



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FEMEC 42060

CONTROLE DE SISTEMAS LINEARES

Instruções adicionais para desenvolvimento do projeto final

Prof. Pedro Augusto

18 de junho de 2025

1 Introdução

Neste projeto, será desenvolvido um sistema de controle em malha fechada para um sistema de tanques interconectados ilustrado na Figura 1. O objetivo é controlar o nível de líquido no segundo tanque a partir do controle da vazão de entrada no primeiro tanque. Este sistema é inerentemente não linear, pois a vazão entre os tanques depende da raiz quadrada da diferença de nível, de acordo com a lei de Torricelli.

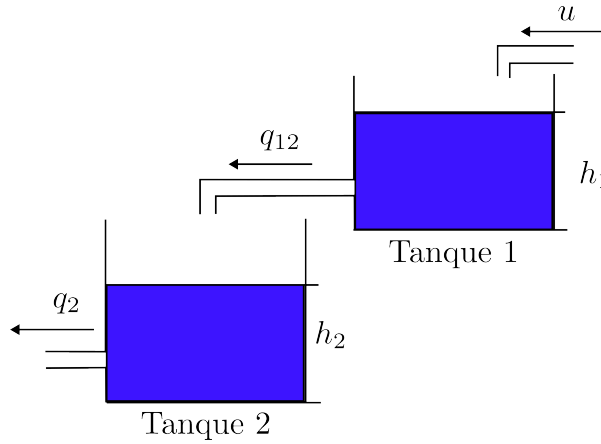


Figura 1: Ilustração de um sistema de tanques.

2 Modelo Matemático

O sistema considerado é composto por:

- Dois tanques cilíndricos idênticos com área da seção transversal $A = 0.05 \text{ m}^2$;
- Conexão entre os tanques com vazão: $q_{12}(t) = a\sqrt{2g(h_1(t) - h_2(t))}$, com $a = 0.001 \text{ m}^2$;
- Vazão de saída do segundo tanque: $q_2(t) = a\sqrt{2gh_2(t)}$;
- Entrada manipulada: vazão de uma bomba $u(t)$ em m^3/s , limitada a $0 \leq u(t) \leq 0.001 \text{ m}^3/\text{s}$. O fluido é injetado no primeiro tanque;
- Saída do sistema: nível do segundo tanque $h_2(t)$;

O modelo dinâmico não linear do sistema é:

$$\begin{aligned} A \frac{dh_1(t)}{dt} &= u(t - \tau) - a\sqrt{2g(h_1(t) - h_2(t))} \\ A \frac{dh_2(t)}{dt} &= a\sqrt{2g(h_1(t) - h_2(t))} - a\sqrt{2gh_2(t)} \end{aligned}$$

onde $\tau = 5$ ms representa o atraso no canal de entrada, e $g = 9.81$ m/s² é a aceleração da gravidade.

3 Linearização

Para o projeto dos controladores, será realizada a linearização do modelo em torno de um ponto de equilíbrio, definido pelas alturas constantes h_1^e e h_2^e , que serão fornecidas ao grupo. Neste ponto, as vazões de entrada e saída são iguais, e a diferença de nível entre os tanques mantém o equilíbrio das vazões intermediárias.

4 Análise em Malha Aberta

Serão analisados:

- Estabilidade do sistema linearizado;
- Localização de polos e zeros;
- Resposta ao degrau da planta sem controle.

5 Projeto de Controladores

Dois controladores devem ser projetados:

- Um controlador PID ajustado com base nos requisitos de desempenho (tempo de acomodação, sobre-elevação, etc.);
- Um segundo controlador de livre escolha (por exemplo, LGR ou controle por realimentação de estados com observador);

6 Simulações

As simulações em malha fechada com ambos os controladores deverão ser feitas com o modelo não linear, observando:

- Desempenho frente a saturação da corrente;
- Robustez frente ao ruído de medição;
- Estabilidade e precisão na regulação da posição;

A simulação será realizada no ambiente MATLAB/Simulink. Devem ser implementados:

- Saturação da entrada $u(t)$;
- Atraso no canal de entrada de $\tau = 5$ ms;
- Ruído de medição gaussiano no nível $h_2(t)$, com média zero e variância $\sigma^2 = 1 \times 10^{-4} \text{ m}^2$;

7 Passo-a-passo

Para realizar o projeto, sugere-se adotar o seguinte passo-a-passo:

1. Montar uma simulação com base no modelo matemático **não linear** e no diagrama da Figura 2. Considerar a referência fornecida ao grupo;

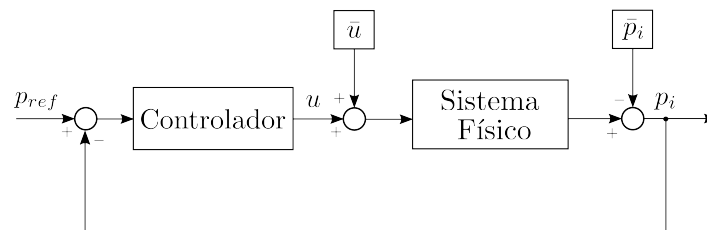


Figura 2: Diagrama de blocos indicando como a simulação deve ser montada para combinar controlador linear e planta não linear.

2. Linearizar o modelo matemático de acordo com o ponto de equilíbrio fornecido ao grupo;
3. Analisar o comportamento em malha aberta (estabilidade, localização de polos e zeros, etc), como indicado na Seção 4;
4. Projetar os controladores de acordo com os requisitos fornecidos ao grupo. **Tais requisitos serão fornecidos via e-mail.** Vale comentar que devem ser projetados dois controladores: PID e outro de livre escolha (exceto PID);
5. Simular o comportamento em MF com ambos controladores. Caso o desempenho não esteja adequado, retornar ao passo 4. As simulações devem ser realizadas com o modelo **não linear**.

8 O que deverá ser entregue?

A seguir é disponibilizada uma lista com o mínimo de arquivos que devem ser enviados para o professor até a data combinada no plano de ensino:

- Relatório descrevendo a linearização do modelo matemático e os projetos dos dois controladores;
- Arquivo de simulação do controlador PID e planta não linear (já incluindo os efeitos de saturação, atraso, ruído, etc) em torno do ponto de equilíbrio e considerando a referência fornecida ao grupo;
- Arquivo de simulação do controlador escolhido e planta não linear (já incluindo os efeitos de saturação, atraso, ruído, etc) em torno do ponto de equilíbrio e considerando a referência fornecida ao grupo.