

Modelagem e controle de biorreatores anaeróbicos

William Cechin Guarienti¹, Diego Eckhard²

¹Estudante de Engenharia de Controle e Automação, UFRGS, Porto Alegre, RS williamguarienti@gmail.com

²Professor do Departamento de Matemática Pura e Aplicada, UFRGS, Porto Alegre, RS diegoeck@ufrgs.br

Introdução

O objetivo deste projeto de pesquisa é estudar um controlador para biorreatores anaeróbicos cujo objetivo é otimizar a síntese de seus produtos. No caso deste trabalho, o produto de interesse é o gás metano, que é utilizado como combustível em veículos automotores e em plantas industriais. Utilizando um modelo não linear relativamente simples, foi projetado um controlador PI (proporcional-integral) utilizando a abordagem de espaço de estados. Além disso, são analisados os resultados obtidos com a implementação de tais controladores na planta (biorreator) no software MATLAB.



Figura 1: Biorreatores utilizados para a produção dos dados utilizados neste trabalho.

Modelagem do processo bioquímico

A digestão anaeróbica de resíduos é um processo no qual microorganismos se desenvolvem a partir do metabolismo de matéria orgânica num ambiente livre de oxigênio, o que resulta na produção de gás metano (CH₄). Este processo pode ser descrito com aceitável precisão utilizando-se um modelo de baixa complexidade, composto de cinco estados, que permite a estimação da produção de gás metano produzido no biorreator. Admite-se que o único fator limitante para o crescimento dos microorganismos é a disponibilidade de alimento (substrato) e que as demais condições (temperatura, PH, toxicidade) são mantidas ideais.

Os cinco estados do modelo são descritos por:

$$\dot{x}_1(t) = [v_1(S_1(t)) - p_7 \cdot D - p_8] \cdot x_1(t) \quad (1)$$

$$\dot{x}_2(t) = [v_2(S_2(t)) - p_7 \cdot D - p_9] \cdot x_2(t) \quad (2)$$

$$\dot{S}_1(t) = D \cdot (S_1^{in} - S_1(t)) - p_{10} \cdot v_1(S_1(t)) \cdot x_1(t) \quad (3)$$

$$\dot{S}_2(t) = D \cdot (S_2^{in} - S_2(t)) + p_{11} \cdot v_1(S_1(t)) \cdot x_1(t) - p_{12} \cdot v_2(S_2(t)) \cdot x_2(t) \quad (4)$$

$$\dot{C}(t) = p_{14} \cdot v_1(S_1(t)) \cdot x_1(t) + p_{16} \cdot v_2(S_2(t)) \cdot x_2(t) - p_{15} \cdot C(t) \quad (5)$$

As funções $v_1(t)$ e $v_2(t)$ expressam a velocidade do crescimento bacteriano. Com o intuito de simplificar o problema, tais velocidades foram expressas em conformidade com a Lei de Monod, que define a taxa de crescimento apenas em função da concentração de substrato:

$$v_i = p_{3i-2} \frac{S_i(t)}{p_{3i-1} + S_i(t)} \quad i = 1, 2 \quad (6)$$

A saída do modelo é a vazão de gás metano, expressa por: $q_m(t)$:

$$q_m(t) = p_{13} \cdot v_2(S_2(t)) \cdot x_2(t) + p_{15} \cdot C(t) \quad (7)$$

A seguir, elucidamos o significado das variáveis do modelo:

- $x_1(t)$: concentração de bactérias acinogênicas [mg/L];
- $x_2(t)$: concentração de bactérias metanogênicas [mg/L];
- $S_1(t)$: concentração de substrato orgânico (COD) [mg/L];
- $S_2(t)$: concentração dos ácidos graxos voláteis (VFA) [mmol/L];
- $C(t)$: concentração de carbono inorgânico (mmol/L)
- S_1^{in} : concentrações de substrato orgânico dos influentes;
- S_2^{in} : concentrações de ácidos graxos voláteis (VFA) dos influentes;
- D : taxa de diluição dos influentes;

Os parâmetros denotados por p_i correspondem a constantes determinados através de um procedimento de identificação com base em dados experimentais, utilizando algoritmos como o *simplex Nelder-Mead* e o *Trust-Region-Reflective*. Define-se, nesse contexto, o vetor linha de parâmetros $P = (p_i)$ sendo $i = 1, 2, \dots, 16$;

Controle do processo

O sistema de controle deve atuar de forma a garantir a manutenção do fluxo adequado de substrato (S_1^{in}) para a obtenção da vazão de gás metano desejada ($r(t)$), assumida constante. Para este trabalho, assumiu-se que a taxa de diluição dos influentes é constante e igual a $D = 1 \text{ dia}^{-1}$; além disso, a concentração de ácidos graxos nos influentes é nula ($S_2^{in} = 0$). A Figura 2 apresenta o diagrama do sistema de controle associado ao biorreator em questão.

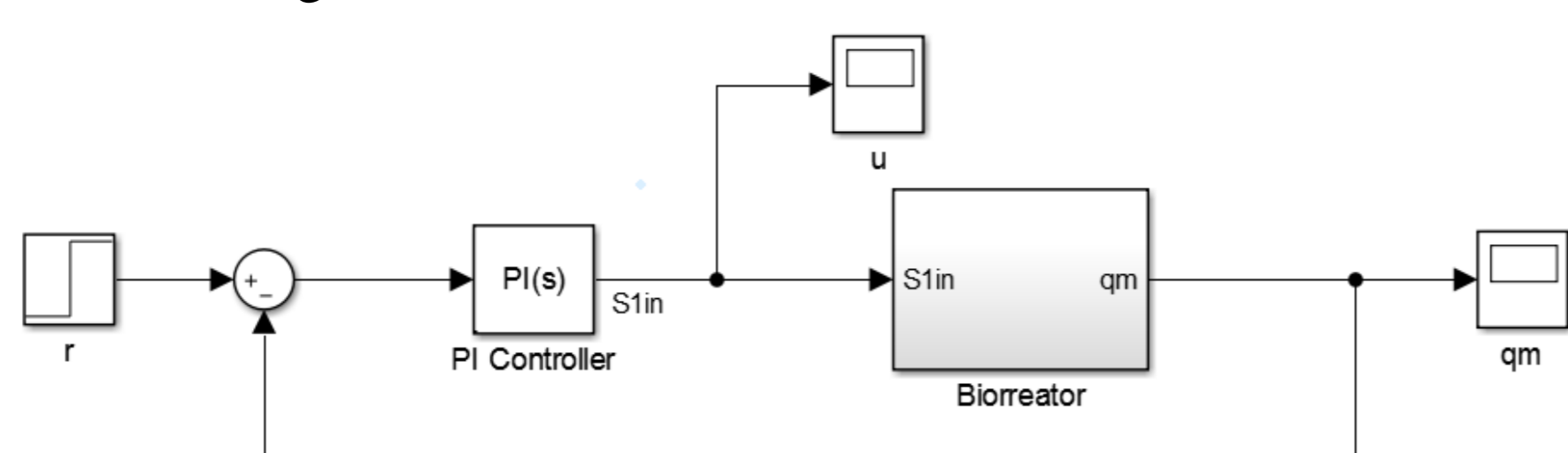


Figura 2: Diagrama do sistema de controle associado ao biorreator

Para os cálculos subsequentes, foi considerado o vetor de coeficientes P da Equação 8. O procedimento é claramente passível de generalização para qualquer taxa de diluição D e qualquer vetor factível de parâmetros P ; no entanto, tal abordagem levaria a expressões demasiadamente complexas, a partir das quais não se poderia desenvolver a sua adequada compreensão.

$$P = [2.74; 257.17; 0; 37.34; 455.16; 0; 0; 0.0029; 0.0015; 32.24; 28.31; 100; 141.99; 3.93; 10.71; 200] \quad (8)$$

A partir do conjunto de parâmetros acima, pode-se efetivamente estudar um controlador para o processo. Arbitrou-se $r = 1L/dia$ como referência para a variável de processo (q_m). Inicialmente, o ponto de equilíbrio do sistema para a geração foi determinado numericamente, e o sistema foi linearizado em dois pontos de operação distintos: em torno da condição inicial (x_0) e em torno do ponto de equilíbrio calculado (x_{eq}). Na sequência, foram traçados os Diagramas de Bode correspondentes, que são exibidos sobrepostos na Figura 3.

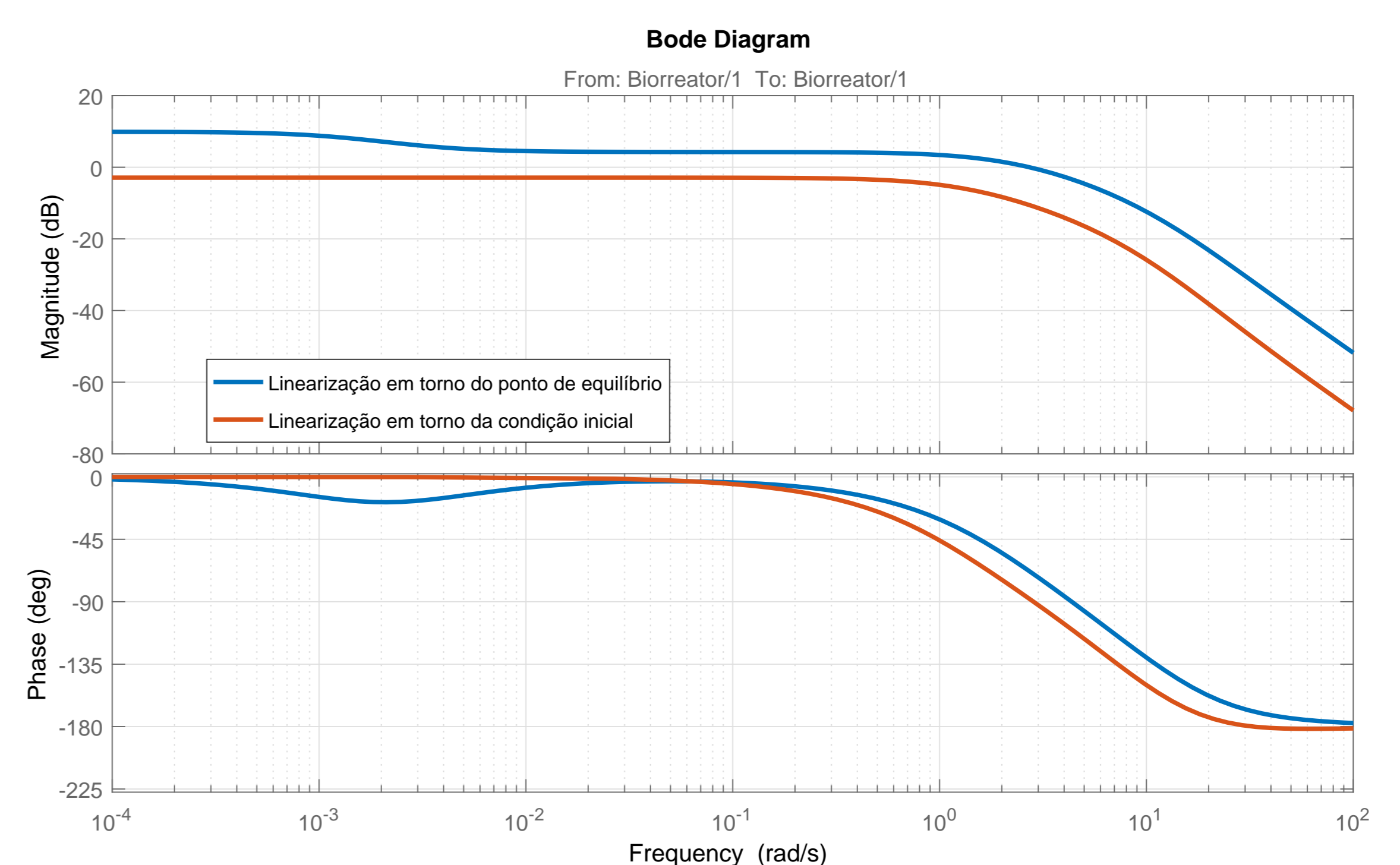


Figura 3: Diagrama de Bode dos sistemas linearizados

Para o controle do processo, foi implementado um controlador PI na forma padrão (*standard*). Com auxílio dos diagramas traçados acima, foi projetado um que garantisse uma margem de fase mínima de 60° e uma margem de ganho mínima de 20dB para ambos os modelos. A lei de controle do controlador PI escolhido, que satisfaz as condições enunciadas, é apresentado na Equação 9. Verificando o espectro da matriz Jacobiana no ponto de equilíbrio (x_{eq}), pode-se corroborar a estabilidade do sistema, visto que a parte real de todos os seus autovalores é negativa (*Lyapunov's indirect method*).

$$S_1^{in}(t) = 0.143 \cdot (r(t) - q_m(t)) + 1 \cdot \int_0^t r(\tau) - q_m(\tau) d\tau \quad (9)$$

Resultados

Conforme é exibido na Figura 4, o sistema em malha fechada - com o controlador descrito pela Equação 9 - obteve tempo de estabilização significativamente menor do que o sistema em malha aberta. Além disso, observa-se que o esforço de controle ($S_1^{in}(t)$) manteve-se em níveis razoáveis. Caso seja necessário, um ajuste fino dos parâmetros pode ser feito para reduzir o sobressinal observado no sistema em malha fechada.

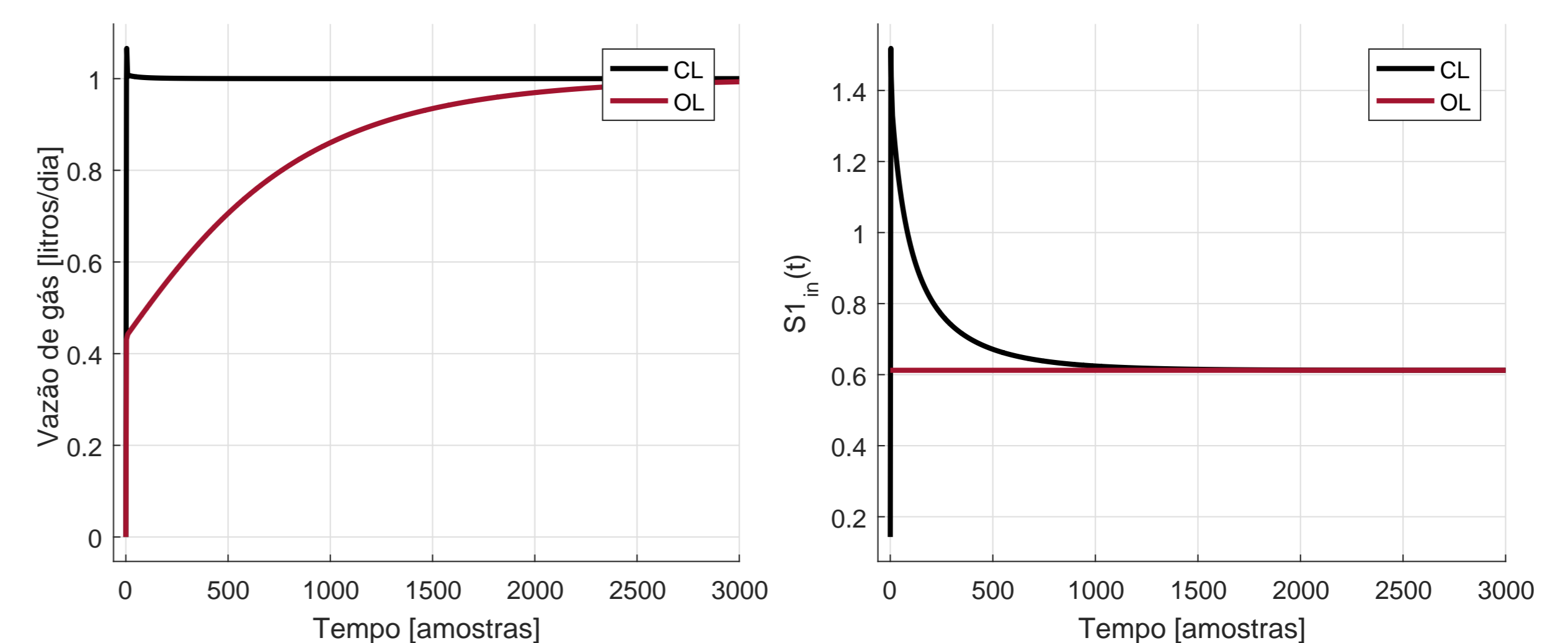


Figura 4: Comparação entre o desempenho em simulação do sistema em malha aberta (OL) em malha fechada (CL)

Conclusões

Os resultados demonstram que a implementação de um controlador PI (proporcional-integral) proporciona significativa melhoria de desempenho em relação ao sistema em malha aberta. Além disso, provê robustez a perturbações externas e a pequenas variações paramétricas. A fim de aperfeiçoar os resultados obtidos, será necessária a implementação efetiva do controlador *in situ*.