

Análise e Projeto de Sistemas de Controle para Reator Químico

Estudo Comparativo de Técnicas de Controle

Lucas William Junges

Universidade Federal de Santa Catarina
Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica

3 de julho de 2025

Qual é o nosso objetivo?

Imagine uma "fábrica" (um reator químico) que produz um líquido valioso (cyclopentenol).

Nossa missão: Manter a **qualidade** (C_b) e a **quantidade** desse líquido sempre perfeitas, de forma automática, mesmo com

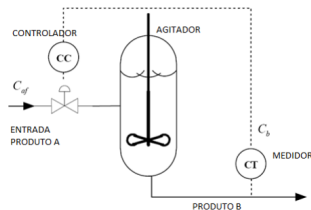
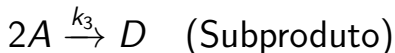


Figura: O Reator Químico (CSTR).

A "Receita": Modelagem do Processo

A dinâmica do processo é regida por duas reações principais:



E descrita matematicamente pelas seguintes equações diferenciais:

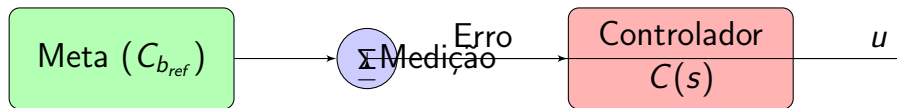
$$\begin{aligned}\frac{dC_a}{dt} &= -k_1 C_a - k_3 C_a^2 + \frac{(C_{af} - C_a)F}{V} \\ \frac{dC_b}{dt} &= k_1 C_a - k_2 C_b - \frac{C_b F}{V}\end{aligned}$$

Onde os "personagens" são:

- C_b : **A Meta** - Concentração do produto final.
- $u = F/V$: **O Ajuste** - Vazão de diluição (nossa variável de controle)

O Mapa do Tesouro: O Objetivo do Controle

O objetivo é criar um **Controlador** que ajuste u para manter C_b em um valor desejado, rejeitando os efeitos de C_{af} .



Critérios de Desempenho: Tempo de acomodação ($t_{5\%}$)

Parte I: O Básico (Controlador PI)

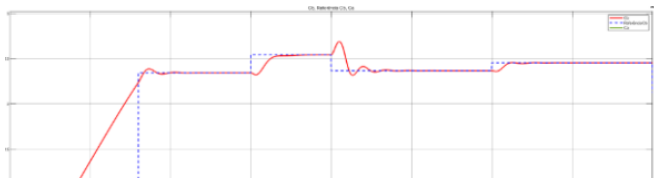
Primeiro, linearizamos o modelo em torno de um ponto de operação:

- $C_{af} = 5.1 \text{ mol/L}$ e $u = 1 \text{ min}^{-1}$.

Um controlador **PI (Proporcional-Integral)** foi projetado por alocação de polos.

$$C(s) = 1.85162 \frac{s + 1.91627}{s}$$

Resultado: Funciona bem perto do ponto de operação, mas o desempenho degrada se o sistema se afasta muito. É uma solução simples e robusta para começar.



Parte II: O Inteligente (LR + Feedforward)

Para melhorar o desempenho, um controlador mais complexo foi projetado via **Lugar das Raízes (LR)**.

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

E para lidar com o "vilão" (C_{af}) de forma proativa, adicionamos um controle **Feedforward**.

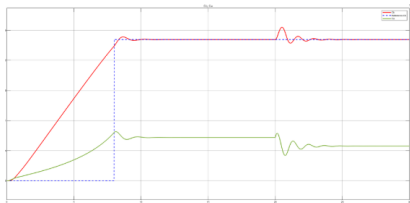


Figura: Sem Feedforward.

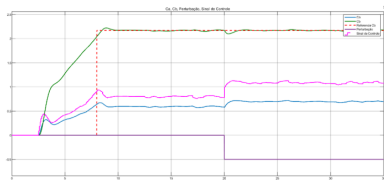


Figura: Com Feedforward.

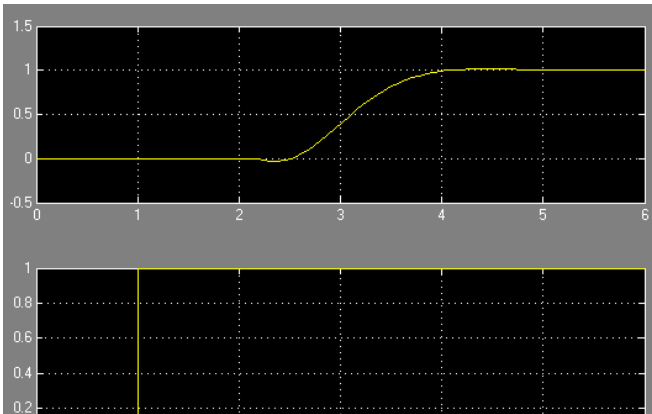
Resultado: Rejeição à perturbação drasticamente melhorada.

O sistema melhora a rejeição à perturbação "vilão".

Parte III: O Desafio Final (Atraso de Medição)

E se o nosso sensor for **lento**? Introduzimos um atraso de 3 minutos na medição de C_b , um problema comum na indústria.

Solução: O **Preditor de Smith**, uma técnica que usa um modelo do processo para "prever" a saída e compensar o atraso.



O que aprendemos?

- **Não existe "bala de prata"**. A escolha do controlador é um balanço entre desempenho, complexidade e custo.
 - **PI**: Simples, robusto, mas limitado.
 - **LR + FF**: Desempenho superior, mas mais complexo e caro (requer sensor extra).
 - **Preditor de Smith**: Essencial para atrasos, mas sensível a erros de modelagem.

O que aprendemos?

- **Não existe "bala de prata"**. A escolha do controlador é um balanço entre desempenho, complexidade e custo.
 - **PI**: Simples, robusto, mas limitado.
 - **LR + FF**: Desempenho superior, mas mais complexo e caro (requer sensor extra).
 - **Preditor de Smith**: Essencial para atrasos, mas sensível a erros de modelagem.
- **Conhecer o inimigo é fundamental**. Medir e antecipar a perturbação (Feedforward) transforma o desempenho do controle.

O que aprendemos?

- **Não existe "bala de prata".** A escolha do controlador é um balanço entre desempenho, complexidade e custo.
 - **PI:** Simples, robusto, mas limitado.
 - **LR + FF:** Desempenho superior, mas mais complexo e caro (requer sensor extra).
 - **Preditor de Smith:** Essencial para atrasos, mas sensível a erros de modelagem.
- **Conhecer o inimigo é fundamental.** Medir e antecipar a perturbação (Feedforward) transforma o desempenho do controle.
- **O mundo real tem atrasos.** Ignorá-los pode levar à instabilidade. Técnicas específicas são necessárias para

Perguntas?

Obrigado!