

ANÁLISE CINÉTICA E TERMODINÂMICA DO BIOPROCESSO DE PRODUÇÃO DE HIDROMEL UTILIZANDO MEL DE *Apis mellifera* E NUTRIÇÃO ESCALONADA

M. F. Roque¹, G. A. Silva¹, R. F. Silva¹, R. E. S. Starling¹, L. R. P. de Lima², R. O. P. de Lima², F. S. Pio²

¹Graduandos(a) Centro Universitário Católica do Leste de Minas Gerais - Unileste,
Departamento de Engenharia Química, Coronel Fabriciano, Brasil
(matheusroquefm@hotmail.com)

²Docentes Centro Universitário Católica do Leste de Minas Gerais - Unileste,
Departamento de Engenharia Química, Coronel Fabriciano, Brasil

O estudo avaliou a cinética de um bioprocessos em batelada para produção de hidromel de *Apis mellifera*. Para suprir a deficiência de nitrogênio, usou-se nutrição escalonada (KH_2PO_4 e $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$) a 20°C com *Saccharomyces cerevisiae*. A termodinâmica indicou geração de 0,18 W, atestando o controle térmico passivo. Atingiu-se 8,72% ABV, com cinética ajustada ao modelo de pseudo-primeira ordem ($R^2 = 0,9558$; $k = 0,0017 \text{ h}^{-1}$), auxiliando futuros escalonamentos.

Palavras-chave: Engenharia de Bioprocessos; Cinética Fermentativa; Nutrição Escalonada; Modelagem Matemática; *Saccharomyces cerevisiae*.

INTRODUÇÃO

A produção de hidromel, embora milenar, representa um bioprocessos complexo devido à heterogeneidade da matéria-prima e à susceptibilidade da *Saccharomyces cerevisiae* a estresses osmóticos e nutricionais. Do ponto de vista da Engenharia Química, a fermentação do mosto de mel é um sistema em batelada governado por reações bioquímicas exotérmicas, transferência de massa multifásica e dinâmicas cinéticas dependentes da composição do meio (Castro, 2021).

Um dos principais gargalos tecnológicos reside na baixa concentração de compostos nitrogenados no mel, o que frequentemente resulta em fermentações lentas ou paradas prematuras (Meneguite e Brandão, 2019). O mel silvestre é naturalmente deficiente em Nitrogênio Assimilável pela Levedura (YAN), frequentemente apresentando concentrações inferiores a 50 mg/L. Em contrapartida, cepas industriais de *Saccharomyces cerevisiae* demandam concentrações superiores a 150 mg/L para assegurar a biossíntese adequada de permeases (proteínas de transporte transmembrana de açúcares) (Bisson, 1999). Esta carência nutricional, quando não corrigida, induz a lise celular e resulta em fermentações arrastadas (*sluggish*) ou paradas prematuras (*stuck fermentations*). Neste contexto, a aplicação de ferramentas de engenharia bioquímica, como o controle de balanços mássicos e a inserção de

protocolos de nutrição escalonada, torna-se imperativa para a padronização do processo.

Além do rigor técnico, o desenvolvimento de bioprocessos eficientes para a produção de bebidas fermentadas de alto valor agregado atua como um vetor de desenvolvimento socioeconômico e ambiental, incentivando a preservação do habitat de polinizadores essenciais como a *Apis mellifera*. O objetivo deste trabalho consistiu em analisar o desempenho de um biorreator em escala laboratorial para a produção de hidromel, detalhando os parâmetros termodinâmicos e cinéticos sob estratégia de nutrição escalonada. Adicionalmente, propõe-se um delineamento experimental (DOE) para a otimização sistemática de variáveis críticas de processo, visando o incremento da produtividade e do perfil sensorial do produto final.

MATERIAL E MÉTODOS

Formulação do mosto e condições operacionais

O meio fermentativo foi constituído por 2,6 L de mosto, utilizando mel silvestre ($\rho \approx 1,42 \text{ g/mL}$) diluído em água deionizada estéril até atingir uma densidade inicial (*Original Gravity* - OG) de 1,106. A Tabela 1 sintetiza a composição mássica dos componentes.

Tabela 1. Composição mássica e funcional dos insumos do bioprocesso.

Componente	Massa (g)	Função Química
Mel Silvestre	924,0	Substrato (Glicose/Fructose)
Água Deionizada	1950,0	Meio Contínuo/Diluyente
<i>S. cerevisiae</i> (US-05)	2,1	Agente Biocatalisador
KH ₂ PO ₄	0,7	Fonte de P e K
(NH ₄) ₂ SO ₄	0,7	Fonte de Nitrogênio (YAN)

Configuração do biorreator e protocolo de nutrição

Utilizou-se um biorreator de vidro (3,25 L de capacidade nominal) operando em regime de batelada, equipado com sistema de vedação hidráulica (*airlock*) para manutenção da anaerobiose. A temperatura foi mantida em $20,0 \pm 0,5^\circ\text{C}$, controlada por um termômetro inserido no mosto. A estratégia de nutrição escalonada consistiu na adição de KH₂PO₄ no *setup* inicial e (NH₄)₂SO₄ após 24 horas de inoculação, coincidindo com o início da fase log, visando maximizar a síntese proteica e a viabilidade celular. A Figura 1 apresenta o esquema do biorreator construído.



Figura 1. Esquema do biorreator.

Modelagem cinética e tratamento de dados

O monitoramento do consumo de substrato foi realizado via refratometria (°Brix) em intervalos de 24 horas. Para a caracterização quantitativa, adotou-se um modelo cinético de pseudo-primeira ordem, onde a taxa de consumo de açúcar ($-dS/dt$) é proporcional à concentração remanescente (S). A forma linearizada do modelo é expressa pela Equação 1:

$$\ln(S) = -kt + \ln(S_0) \quad (1)$$

Em que k representa a constante de velocidade (h^{-1}) e t o tempo de residência. A validação do modelo foi realizada por regressão linear dos dados experimentais obtidos na fase exponencial.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise estequiométrica e balanço de massa

O balanço de massa global foi fundamentado na estequiometria da fermentação alcoólica (Equação 2), considerando uma eficiência de conversão de 95% dos açúcares fermentáveis (73,57% m/m do mel) em etanol e CO₂, com 5% destinados à biossíntese de biomassa celular (Meneguete e Brandão, 2019).



A Tabela 2 apresenta o balanço de massa global consolidado, evidenciando a distribuição de fluxos mássicos no sistema.

Tabela 2. Balanço de massa global do sistema fermentativo.

Fluxo	Componente	Massa (g)
Entrada	Mel, Água, Levedura e Nutrientes	2877,5
Saída	Etanol (Teórico)	312,8
	CO ₂ (Efluente Gasoso)	299,2
	Água e Sólidos não fermentáveis	2194,0
	Biomassa e Açúcar Residual	71,5
Total Saída		2877,5

Caracterização termodinâmica e gestão de calor

A entalpia padrão de reação ($\Delta H^\circ_{\text{rxn}}$) foi calculada em $-74,4 \text{ kJ/mol}$ de glicose consumida, baseada nas entalpias de formação dos reagentes e produtos (Atkins et al., 2012). Para o consumo total de 3,59 mols de açúcar, o calor total liberado foi de $-267,1 \text{ kJ}$. A taxa média de geração de calor, considerando 408 horas de processo, foi calculada pela Equação 3:

$$\dot{q} = \Delta H_{\text{total}} / \Delta t \quad (3)$$

Obteve-se uma potência térmica de 0,18 W. Este valor nominalmente reduzido justifica a estabilidade térmica observada sem a necessidade de sistemas de refrigeração ativa, indicando que a dissipação convectiva natural é suficiente para manter a temperatura dentro da faixa operacional ótima para a levedura.

Dinâmica fermentativa e validação cinética

A Figura 2 ilustra o perfil temporal da fermentação. Observou-se uma fase lag extensa, de aproximadamente 72 horas. Fenomenologicamente, este período prolongado não reflete apenas a hidratação do inóculo liofilizado, mas uma resposta metabólica de adaptação ao estresse hiperosmótico severo imposto pela alta concentração inicial de sólidos (OG = 1,106).

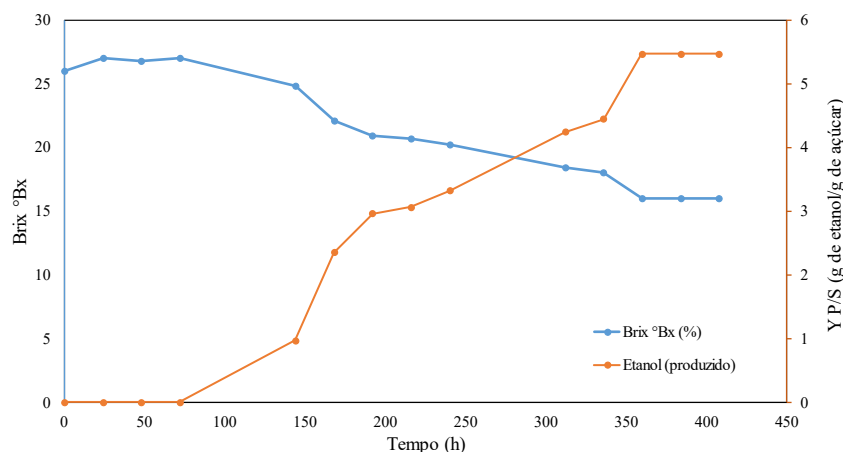


Figura 2. Curvas fermentativas.

Sob alta pressão osmótica, a levedura desvia parte do fluxo de carbono da via glicolítica principal para a biossíntese de glicerol intracelular, atuando como soluto compatível para evitar a plasmólise, o que atrasa o início da fase de crescimento exponencial (Walker, 1998). Após a aclimação osmótica, a ativação plena da via glicolítica resultou em um decaimento contínuo da concentração de substrato.

A linearização dos dados (Figura 3) resultou na equação $y = -0,0017x + 3,4029$. O coeficiente de determinação $R^2 = 0,9558$ valida a adequação do

modelo empírico de pseudo-primeira ordem. Sob a ótica da cinética de Monod, bioprocessos com elevada concentração de substrato tendem a exibir cinética de ordem zero (velocidade máxima constante). Contudo, o comportamento de pseudo-primeira ordem observado ratifica a presença de inibição simultânea no reator: à medida que o substrato diminui, o acúmulo gradativo de etanol (metabólito tóxico) e a depleção espacial de micronutrientes reduzem progressivamente a viabilidade e a atividade catalítica específica das células (Bisson, 1999).

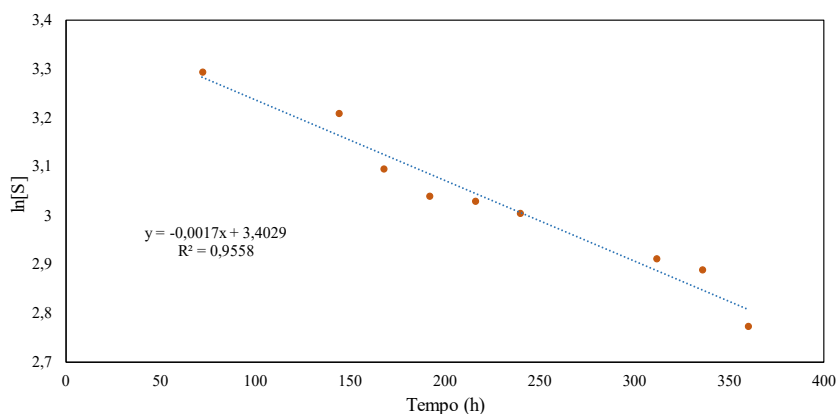


Figura 3. Modelo cinético linear de fermentação.

O processo atingiu a estabilidade após 360 horas, com um Brix residual de 16,0% e teor alcoólico de 8,72% ABV, corrigido por Brewfather (2026). A constante de velocidade aparente determinada ($k = 0,0017 \text{ h}^{-1}$) consolida-se como um parâmetro de engenharia intrínseco à eficiência deste processo reacional (SafAle US-05 a 20°C sob nutrição escalonada), sendo uma métrica fundamental para o delineamento do tempo de residência no reator para futuros cálculos de aumento de escala (*scale-up*).

Dinâmica fermentativa e validação cinética

Visando a maximização do rendimento alcoólico e a otimização do tempo de processo, propõe-se um Delineamento Fatorial Completo 2^3 com ponto central (Tabela 3). As variáveis independentes selecionadas são: Concentração Inicial de Açúcar (A), Concentração de Nutrientes (B) e Temperatura (C).

Tabela 3. Matriz de Delineamento Fatorial 2^3 para otimização do bioprocessos.

Ensaio	Fator A (OG)	Fator B (Nutrição)	Fator C (Temp.)
1 a 8	± 1	± 1	± 1
9 a 11	0	0	0

Este planejamento estatístico permitirá a identificação de efeitos sinérgicos entre as variáveis, permitindo a construção de superfícies de resposta para a definição do ponto ótimo operacional em estudos futuros.

CONCLUSÃO

O estudo demonstrou que a aplicação de princípios de engenharia bioquímica permite a transformação de um processo artesanal em um bioprocessos controlado e quantificável. A estratégia de nutrição escalonada foi eficaz na superação das limitações nutricionais do mel, garantindo a estabilidade fermentativa. A caracterização cinética forneceu parâmetros robustos ($k = 0,0017 \text{ h}^{-1}$) e o modelo de pseudo-primeira ordem foi validado estatisticamente. A análise termodinâmica confirmou a viabilidade do controle térmico passivo em escala laboratorial. Conclui-se que o sistema desenvolvido é tecnicamente robusto, estabelecendo as bases para o escalonamento industrial e para a valorização tecnológica da cadeia produtiva apícola.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Fazenda 7 Lagoas pela disponibilidade e doação dos insumos necessários para a pesquisa; ao Unileste, por ceder a infraestrutura laboratorial para o desenvolvimento do estudo; e aos professores orientadores, pelo auxílio e

acompanhamento fundamentais ao longo de todo o projeto.

REFERÊNCIAS

- ATKINS, P.; JONES, L.; LAVERMAN, L. **Princípios de química: questionando a vida moderna e o meio ambiente**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.
- BAILEY, J. E.; OLLIS, D. F. **Biochemical Engineering Fundamentals**. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1986.
- BISSON, L. F. Stuck and sluggish fermentations. **American Journal of Enology and Viticulture**, v. 50, n. 1, p. 107-119, 1999.
- BREWFATHER. **Refractometer Calculator**. Disponível em: <<https://web.brewfather.app/tabs/tools/refractometer>>. Acesso em: 18 jun. 2026.
- CASTRO, M. G. **Pontos Relevantes da Produção de Hidromel**. 2021. Monografia (Graduação em Biotecnologia) - UFU, Patos de Minas, 2021.
- MENEGUITE, A. F. A.; BRANDÃO, C. S. **Análise do Processo de Produção do Hidromel**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - UFF, Niterói, 2019.
- WALKER, G. M. **Yeast Physiology and Biotechnology**. 1. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 1998.
- WANG, L. et al. Application of UHPLC-Q/TOF-MS-based metabolomics analysis for the evaluation of bitter-tasting Krausen metabolites during beer fermentation. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 99, p. 103850, 2021.