

# Análise e Projeto de Sistemas de Controle para Reator Químico

## Estudo Comparativo de Técnicas de Controle

Lucas William Junges

Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

3 de julho de 2025

Apresentação do trabalho sobre o controle de um reator químico, explorando diferentes estratégias de controle, desde as mais simples até as mais avançadas.

# Roteiro da Apresentação

- 1 O Problema e a Modelagem
- 2 Estratégias de Controle
- 3 Conclusões

## └ Roteiro da Apresentação

- 1 O Problema e a Modelagem
- 2 Estratégias de Controle
- 3 Conclusões

Este é o roteiro da nossa discussão. Começaremos com o problema, passaremos pela modelagem, exploraremos três abordagens de controle e finalizaremos com as conclusões.

# O Problema: Controlando uma "Fábrica" Química

## Nosso Objetivo Principal:

Controlar um reator químico (CSTR) que produz cyclopentenol. A meta é manter a **concentração do produto final** ( $C_b$ ) em um nível ideal, automaticamente.

**A Missão:** Projetar um controlador que ajuste a **vazão de diluição** ( $u$ ) para corrigir desvios e anular o efeito de **perturbações na entrada** ( $C_{af}$ ).

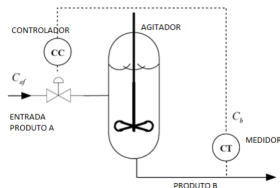


Figura 1: O Reator Químico (CSTR).

# Controle de Reator Químico

## └ O Problema e a Modelagem

## └ O Problema: Controlando uma "Fábrica" Química

### Nosso Objetivo Principal:

Controlar um reator químico (CSTR) que produz cyclopentanol. A meta é manter a **concentração do produto final** ( $C_p$ ) em um nível ideal, automaticamente.

**A Missão:** Projetar um controlador que ajuste a **vazão de diluição** ( $u$ ) para corrigir desvios e anular o efeito de perturbações na entrada ( $C_{d1}$ ).



Figura 1: O Reator Químico (CSTR)

Aqui, definimos o problema central: manter a qualidade do produto estável, mesmo quando as condições de entrada variam. Apresentamos os três elementos-chave: a meta (saída), o ajuste (entrada) e o vilão (perturbação).

# A "Receita": Entendendo a Dinâmica do Processo

A dinâmica do processo é descrita por reações químicas e equações diferenciais.

## Reações Químicas:



## Equações de Estado:

$$\frac{dC_a}{dt} = -k_1 C_a - k_3 C_a^2 + u(C_{af} - C_a)$$

$$\frac{dC_b}{dt} = k_1 C_a - k_2 C_b - u C_b$$

Este é um sistema **não linear**, cujo comportamento muda com as condições de operação.

# Controle de Reator Químico

## └ O Problema e a Modelagem

## └ A "Receita": Entendendo a Dinâmica do Processo

A dinâmica do processo é descrita por reações químicas e equações diferenciais.

Reações Químicas:



Equações de Estado:

$$\frac{dC_A}{dt} = -k_1 C_A - k_2 C_A^2 + k_3 C_D \quad (C_A)$$

$$\frac{dC_B}{dt} = k_1 C_A - k_3 C_D \quad (C_B)$$

Este é um sistema **não linear**, cujo comportamento muda com as condições de operação.

Apresentamos o modelo matemático. É crucial entender que o sistema é não linear, e é por isso que a linearização se torna uma ferramenta importante para o projeto de controladores clássicos.





# Controle de Reator Químico

## └ Estratégias de Controle

### └ Parte I: A Solução Clássica (Controlador PI)

#### Parte I: A Solução Clássica (Controlador PI)

**Abordagem:** Linearizar o sistema e projetar um controlador PI.

1. **Linearização:** O modelo é simplificado em torno de um ponto de operação ( $C_p = 5.1$ ,  $u = 1$ ) para se obter uma aproximação linear.
2. **Projeto do PI:** Com a técnica de **alocação de polos**, projetamos um controlador para atender aos critérios de desempenho ( $t_{0\%} \in [1.5, 1.7]$  min,  $\text{pico} < 5\%$ ).

**Controlador:**  $C(s) = 1.851(s + 1.851)$



Figura 2: Resposta do sistema com controlador PI.

Explicamos a primeira abordagem: a mais simples e direta. Linearizamos o modelo para poder aplicar técnicas clássicas e projetamos um controlador PI. O resultado é bom, mas apenas perto do ponto onde linearizamos.

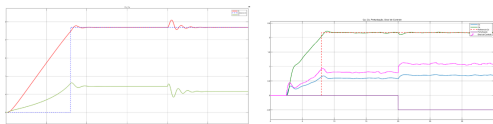
## Parte II: A Solução Inteligente (LR + Feedforward)

**Abordagem:** Melhorar o desempenho com um controlador mais robusto e uma estratégia preditiva.

**1. Controlador por Lugar das Raízes (LR):** Projetamos um controlador mais sofisticado para a função de transferência de 2ª ordem, resultando em uma resposta mais suave.

$$C(s) = \frac{5.2946(s + 3.835)^2}{s(s + 20)}$$

**2. Controle Feedforward:** Para combater a perturbação ( $C_{af}$ ) proativamente, nós a medimos e usamos essa informação para ajustar a entrada e anular seu efeito.



**Figura 3:** Desempenho sem (esquerda) e com (direita) Feedforward.

# Controle de Reator Químico

## └ Estratégias de Controle

### └ Parte II: A Solução Inteligente (LR + Feedforward)

#### Parte II: A Solução Inteligente (LR + Feedforward)

**Abordagem:** Melhorar o desempenho com um controlador mais robusto e uma estratégia preditiva.

**1. Controlador por Lugar das Raízes (LR):** Projetamos um controlador mais sofisticado para a função de transferência de 2ª ordem, resultando em uma resposta mais suave.

$$G(s) = \frac{0.001s + 0.0001}{s^2 + 10s + 100}$$

**2. Controle Feedforward:** Para combater a perturbação ( $C_d$ ) proativamente, nós a medimos e usamos essa informação para ajustar a entrada e anular seu efeito.



Figura 3: Comparação sem (sem LR) e com (com LR) Feedforward.

Aqui, damos um passo à frente. O controlador por LR é mais adaptado à dinâmica do sistema. O grande salto de qualidade vem com o Feedforward, que nos permite anular a perturbação de forma muito eficaz.

## Parte III: Lidando com o Mundo Real (Atraso de Medição)

**Abordagem:** Compensar um atraso de 3 minutos na medição.

**O Problema:** Atrasos na medição são comuns e podem desestabilizar o sistema, pois o controlador reage a uma informação "velha".

**A Solução: Preditor de Smith.** Esta técnica usa um modelo do processo para "prever" a saída *sem* o atraso. O controlador reage à previsão, não à medição atrasada, contornando o problema.

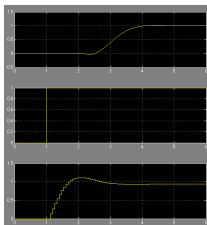


Figura 4: Estrutura do Preditor de Smith.

# Controle de Reator Químico

## └ Estratégias de Controle

### └ Parte III: Lidando com o Mundo Real (Atraso de Medição)

#### Parte III: Lidando com o Mundo Real (Atraso de Medição)

**Abordagem:** Compensar um atraso de 3 minutos na medição.

**O Problema:** Atrasos na medição são comuns e podem desestabilizar o sistema, pois o controlador reage a uma informação "velha".

**A Solução: Preditor de Smith.** Esta técnica usa um modelo do processo para "prever" a saída sem o atraso. O controlador reage à previsão, não à medição atrasada, contornando o problema.



Figura 4: Diagrama do Preditor de Smith.

Este é o desafio mais realista. Atrasos são um grande problema em controle de processos. O Preditor de Smith é uma solução elegante que nos permite usar o controlador que já projetamos, adicionando uma camada de "previsão" para compensar o atraso.

# Quadro Comparativo das Estratégias de Controle

Estratégia	Princípio	Prós	Contras
PI Clássico	Linearização e controle PI	Simples, robusto, fácil implementação	Eficaz só perto do ponto de operação, desempenho limitado
LR + Feedforward	Alocação de polos + ação preditiva	Excelente rejeição a perturbações, desempenho superior	Mais complexo, requer sensor extra, maior custo
Preditor de Smith	Compensação de atraso via modelo	Essencial para sistemas com atraso, mantém desempenho	Depende da precisão do modelo, sensível a erros de atraso

# Controle de Reator Químico

## └ Estratégias de Controle

## └ Quadro Comparativo das Estratégias de Controle

Estratégia	Principais	Vant.	Desvant.
Proporcional	Implementar e ajustar $K_c$	Simples, robusto, fácil de implementar	Altera os pontos de operação de controle, desatende os requisitos
PID e Fuzzy	Implementar os parâmetros $K_c$ , $T_i$ e $T_d$	Resposta rápida e precisa, flexível, adaptativa	Alto custo, requer sensores, atores, mais dados
Modelo de Referência	Implementar os parâmetros do modelo	Estabilidade para sistemas com atrasos, resposta de transição	Capacidade de produção de dados, complexidade de implementação

Este quadro facilita a comparação direta das estratégias, ajudando a escolher a mais adequada para cada situação. Use este slide para reforçar os pontos-chave antes das conclusões.



# Aplicação Ideal de Cada Estratégia

- **PI:** Processos estáveis, sem grandes perturbações ou atrasos.
- **LR+FF:** Processos sujeitos a perturbações mensuráveis.
- **Smith:** Processos com atraso de medição relevante.

# Controle de Reator Químico

## └ Estratégias de Controle

### └ Aplicação Ideal de Cada Estratégia

- **PI**: Processos estáveis, sem grandes perturbações ou atrasos.
- **LR+FF**: Processos sujeitos a perturbações mensuráveis.
- **Smith**: Processos com atraso de medição relevante.

Este slide separa a aplicação ideal de cada estratégia, tornando a apresentação mais limpa e evitando excesso de conteúdo em um único frame.

# Conclusões: Qual a Melhor Estratégia? I

Não existe uma única resposta. A escolha ideal depende do balanço entre **desempenho, complexidade e custo**.

- **Controlador PI (Parte I):**

- **Prós:** Simples de projetar e implementar. Robusto.
- **Contras:** Desempenho limitado, eficaz apenas perto do ponto de operação.

- **LR + Feedforward (Parte II):**

- **Prós:** Desempenho muito superior, excelente rejeição a perturbações.
- **Contras:** Mais complexo de projetar. Requer um sensor adicional para medir a perturbação (mais caro).

- **Preditor de Smith (Parte III):**

# Controle de Reator Químico

## └ Conclusões

## └ Conclusões: Qual a Melhor Estratégia?

### Conclusões: Qual a Melhor Estratégia? I

Não existe uma única resposta. A escolha ideal depende do balanço entre **desempenho**, **complexidade** e **custo**.

#### • Controlador PI (Parte I):

- **Prós:** Simples de projetar e implementar. Robusto.
- **Contras:** Desempenho limitado, eficaz apenas perto do ponto de operação.

#### • LR + Feedforward (Parte II):

- **Prós:** Desempenho muito superior, excelente rejeição a perturbações.
- **Contras:** Mais complexo de projetar. Requer um sensor adicional para medir a perturbação (mais caro).

#### • Preditor de Smith (Parte III):

Resumimos os aprendizados. Cada técnica tem seu lugar. A engenharia de controle consiste em entender esses trade-offs para escolher a solução mais adequada para cada problema.

## Conclusões: Qual a Melhor Estratégia? II

- **Prós:** Essencial para sistemas com atraso, recuperando o desempenho.
- **Contras:** O desempenho depende da precisão do modelo. Erros na estimativa do atraso podem degradar a resposta.

# Perguntas? Obrigado!