

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}).

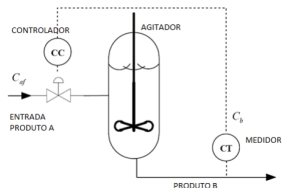


Figura 1: O Reator Químico (CSTR).

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.

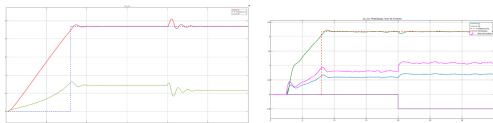


Figura 3: Desempenho sem (esquerda) e com (direita) Feedforward.

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 com (esquerda) e sem (direita) 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.

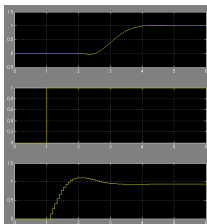


Figura 4: Estrutura do Preditor de Smith.

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, robusto, adaptativo	Alta complexidade, requer ajuste fino
Controle de Estado	Implementar os estados do sistema	Permite controle mais preciso, robusto a perturbações	Exige conhecimento detalhado do sistema

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!