecânica, dentre outras aplicações.

O objetivo é investigar tanto o comportamento nominal quanto a robustez frente a incertezas --- como ocorre na prática em sistemas reais de controle.

## Parte 1 --- Modelo Nominal e Espaço de Estados

Após identificação experimental, obteve-se o seguinte modelo aproximado:

$$G(s) \approx \frac{K_m}{s(s + a_m)(s + a_e)}$$

com incertezas estimadas:

$$K_m \in [0.8, 1.2]$$

$$a_m \in [10, 15] \text{ rad/s}$$

$$a_e \in [800, 1100] \text{ rad/s}$$

Para referência, um caso típico sem incertezas é:

$$G_{\text{típico}}(s) = \frac{1}{s(s+12)(s+900)}$$

Uma realização em forma canônica controlável é:

$$A_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -10800 & -912 \end{bmatrix}, \quad B_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad C_0 = [1 \ 0 \ 0].$$

## Tarefas

1. Escolha valores nominais para  $K_m, a_m, a_e$ .
2. Obtenha o modelo em espaço de estados para o caso nominal.
3. Interprete fisicamente os estados  $x_1, x_2, x_3$ . Se  $x_1$  for a posição, então  $x_2$  seria o que? E  $x_3$ ?
4. Discuta como a incerteza afeta esses estados.

## Parte 2 --- Dinâmica Não Controlável

Imagine que  $x_4$  é uma corrente parasita interna do motor e a dinâmica seja dada por:

$$\dot{x}_4 = -5x_4$$

O sistema ampliado é:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} A_0 & 0 \\ 0 & -5 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} B_0 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

Saída:

$$y = [1 \ 0 \ 0 \ 1] x.$$

## Tarefas

1. Mostre que o posto da controlabilidade é 3.
2. Explique fisicamente por que  $x_4$  não é controlável.
3. Discuta efeitos da incerteza nesse modo.

## Parte 3 --- Dinâmica Não Observável

Um fenômeno interno é modelado por:

$$\dot{x}_4 = -10x_4 + x_1$$

Com o modelo:

$$A_B = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -10800 & -912 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & -10 \end{bmatrix}, \quad B_B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C_B = [1 \quad 0 \quad 0 \quad 0].$$

## Tarefas

1. Mostre que o sistema é controlável.
2. Mostre que não é observável.
3. Interprete e complete as questões de controlabilidade e observabilidade de  $x_4$ .
4. Discuta o impacto da incerteza nos resultados.

## Parte 4 --- Controle Proporcional

Região de desempenho:

- $5\% \leq M_p \leq 15\%$
- $0.5 \leq t_s \leq 1.0 \text{ s}$
- erro de regime para degrau unitário  $\leq 1\%$

## Tarefas

1. Construa o LGR.
2. Escolha um  $K$  justificável.
3. Simule o cenário nominal.
4. Simule três cenários com incertezas.
5. Avalie a robustez dessa abordagem.

## Parte 5 --- Compensador de Avanço (Lead)

$$G_{\text{lead}}(s) = K \frac{s + z}{s + p}, \quad p > z, \quad z \in [10, 30].$$

## Tarefas

1. Escolha e justifique  $z$ .
2. Encontre  $p$ .
3. Ajuste  $K$ .

## Parte 6 --- Compensador de Atraso (Lag)

$$G_{\text{lag}}(s) = \frac{s + b}{s + a}, \quad b > a.$$

## Tarefas

1. Calcule o erro estacionário inicial.
2. Escolha  $a, b$  para aumentar o ganho DC em  $10\times$ .
3. Mostre que os polos dominantes pouco mudam.

## Parte 7 --- Controlador PID

$$G_{\text{PID}}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s.$$

Método de sintonia: livre escolha.

## Tarefas

1. Descreva o método escolhido.
2. Determine  $K_p, K_i, K_d$ .
3. Simule o caso nominal.
4. Simule sob incertezas.

## Parte 8 --- Parecer Técnico

O relatório final e a apresentação devem conter:

1. Compare a performance dos diferentes controladores, apresentando as respostas temporais ao degrau, à rampa, a resposta impulsiva, o diagrama de Bode, o diagrama de Nyquist e os principais indicadores de performance.
2. Controlador recomendado baseado na análise comparativa.
3. Justificativas (desempenho  $\times$  robustez  $\times$  esforço  $\times$  estabilidade).
4. Efeitos dos modos não controláveis/observáveis.
5. Limitações do modelo e sugestões de extensão.

Cada grupo terá, até 30 min, de apresentação e é esperado que os valores e as incertezas sejam diferentes. A ajuda mútua é valorizada mas, cada grupo, deve ter um projeto único, que não se sobrepõe ao outro. Não recomendamos o compartilhamento de códigos ou de soluções entre os grupos, visando evitar cópias e problemas relacionados a isso. Cada grupo emitirá um parecer técnico sobre a apresentação dos colegas, que será analisada criticamente e será considerada na avaliação também. Será apresentada aos estudantes a avaliação 360 no dia da apresentação, bem como o formulário para o parecer individual a ser construído por cada estudante sobre o trabalho dos colegas.