

Modelagem e simulação da produção de biossurfactante por *Bacillus pumilus* em reator contínuo

Hadassa Vingren de Andrade França^{a*}, Flávio Luiz Honorato da Silva^a, Sharline Florentino de Melo Santos^a

^aUniversidade Federal da Paraíba, Departamento de Engenharia Química, João Pessoa-PB, Brasil
*hadassavda@gmail.com

RESUMO

Biossurfactantes são moléculas anfipáticas que possuem propriedades tensoativas, produzidas por fontes biológicas, especialmente bactérias e fungos. Esses compostos têm recebido atenção por serem gerados de forma sustentável quando comparados com os surfactantes químicos derivados do petróleo, mas sua viabilidade industrial é limitada pelo alto custo de produção e baixo rendimento. Este trabalho realizou uma análise técnica da produção de biossurfactante por *Bacillus pumilus* em meio com melaço de cana, utilizando modelagem matemática e simulação de um biorreator operando de forma contínua. O modelo envolveu a resolução de equações diferenciais ordinárias (EDOs) para descrever a dinâmica das concentrações de substrato, biomassa e produto ao longo do tempo, utilizando o método numérico de Runge-Kutta. Os parâmetros cinéticos foram obtidos experimentalmente. Foi possível observar que os dados experimentais se ajustaram ao modelo, fornecendo *insights* que possibilitam ampliar a produção em larga escala.

Palavras-chave: Biorreator; Processo contínuo; Biossurfactante

1. Introdução

Os biossurfactantes são compostos tensoativos produzidos por fontes biológicas, principalmente por bactérias, fungos e leveduras, que possuem diversas estruturas anfipáticas compostas por porções hidrofílicas e hidrofóbicas. Essa configuração os torna capazes de se auto-organizar na interface entre duas fases imiscíveis, como água e óleo (Aguirre-Ramírez et al., 2021).

Os surfactantes químicos ou industriais, são derivados do petróleo ou de outras fontes não renováveis e apresentam desvantagens, como contaminação ambiental, problemas de saúde e baixa biodegradabilidade (Nagtode et al., 2023). Essas substâncias e seus subprodutos podem se acumular no ecossistema, e seus processos de produção podem ser ambientalmente perigosos. Essas razões têm direcionado o interesse para os biossurfactantes como potenciais alternativas aos surfactantes químicos tradicionais (Sultan et al., 2025).

Além de serem produtos naturais, gerados de forma sustentável e ambientalmente benignos, os biossurfactantes oferecem inúmeras vantagens potenciais em relação aos surfactantes químicos, incluindo excelente seletividade, biodegradabilidade, biocompatibilidade, biodisponibilidade, aceitabilidade ecológica e maior eficiência em condições com altas temperaturas e concentrações de sal (Thakur et al., 2024).

A produção de biossurfactantes está associada a altos custos de produção e baixos rendimentos, que continuam sendo os principais desafios para sua comercialização em larga escala. Mitigar essas dificuldades requer alternativas como otimização das cepas microbianas, utilização de substratos renováveis e de baixo custo e otimização dos parâmetros de cultivo em biorreatores que operam em maiores volumes (Gulati et al., 2025).

Na industrialização de um processo, a modelagem matemática é uma etapa crítica, servindo como ponto de partida para otimizar eficiência e rentabilidade. Para bioprocessos, os modelos cinéticos fornecem insights valiosos sobre a dinâmica do crescimento microbiano, consumo de substrato e formação de produto que permitem a previsão e avaliação de parâmetros-chave (Hiller et al., 2025).

A fermentação contínua se destaca na produção de biossurfactantes em larga escala. Nesse processo, a população microbiana permanece em uma condição fisiológica estável, garantindo produtividade consistente e controle eficiente do processo por períodos prolongados de operação. Em contraste com o processamento em batelada, os sistemas contínuos apresentam maior produtividade volumétrica, melhor utilização da capacidade do biorreator e qualidade consistente do produto (Solomon & Vishnu, 2025).

Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo realizar a análise técnica da produção de biossurfactante por *Bacillus pumilus*, utilizando-se da modelagem e simulação do processo em biorreator contínuo.

2. Metodologia

Neste estudo, considerou-se um biorreator operando em modo contínuo, com alimentação constante e remoção contínua de produtos e biomassa. A análise dinâmica desse sistema foi realizada por meio de um conjunto de equações diferenciais ordinárias (EDOs), que descrevem a variação temporal da concentração de substrato (S), biomassa (X) e de produto (P). A resolução dessas equações permite compreender o comportamento do sistema até alcançar o estado estacionário. As equações diferenciais utilizadas são baseadas em balanços de massa, levando em consideração a cinética de crescimento microbiano representada pelo modelo de Monod (1949). Ao obter as equações diferenciais ordinárias (EDOs), foi utilizado o método numérico Runge-Kutta para a resolução das Equações (1), (2) e (3). O perfil de rendimento ao longo do tempo foi avaliado no modelo de acordo com a Equação (4).

$$\frac{dS}{dt} = D(S_0 - S) - \frac{X}{Y_{X/S}} \mu_{\max} \frac{S}{K_s + S} \quad (1)$$

$$\frac{dX}{dt} = D(X_0 - X) + \mu_{\max} \frac{S}{K_s + S} \quad (2)$$

$$\frac{dP}{dt} = -DP + \frac{Y_{P/S}}{Y_{X/S}} \mu_{\max} X \frac{S}{K_s + S} \quad (3)$$

$$\%Rendimento = \frac{P}{S_0 \times Y_{P/S}} \times 100 \quad (4)$$

Onde:

S_0 : Concentração inicial de substrato [g/L]

S: Concentração de substrato [g/L]

X_0 : Concentração inicial de biomassa [g/L]

X: Concentração de biomassa [g/L]

D: Taxa de diluição [h^{-1}]

$\mu_{\max}$: Velocidade específica máxima [h^{-1}]

$Y_{X/S}$: Fator de conversão de substrato em células [$g_X \cdot g_S^{-1}$]

$Y_{P/S}$: Fator de conversão de substrato em produto [$g_P \cdot g_S^{-1}$]

K_s : Constante de saturação [g/L]

Os parâmetros cinéticos, dispostos na Tabela 1, foram obtidos através da determinação da cinética de crescimento da bactéria *Bacillus pumilus* em meio com melaço de cana para favorecer a produção de biossurfactante. O microrganismo foi isolado do solo cultivado de cana de açúcar da Usina Japungu Agroindustrial S.A, em Santa Rita, Paraíba, e cedido pelo Centro de Biotecnologia da Universidade Federal da Paraíba. O meio utilizado para cultivo foi proposto por Oliveira (2021), contendo 1 g/L de extrato de levedura, 3 g/L de KH_2PO_4 , 7 g/L de K_2HPO_4 e melaço de cana-de-açúcar diluído para uma concentração de açúcares redutores totais de 20 g/L. A constante de Monod K_s representa a concentração de substrato em que a velocidade de crescimento é metade da velocidade máxima, também obtida experimentalmente (Monod, 1949).

Para a simulação do processo, foram usados os valores dos parâmetros iniciais obtidos da cinética de crescimento experimental, onde a concentração de biomassa inicial foi de 0,6 g/L e a concentração de substrato inicial de 15 g/L. Outros parâmetros iniciais adotados para o dimensionamento do biorreator foram a vazão de 33 m^3 e o volume do biorreator de 100 m^3 .

Tabela 1. Parâmetros cinéticos do *Bacillus pumilus* em meio com melão de cana.

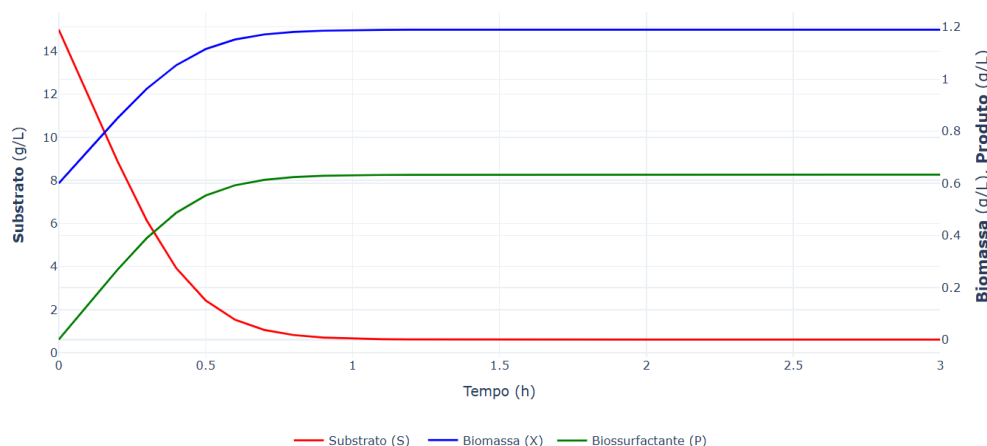
Parâmetro cinético	Valor
$\mu_{\text{máx}}$ (h^{-1})	0,219
t_g (h)	3,16
$Y_{X/S}$ (g_x/g_s)	0,041
$Y_{P/S}$ (g_p/g_s)	0,044
K_s (g/L)	13

3. Resultados

A simulação, observada na Figura 1, apresenta o comportamento do perfil de biomassa, substrato e produto ao longo do tempo. O rápido consumo de substrato demonstra que o microrganismo está metabolizando suas fontes de carbono para produzir o biossurfactante, observado pela curva do produto. De acordo com o modelo contínuo, o microrganismo permanece em condições estáveis durante todo esse processo, garantindo produtividade consistente e controle eficiente por períodos prolongados de operação. Foi possível observar que os dados obtidos na cinética experimental do cultivo em laboratório se ajustaram ao modelo. Na simulação, observa-se que o produto biossurfactante chegou ao máximo de 0,63 g/L e de biomassa de 1,20 g/L, validando o cultivo experimental, onde a produção de biossurfactante e o valor máximo de biomassa foram próximos ao simulado.

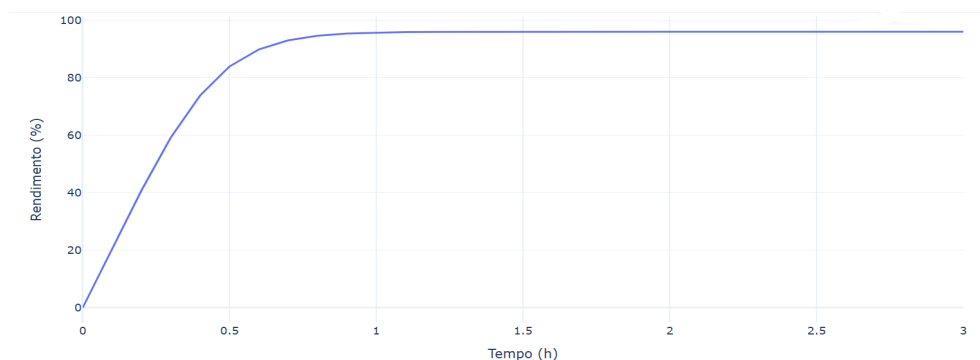
Em estudo futuro, pretende-se otimizar o processo, buscando maximizar a produção de biossurfactante e minimização de produção da biomassa por intermédio da modelagem e simulação do processo e posterior validação experimental.

Figura 1. Perfil de biomassa, substrato e produto em biorreator contínuo ao longo do tempo.



Para a produção de biossurfactantes, os sistemas contínuos apresentam maior produtividade volumétrica, melhor utilização da capacidade do biorreator e qualidade consistente do produto. A remoção contínua do produto, previne que a presença de biossurfactantes no meio possa inibir o crescimento microbiano, aumentando o rendimento, observado da Figura 2, que apresenta rendimento máximo de 95,9% (no estado estacionário da fermentação).

Figura 2. Rendimento ao longo do tempo.



A viabilidade dos processos contínuos para produção de biossurfactante têm sido alvo de diversas abordagens. Verma et al. (2023) produziram biossurfactante em reator semicontínuo, por *Bacillus subtilis* usando melaço como fonte de carbono, que em condições otimizadas produziu 13,7 g/L. Guez et al. (2021) utilizaram um modelagem teórica em reator de tanque agitado que permitiu a recuperação contínua do surfactante contida na espuma que transbordava do reator, alcançando uma remoção de produto *in situ* superior a 99%. Chen et al. (2021) combinaram separação da espuma com a fermentação contínua para separar e concentrar o biossurfactante *in situ*, obtendo uma concentração de 3,57 g/L, o dobro do produzido em fermentação por batelada.

4. Conclusão

Alimentação contínua na produção de biossurfactantes é uma rota que pode beneficiar o rendimento final do processo. O presente trabalho torna possível observar os perfis de biomassa, substrato e produto para escalas maiores, a partir da determinação de parâmetros experimentais. Esses resultados reforçam a importância da integração entre modelagem, simulação e pesquisa para otimizar processos biotecnológicos e ampliar a viabilidade da produção em escala industrial.

Agradecimentos: O presente trabalho foi realizado com apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Referências

- Aguirre-Ramírez, M., Silva-Jiménez, H., Banat, I. M., & Díaz De Rienzo, M. A. Surfactants: physicochemical interactions with biological macromolecules. *Biotechnol. Lett.*, 43 (3), 523–535, 2021.
- Chen, C., Li, D., Li, R., Shen, F., Xiao, G., & Zhou, J. Enhanced biosurfactant production in a continuous fermentation coupled with *in situ* foam separation. *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, 159, 108206, 2021.
- Guez, J.-S., Vassaux, A., Larroche, C., Jacques, P., & Coutte, F. New Continuous Process for the Production of Lipopeptide Biosurfactants in Foam Overflowing Bioreactor. *Front. Bioeng. Biotechnol.* 9, 678469, 2021.
- Gulati, D., Ahmad, M., & Bhatia, M. Evaluation of biosurfactant production from *Pseudomonas mendocina* and its antibacterial application. *Biocatal. Agric. Biotechnol.*, 66, 103609, 2025.
- Hiller, E., Off, M., Hermann, A., Vahidinasab, M., Benatto Perino, E. H., Lilge, L., & Hausmann, R. The influence of growth rate-controlling feeding strategy on the surfactin production in *Bacillus subtilis* bioreactor processes. *Microb. Cell Fact.* 23 (1), 260, 2025.
- Monod, J. The Growth of Bacterial Cultures. *Annu. Rev. Microbiol.* 3 (1), 371-394, 1949.
- Nagtode, V. S., Cardoza, C., Yasin, H. K. A., Mali, S. N., Tambe, S. M., Roy, P., Singh, K., Goel, A., Amin, P. D., Thorat, B. R., Cruz, J. N., & Pratap, A. P. Green Surfactants (Biosurfactants): A Petroleum-Free Substitute

for Sustainability-Comparison, Applications, Market, and Future Prospects. ACS omega, 8 (13), 11674–11699, 2023.

Oliveira, C. Z. Produção de biossurfactantes por *Bacillus* em meio com caldo de cana-de-açúcar [Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Paraíba]. Repositório Institucional da UFPB, 2021.

Solomon, A. A., & Vishnu, D. Integrated strategies for biosurfactant production and scale-up: Advances in fermentation engineering and computational modelling. RINENG, 27, 106853, 2025.

Sultan, F., Maji, D., Phatake, R. S., & Kumar, K. Pharmaceutical applications of microbial biosurfactants. Int. J Pharm., 681, 125887, 2025.

Thakur, V., Baghmare, P., Verma, A., Verma, J. S., & Geed, S. R. Recent progress in microbial biosurfactants production strategies: Applications, technological bottlenecks, and future outlook. Bioresour. Technol., 408, 131211, 2024.

Verma, R., Sharma, S., Kundu, L. M., Maiti, S. K., & Pandey, L. M. Enhanced production of biosurfactant by *Bacillus subtilis* RSL2 in semicontinuous bioreactor utilizing molasses as a sole substrate. J. Biotechnol., 362, 24–35, 2023.