CLARIFICAÇÃO E FERMENTAÇÃO DE MEL RESIDUAL DE USINA AÇUCAREIRA POR APLICAÇÃO DE ELETROCOAGULAÇÃO

Murielk Sebrian Valvassore (PIBIC/CNPq/FA/UEM), José Eduardo Olivo (Orientador). E-mail: jeolivo@uem.br

Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Química, Maringá, PR.

Área e subárea do conhecimento: Engenharias / Engenharia Química / Processos Industriais de Engenharia Química.

Palavras-chave: Eletrocoagulação/Eleflotação*; Saccharomyces cerevisiae*; Modelagem cinética.

RESUMO

O mel residual, proveniente da etapa final de cristalização do açúcar na indústria sucroalcooleira, apresenta elevada viscosidade e coloração escura, fatores que limitam seu reaproveitamento. Este trabalho teve como objetivo investigar a eletrocoagulação/eletroflotação como estratégia de clarificação desse material, avaliando a eficácia da separação de matéria orgânica e o efeito do tratamento sobre o processo de fermentação do produto clarificado. Um módulo experimental de eletrocoagulação em escala laboratorial foi desenvolvido, com eletrodos de alumínio e fonte de tensão regulável, utilizado no tratamento do material bruto (MB), do qual foram obtidas duas frações clarificadas, Tratado Líquido (TL) e Tratado Espuma (TE). As frações foram caracterizadas quanto ao pH e ao teor de açúcares redutores, e submetidas a ensaios de fermentação alcoólica em batelada, cujo comportamento cinético foi posteriormente validado por meio de modelagem computacional. Os resultados evidenciaram predominância do mecanismo de eletroflotação sobre a coagulação, com remoção preferencial de compostos associados à cor do mel residual, sem perda expressiva de açúcares redutores (99 a 105 g/L nas três frações). Os rendimentos em etanol foram de 90,3% para a MB, 90,1% para a TL e 86,1% para a TE, com a modelagem cinética computacional (R^2 entre 0,986 e 0,996) corroborando de forma independente o menor desempenho da fração TE, associado ao pH de fermentação não ajustado. Conclui-se que a eletrocoagulação/eletroflotação constitui estratégia viável para a clarificação do mel residual, capaz de melhorar sua qualidade visual sem comprometer seu potencial de conversão em etanol.

INTRODUÇÃO

A indústria sucroalcooleira gera, na etapa final de cristalização do açúcar, o mel residual, caracterizado por elevada viscosidade, coloração escura e presença de compostos de caramelização, fatores que restringem seu aproveitamento (ARAÚJO, 2017). A eletrocoagulação, técnica baseada na dissolução eletroquímica de

eletrodos metálicos, tem se mostrado uma alternativa promissora para a clarificação de efluente, favorecendo a remoção de impurezas por meio da formação de agentes coagulantes (DAS et al., 2022). Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo geral avaliar a eletrocoagulação/eletroflotação como estratégia de clarificação do mel residual, com foco na separação da matéria orgânica responsável pela cor do material e na preservação de seu potencial de reaproveitamento. Como objetivos específicos para elaboração do estudo, buscou-se projetar e construir um módulo experimental de eletrocoagulação em escala laboratorial, caracterizar as frações resultantes da clarificação quanto ao pH e ao teor de açúcares redutores e avaliar o efeito da clarificação sobre o processo de fermentação do mel residual, validando computacionalmente o comportamento cinético observado por meio de modelos matemáticos consagrados na literatura de fermentação alcoólica.

MATERIAIS E MÉTODOS

O módulo experimental de eletrocoagulação foi construído com eletrodos de alumínio (5 x 10 cm), alimentados por fonte de tensão contínua regulável, baseada no circuito integrado LM338, capaz de operar entre 1,4 e 18 V. Os ensaios foram conduzidos com uma amostra de mel residual bruto (MB), em béquer de 500-600 mL, com monitoramento contínuo da tensão aplicada por multímetro digital. O ensaio principal foi conduzido em quatro etapas sucessivas, totalizando 56 minutos de tratamento, ao final das quais foram obtidas duas frações, que são o líquido remanescente no béquer, denominado Tratado Líquido (TL), e o material proveniente da espuma formada durante o processo, denominado Tratado Espuma (TE). Ambas as frações receberam adição de resina catiônica e foram caracterizadas quanto ao pH e, por espectrofotometria após reação com ácido 3,5-dinitrosalicílico (DNS), quanto ao teor de açúcares redutores. Na sequência, as três frações (MB, TL e TE) foram submetidas a ensaios de fermentação alcoólica em batelada com *Saccharomyces cerevisiae*, em parceria com a disciplina de Laboratório de Engenharia Química III, sob protocolo padronizado de acompanhamento cinético, com amostragem a cada 15 minutos ao longo de 90 minutos, para determinação da concentração de substrato (DNS) e de etanol (cromatografia gasosa). Os dados cinéticos de consumo de substrato e formação de etanol foram posteriormente ajustados, em linguagem Python, a modelos matemáticos estabelecidos na literatura de fermentação alcoólica, os quais são decaimento de primeira ordem, cinética de saturação de Monod/Michaelis-Menten (ZENTOU et al., 2019), modelo de Weibull e modelo de Gompertz modificado (PHUKOETPHIM et al., 2017). O modelo mais adequado a cada fração foi selecionado por meio de ranking composto entre sete métricas estatísticas complementares (R^2, R^2 ajustado, RMSE, MAE, AICc, fator de viés e fator de exatidão), seguindo abordagem de comparação multimodelo já validada na literatura de cinética de fermentação (SALAKKAM et al., 2023).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Em todos os ensaios com a amostra bruta, observou-se intensa geração de bolhas de gás que arrastavam material para a superfície, formando espuma persistente, sem a sedimentação de flocos característica da coagulação clássica, o que caracteriza a predominância do mecanismo de eletroflotação sobre a eletrocoagulação. A determinação de açúcares redutores por DNS mostrou que as três frações (MB, TL e TE) mantiveram teores semelhantes, na faixa de 99 a 105 g/L, sem perda expressiva em relação ao material bruto, indicando que a eletroflotação removeu preferencialmente compostos associados à cor do mel residual, e não os açúcares fermentescíveis. Esse resultado é reforçado pelos rendimentos da fermentação obtidos em relação à conversão teórica máxima de Gay-Lussac, apresentados na Tabela 1, 90,3% para a MB e 90,1% para a TL, praticamente equivalentes, evidenciando que a clarificação da fração líquida não comprometeu sua fermentabilidade. A fração TE apresentou rendimento discretamente inferior (86,1%), associado à ausência de ajuste do pH de fermentação dessa fração, que permaneceu em valores mais elevados (5,2 a 5,9) e menos favoráveis à atividade da levedura, frente à faixa de 4,4 a 4,8 observada em MB e TL. Um segundo registro de fermentação convencional (MB2), de outra equipe da disciplina, apresentou rendimento estimado entre 68% e 81%, inferior à MB (90,3%) e às frações clarificadas, evidenciando que estas se situam no patamar superior da variabilidade natural do processo convencional.

Tabela 1 – Rendimento em etanol das frações MB, TL e TE em relação à conversão teórica de Gay-Lussac

Fração	S□ (g/L)	Sf (g/L)	C exp. (g/L)	Rendimento (%)
MB	27,44	2,55	11,49	90,3
TL	32,23	3,95	13,02	90,1
TE	27,39	1,49	11,39	86,1

S□: substrato inicial; Sf: substrato final; C exp.: concentração experimental de etanol (pico). Fonte: elaborada pelo autor.

A modelagem cinética computacional corroborou essas observações de forma independente e quantitativa (Figura 1).

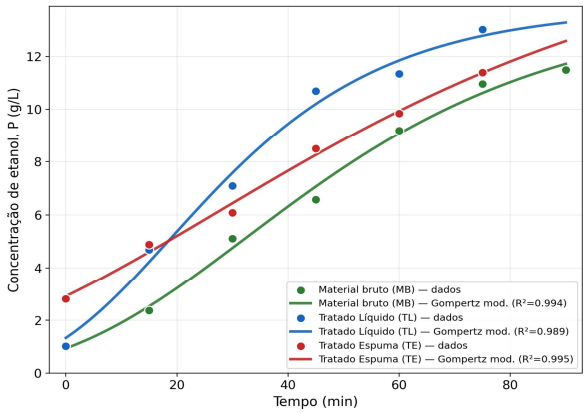


Figura 1 – Formação de etanol durante a fermentação de MB, TL e TE, com o modelo de Gompertz modificado ajustado a cada fração.

Os modelos vencedores descreveram o consumo de substrato e a formação de etanol com R^2 entre 0,986 e 0,996, validados pelas sete métricas estatísticas empregadas. O modelo de Gompertz modificado descreveu a formação de etanol nas três frações, revelando que a fração TE apresentou a menor velocidade máxima de formação de etanol (0,124 g/L·min) frente às demais (0,157 e 0,231 g/L·min para MB e TL), enquanto a fração TE foi a única cuja curva de consumo de substrato exigiu um modelo com curvatura distinta (Weibull, R^2 = 0,996) para ser adequadamente descrita. Esse conjunto de evidências, obtido de forma independente do cálculo de rendimento, reforça que o comportamento cinético da fração TE é estatisticamente distinto das demais, consistente com a hipótese do efeito do pH sobre a atividade fermentativa.

CONCLUSÕES

A eletrocoagulação/eletroflotação mostrou-se uma estratégia viável para a clarificação do mel residual da indústria sucroalcooleira, promovendo redução de cor sem comprometer o teor de açúcares redutores. A fração líquida clarificada (TL) apresentou rendimento fermentativo em etanol equivalente ao do material bruto, enquanto a fração de espuma (TE) apresentou desempenho discretamente inferior, associado ao pH de fermentação não ajustado. A modelagem cinética computacional, validada por múltiplas métricas estatísticas, corroborou de forma independente essas conclusões, agregando uma camada adicional de caracterização quantitativa ao estudo experimental.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq e à Fundação Araucária, pela concessão da bolsa de Iniciação Científica (PIBIC/CNPq-FA/UEM) que viabilizou a execução deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, L. M. de. Avaliação físico-química de melaço e melado. p. 1-34, 2017. Disponível em: https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/15973. Acesso em: 5 abr. 2026.

DAS, P. P.; SHARMA, M.; PURKAIT, M. K. Recent progress on electrocoagulation process for wastewater treatment: a review. Separation and Purification Technology, v. 292, p. 121058, 2022.

PHUKOETPHIM, N.; SALAKKAM, A.; LAOPAIBOON, P.; LAOPAIBOON, L. Kinetic models for batch ethanol production from sweet sorghum juice under normal and high gravity fermentations: logistic and modified Gompertz models. Journal of Biotechnology, v. 243, p. 69-75, 2017.

SALAKKAM, A.; PHUKOETPHIM, N.; LAOPAIBOON, P.; LAOPAIBOON, L. Mathematical modeling of bioethanol production from sweet sorghum juice under high gravity fermentation: applicability of Monod-based, logistic, modified Gompertz and Weibull models. Electronic Journal of Biotechnology, v. 64, p. 18-26, 2023.

ZENTOU, H.; ZAINAL ABIDIN, Z.; YUNUS, R.; AWANG BIAK, D. R.; ZOUANTI, M.; HASSANI, A. Modelling of molasses fermentation for bioethanol production: a comparative investigation of Monod and Andrews models accuracy assessment. Biomolecules, v. 9, n. 8, p. 308, 2019.