

Análise e Controle Avançado de um Reator Químico

Lucas William Junges

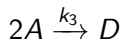
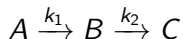
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)

July 3, 2025

O Processo: Reator Químico

Objetivo: Controlar a concentração de Cyclopentenol (C_b) em um reator de agitação contínua.

Reações:



Dinâmica (Não Linear):

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

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

Variáveis:

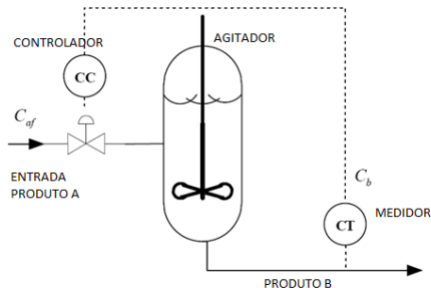


Figure: Diagrama do Reator Químico.

Parte 1: Análise e Alocação de Polos

Roteiro

- 1 Análise do sistema em equilíbrio para entender o comportamento estático.
- 2 Linearização do modelo em um ponto de operação para permitir o projeto clássico.
- 3 Projeto de um controlador PI via Alocação de Polos para atender especificações de desempenho.
- 4 Validação do controle no sistema não linear e análise do efeito da discretização.

Linearização e Projeto do Controlador PI

Ponto de Operação:

- $\bar{u} = 1 \text{ min}^{-1}$
- $\bar{C}_{af} = 5.1 \text{ mol/L}$
- Resulta em: $\bar{C}_a = 0.719$, $\bar{C}_b = 2.345$

Modelo Linearizado:

$$\Delta \dot{C}_a = -7.17 \Delta C_a + \Delta C_{af} + 4.38 \Delta u$$

$$\Delta \dot{C}_b = 6.01 \Delta C_a - 1.84 \Delta C_b - 2.35 \Delta u$$

Controlador PI (Alocação de Polos):

- **Objetivo:** $t_{5\%} \approx 1.6 \text{ min}$, Pico $< 5\%$.
- **Controlador:** $C(s) = 1.85 \frac{s+1.92}{s}$
- **Filtro:** $F_r(s) = \frac{1.92}{s+1.92}$ para cancelar o zero e evitar overshoot.

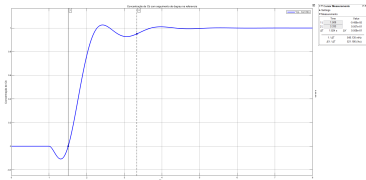
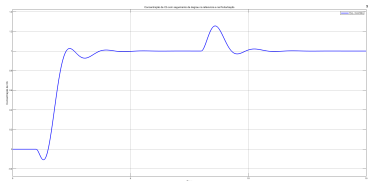


Figure: Resposta ao degrau com filtro.



Parte 2: Controle Avançado por LR

Roteiro

- 1 Projeto de um controlador mais complexo (PID) via Lugar das Raízes (LR) para o modelo de 2ª ordem.
- 2 Comparação de desempenho: PI vs. PID-LR.
- 3 Melhoria do sistema com controle Feedforward para rejeição de perturbações.
- 4 Análise de robustez e simulação em cenário com ruído.

Projeto via Lugar das Raízes e Comparação

Função de Transferência (C_b/u):

$$G_{yu}(s) = \frac{-2.35(s - 4.01)}{(s + 1.84)(s + 7.17)}$$

Nota: A presença de um zero no semiplano direito (ZSD) impõe limitações de desempenho.

Controlador (PID via LR):

$$C(s) = \frac{5.29(s + 3.83)^2}{s(s + 20)}$$

Projetado para os mesmos polos dominantes da Parte 1.

Filtro de Referência:

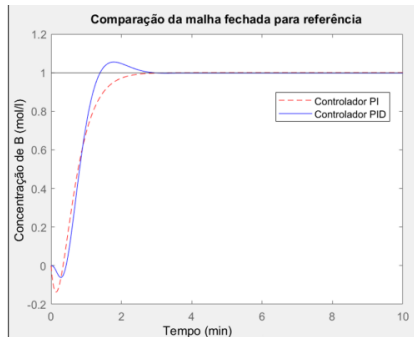


Figure: Comparativo: PI (azul) vs. PID por LR (vermelho).

Melhorando a Rejeição a Perturbações com Feedforward

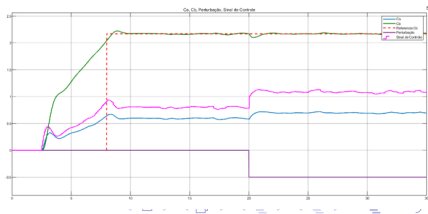
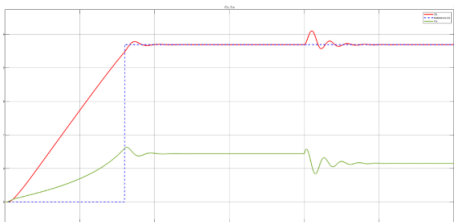
Estratégia: Medir a perturbação (C_{af}) e agir proativamente para cancelar seu efeito.

Controlador Feedforward (C_{ff}):

$$C_{ff}(s) = \frac{G_{pert}(s)}{G_{proc}(s)} = \frac{G_{C_b/C_{af}}(s)}{G_{C_b/u}(s)}$$

Isso resulta em um controlador instável. A solução prática é usar uma aproximação estática:

$$C_{ff} \approx -0.4$$



Parte 3: O Desafio do Atraso de Tempo

O Problema

- Na prática, a medição de C_b não é instantânea. Existe um **atraso de transporte de 3 minutos**.
- A função de transferência do processo se torna: $G_p(s)e^{-3s}$.
- O atraso adiciona uma fase negativa, que severamente degrada a estabilidade e o desempenho de controladores convencionais.

A Solução: Preditor de Smith

Uma estrutura de controle que utiliza um modelo do processo para "prever" a saída, efetivamente removendo o atraso da malha de realimentação e permitindo um controle mais agressivo e estável.

Conclusões e Trabalhos Futuros

Conclusões

- A complexidade do controlador deve ser adequada à do processo (PI para 1ª ordem, PID para 2ª ordem).
- O controle Feedforward é uma ferramenta poderosa para rejeição de perturbações mensuráveis.
- Atrasos de tempo são um desafio significativo que requerem estratégias de controle específicas como o Preditor de Smith.
- A linearização é uma ferramenta essencial, mas suas limitações devem ser respeitadas, especialmente longe do ponto de operação.

Trabalhos Futuros

- Projeto de controladores robustos (e.g., H_∞) para lidar com incertezas no modelo.
- Validação experimental dos modelos e controladores em uma planta piloto.

Prováveis Perguntas do Professor

P1: Seu modelo para o projeto por LR tem um zero no semiplano direito. Qual o impacto disso no desempenho do controle?

Prováveis Perguntas do Professor

P1: Seu modelo para o projeto por LR tem um zero no semiplano direito. Qual o impacto disso no desempenho do controle? *R: Um ZSD causa uma resposta de fase não-mínima, ou seja, a saída inicialmente se move na direção oposta ao esperado (undershoot). Isso impõe um limite fundamental no desempenho do controle: não é possível ter uma resposta arbitrariamente rápida sem causar grande instabilidade ou um sinal de controle excessivo. O controlador precisa ser mais "lento" para acomodar esse comportamento.*

Prováveis Perguntas do Professor

P1: Seu modelo para o projeto por LR tem um zero no semiplano direito. Qual o impacto disso no desempenho do controle? *R: Um ZSD causa uma resposta de fase não-mínima, ou seja, a saída inicialmente se move na direção oposta ao esperado (undershoot). Isso impõe um limite fundamental no desempenho do controle: não é possível ter uma resposta arbitrariamente rápida sem causar grande instabilidade ou um sinal de controle excessivo. O controlador precisa ser mais "lento" para acomodar esse comportamento.*

P2: Você aproximou o controlador Feedforward por um ganho estático. Por que isso foi necessário e qual o trade-off?

Prováveis Perguntas do Professor

P1: Seu modelo para o projeto por LR tem um zero no semiplano direito. Qual o impacto disso no desempenho do controle? *R: Um ZSD causa uma resposta de fase não-mínima, ou seja, a saída inicialmente se move na direção oposta ao esperado (undershoot). Isso impõe um limite fundamental no desempenho do controle: não é possível ter uma resposta arbitrariamente rápida sem causar grande instabilidade ou um sinal de controle excessivo. O controlador precisa ser mais "lento" para acomodar esse comportamento.*

P2: Você aproximou o controlador Feedforward por um ganho estático. Por que isso foi necessário e qual o trade-off? *R: O controlador ideal C_{ff} era instável (polo no semiplano direito), o que é irrealizável. A aproximação por ganho estático é a forma mais simples de obter um controlador estável. O trade-off é que a rejeição à perturbação não é mais perfeita, especialmente durante os transientes. No entanto, como vimos na simulação, a melhoria ainda é muito significativa em comparação com a ausência de feedforward.*

Prováveis Perguntas do Professor (Cont.)

P3: O Preditor de Smith depende de um modelo preciso. O que aconteceria se o atraso real do processo fosse de 4 minutos, mas seu modelo usasse 3 minutos?

Prováveis Perguntas do Professor (Cont.)

P3: O Preditor de Smith depende de um modelo preciso. O que aconteceria se o atraso real do processo fosse de 4 minutos, mas seu modelo usasse 3 minutos? *R: A predição estaria errada. O sistema de controle não conseguiria cancelar perfeitamente o efeito do atraso. Isso resultaria em um desempenho degradado, com oscilações e menor robustez. Em casos de grande erro de modelagem, o sistema poderia até se tornar instável. Isso destaca a importância da identificação precisa do processo para o sucesso do Preditor de Smith.*

Prováveis Perguntas do Professor (Cont.)

P3: O Preditor de Smith depende de um modelo preciso. O que aconteceria se o atraso real do processo fosse de 4 minutos, mas seu modelo usasse 3 minutos? *R: A predição estaria errada. O sistema de controle não conseguiria cancelar perfeitamente o efeito do atraso. Isso resultaria em um desempenho degradado, com oscilações e menor robustez. Em casos de grande erro de modelagem, o sistema poderia até se tornar instável. Isso destaca a importância da identificação precisa do processo para o sucesso do Preditor de Smith.*

P4: Na sua simulação final com ruído, como o ruído de medição afetou o sinal de controle? Que medidas poderiam ser tomadas?

Prováveis Perguntas do Professor (Cont.)

P3: O Preditor de Smith depende de um modelo preciso. O que aconteceria se o atraso real do processo fosse de 4 minutos, mas seu modelo usasse 3 minutos? *R: A predição estaria errada. O sistema de controle não conseguiria cancelar perfeitamente o efeito do atraso. Isso resultaria em um desempenho degradado, com oscilações e menor robustez. Em casos de grande erro de modelagem, o sistema poderia até se tornar instável. Isso destaca a importância da identificação precisa do processo para o sucesso do Preditor de Smith.*

P4: Na sua simulação final com ruído, como o ruído de medição afetou o sinal de controle? Que medidas poderiam ser tomadas? *R: O ruído de medição, especialmente se amplificado pela ação derivativa do controlador PID, pode causar um sinal de controle muito "nervoso" e errático. Isso pode levar ao desgaste de atuadores (válvulas, etc.). Para mitigar isso, poderíamos: 1) Adicionar um filtro ao termo derivativo do controlador. 2) Filtrar o sinal de medição antes de ele entrar no controlador. 3) Reduzir o ganho derivativo, aceitando um desempenho um*