

FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA CONTÍNUA EM REATOR MEMBRANAR DE MISTURA IDEAL

Marcelo H Armoa¹; Eder C Gonçalves²; Silvana V. S. Armoa³

I, 2 e 3 Fatec Jaboticabal - Nilo De Stéfani

marcelo.armoa@fatec.sp.gov.br.

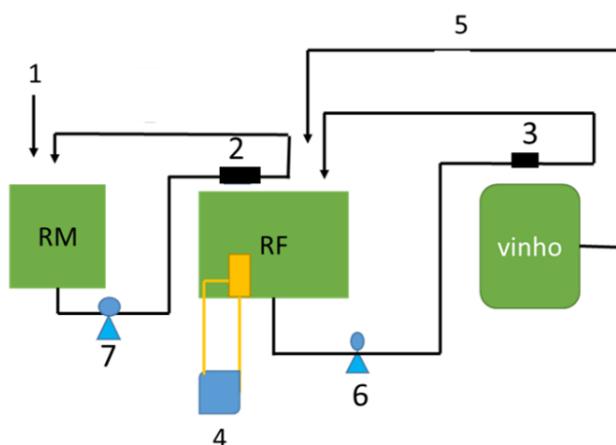
Palavras-Chave: Bioetanol, processos fermentativos, membranas

Introdução

A demanda por combustíveis de fontes renováveis, a exemplo do bioetanol da cana-de-açúcar, tem estimulado o desenvolvimento de tecnologias que aumentem a eficiência do processo de produção de etanol (ARAÚJO, 2023). O processo de fermentação alcoólica Melle-Boinot é amplamente utilizado nas usinas sucroenergéticas brasileiras pela eficiência em reciclar células viáveis de levedura e reduzir o tempo de fermentação (CÂMARA; GUIMARÃES, 2024). Contudo, além de ser um processo realizado em batelada, essa tecnologia envolve custos elevados, principalmente pela necessidade de centrífugas industriais, elevado consumo de energia elétrica e gastos com tratamento ácido e aditivos para controle microbiológico (AMORIM; BASSO; LOPES, 2009).

O conceito de obtenção contínua de bioetanol por meio de membranas vem sendo estudado e desenvolvido em busca de uma alternativa tecnológica ao proposto industrialmente. Neste conceito o substrato contido no mosto permeia do reservatório de mosto (RM) para o reservatório de fermentação (RF) por uma membrana, impedindo a entrada de contaminantes e a passagem de impurezas físicas e químicas. Simultaneamente, o etanol pode ser retirado por difusão contínua através de uma segunda membrana, evitando sua toxicidade às leveduras, favorecendo maior estabilidade operacional e deslocando o equilíbrio físico-químico do processo a favor do produto, ao evitar seu excesso, conforme ilustrado na Fig. 1.

Fig. 1. Esquema do Reator Membranar Biocatalítico (RMB): 1) alimentação de mosto para o reservatório de mosto (RM); 2) módulo de filtração tangencial com passagem direta do substrato filtrado para o reservatório de fermentação (RF); 3) módulo de filtração tangencial com retirada do vinho; 4) banho termostatizado; 5) retorno de vinho; 6) bomba centrifuga; 7) bomba centrífuga.



Essa tecnologia teve origem em diferentes pesquisas com membranas, que demonstraram eficiência na retenção de micro-organismos, na clarificação de caldo de cana e tratamento de efluentes (ARMOA, 2002; BILATO, 2013; NASCIMENTO, 2015). A convergência de resultados apontou para a possibilidade de integrar a fermentação alcoólica à separação por membranas, originando um sistema capaz de proteger o processo contra contaminações, reduzir subprodutos, eliminar o uso de antibióticos e viabilizar a fermentação contínua. Em seus estudos Ferreira *et al.* (2014) utilizou membranas cerâmicas de SiO₂,

operando com área membranar de 17 cm², alcançando teor alcoólico de 10,92%, superior ao necessário para acoplamento direto à destilaria, além de vantagens como a eliminação do uso de antibióticos, a redução de subprodutos e o aumento da eficiência fermentativa. Entretanto, os ensaios até então não eram realizados em Reator de Mistura Ideal (RMI), necessitando de controle de parâmetros como a manutenção do teor de sólidos solúveis e da viabilidade celular.

Esses resultados abriram caminho para novas adaptações no protótipo, buscando superar limitações ainda existentes e aproximar o sistema das condições de um RMI. Desta forma os estudos posteriores em RMB visaram controle de parâmetros e aumento da relação (área membranar)/(volume de reator), buscando a condução de um processo contínuo. Ensaios demonstraram diferenças significativas entre os processos realizados em batelada, batelada alimentada e contínuo, em termos de volume total de etanol produzido, patamares de sólidos solúveis, viabilidade celular e teor de etanol, demonstrando a superioridade do processo contínuo (SILVA et al., 2016; GONÇALVES et al., 2016). Ainda foi demonstrada superioridade da fermentação em RMB em medidas por cromatografia gasosa, indicando menor teor de componentes secundários na fermentação, tais como álcoois superiores. Entretanto, algumas limitações impediam de se atingir as condições de um processo contínuo, dentre elas a relação entre (área de membrana)/(volume de reator) e a manutenção da viabilidade celular.

O presente estudo avança no desenvolvimento do reator membranar biocatalítico, com foco na operação contínua em condições próximas às de um reator de mistura ideal, implementando alterações a fim de superar as limitações supracitadas para aumentar o desempenho do processo, ampliando a viabilidade técnica e o potencial de aplicação industrial da tecnologia proposta. O trabalho teve por objetivos: (a) reconfigurar o protótipo para maximizar a razão (área de membrana)/(volume de mosto); b) implementar a remoção de leveduras mortas e reposição de células viáveis, de modo a assegurar maior vitalidade do fermento e estabilidade operacional.

Material e Métodos

Materiais:

- a) Reator Membranar Biocatalítico (RMB) (Fig. 1).
- b) Membrana: Malha de poliéster, 120 mesh, utilizada como suporte; Películas celulósicas, com gramatura de 80 g m⁻², espessura de 0,2 mm, resistência ao estouro de 90 kPa (seco) e 25 kPa (úmido), permeabilidade ao ar de 35 L (s·m²)⁻¹ e diâmetro de poros variando entre 25 e 40 µm.
- c) Equipamentos: refratômetro, microdestilador e densímetro digital.
- d) Água mineral (10 L)
- e) Açúcar cristal (5 kg)
- f) Levedura selecionada.

Métodos

O experimento foi conduzido em reator membranar biocatalítico (RMB), operado a 32 °C, temperatura considerada ideal para o processo de fermentação alcoólica. Os reservatórios são acoplados a bombas centrífugas, responsáveis pela homogeneização do meio e pela força motriz para o processo de separação membranar.

As membranas foram montadas alternando-se camadas de poliéster 120 mesh servindo como suporte estrutural e películas celulósicas posicionadas de modo que a entrada e saída do fluxo ocorressem contra a superfície da celulose. Utilizou-se um conjunto de três películas celulósicas, cada uma com área de 0,070 m², permitindo ampliar a área de contato membranar para 0,210 m², em comparação aos 0,0155 m² obtidos anteriormente com membranas cerâmicas de sílica.

O abastecimento do sistema foi realizado em duas etapas: a) Mosto A: preparou-se uma solução de sacarose a 33,8 °Brix, obtida pela dissolução de 5 kg de açúcar em 10 litros de água mineral. Este mosto foi utilizado tanto para a inoculação inicial quanto para os reabastecimentos

subsequentes do sistema, garantindo a manutenção das condições de fermentação ao longo do processo; b) Mosto B: composto por 2750 mL de Mosto A (33,8 °Brix), misturando-se a 3250 mL de água mineral, e inoculados com levedura selecionada na proporção de 83 g L⁻¹, resultando em um mosto a 16,8 °Brix, para o início do processo.

O processo fermentativo foi conduzido no RMB, sendo coletadas amostras de vinho na saída do sistema para acompanhamento do desempenho fermentativo. Ao longo de 880 minutos de operação, foram coletadas 41 amostras, as quais foram submetidas a destilação em microdestilador e posteriormente analisadas em densímetro digital para a determinação da concentração de etanol.

Resultados e Discussão

A concepção do protótipo do reator membranar biocatalítico (RMB) foi orientada em busca de maximizar a razão entre (área de exposição da membrana)/(volume do reator). Nessa configuração, o acompanhamento do processo fermentativo (Tabela 1) incluiu medidas de sólidos solúveis (valores absolutos e corrigidos para a temperatura), volume amostral em intervalos de 10 minutos, teor de etanol, além das estimativas de fluxo transmembranar e demanda por sólidos solúveis. Essas últimas serviram de referência para a reposição contínua de açúcares fermentescíveis, permitindo manter o °Brix em um intervalo controlado. Os momentos de reposição de mosto e fermento foram destacados na tabela, onde a cada etapa retirava-se 600 mL do reator, promovendo a remoção de leveduras mortas e a renovação de 10% do inóculo a cada dez horas de processo.

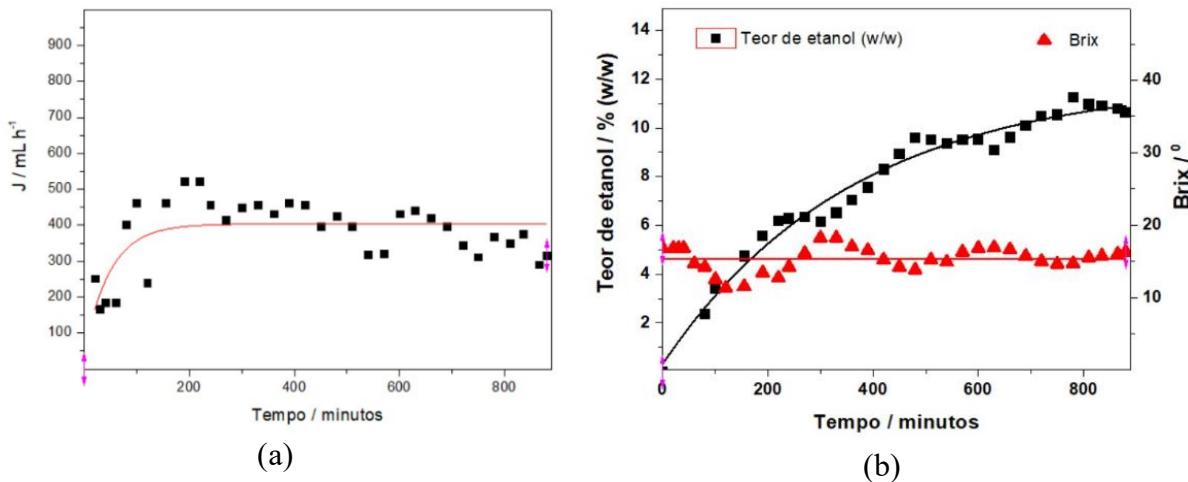
O fluxo transmembranar tendendo ao infinito foi estimado plotando-se o fluxo transmembranar em função do tempo (Fig. 2a). O valor ao ser comparado aos obtidos em experimentos precedentes, com 5 e 10 L h⁻¹ m⁻², demonstrando que as membranas cerâmicas anteriormente utilizadas ainda não foram superadas, pelo menos considerando-se a estimativa por metro quadrado de membrana. Entretanto, neste momento não é possível sintetizar maior quantidade de membrana cerâmica (utilizadas até então), fazendo com que a nova configuração (poliéster/celulósica) se faça necessária, ao permitir que seja aumentada a área de exposição de membranas e por consequência o volume de mosto processado.

Tabela 1 Acompanhamento do processo fermentativo para o protótipo de reator membranar biocatalítico.

t / min	Medidas						Estimadas	
	nD	Brix	Brix TC	T / °C	V / mL	Teor etanol (% w/w)	J / (mL h ⁻¹ m ⁻²)	Demanda por Brix / mL
0	1,3579	16,4	16,8		42		1200	-1
20	1,3579	16,4	16,8	25,8	42		1200	-1
30	1,3579	16,4	16,8		28		800	-1
40	1,3579	16,4	16,8		31		886	-1
60	1,3546	14,3	14,7	25,6	31		886	376
70	1,3546	14,3	14,7		31		886	376
80	1,3538	13,8	14,2	25,5	67	2,36	1914	466
100	1,3511	12,1	12,5	25,6	77	3,42	2200	771
120	1,3493	11	11,3	25,6	40	0	1143	987
155	1,3496	11,1	11,5	25,4	77	4,74	2200	951
190	1,3525	13	13,4	25,3	87	5,56	2486	610
220	1,3515	12,4	12,7	25,2	87	6,2	2486	736
240	1,3538	13,8	14,2	25,1	76	6,28	2171	466
270	1,357	15,8	16,1	24,6	69	6,36	1971	125
300	1,3604	17,9	18,2	24,3	75	6,14	2143	-252
330	1,3604	17,9	18,2	24	76	6,52	2171	-252
360	1,3585	16,7	17	23,4	72	7,04	2057	-37
390	1,3578	16,3	16,5	23,6	77	7,56	2200	53
420	1,3551	15	15,2	23,3	76	8,3	2171	286
450	1,354	13,9	14,2	23,2	66	8,94	1886	466
480	1,3536	13,7	13,8	22,9	71	9,6	2029	538
510	1,3556	15	15,2	22,8	66	9,52	1886	286
540	1,3552	14,7	14,9	22,9	53	9,36	1514	340
570	1,3575	16,1	16,3	22,4	53,5	9,52	1529	89
600	1,3584	16,7	16,8	22,4	72	9,54	2057	-1
630	1,3585	16,7	16,9	22,6	73,5	9,1	2100	-19
660	1,358	16,4	16,6	22,8	70	9,62	2000	35
690	1,3564	15,4	15,7	23,4	66	10,1	1886	197
720	1,3552	14,7	15	24,3	57,5	10,48	1643	322
750	1,3546	14,3	14,6	24	52	10,54	1486	394
780	1,3548	14,4	14,7	23,3	61,5	11,26	1757	376
810	1,3561	15,3	15,5	23,2	58,5	10,96	1671	233
835	1,3564	15,4	15,7	23,2	62,5	10,92	1786	197
865	1,357	15,8	16	22,9	48,5	10,8	1386	143
880		16,1	16,3	23,1	52,5	10,64	1500	89

Fonte: Autoria própria

Fig. 2. Variação temporal para a fermentação em reator membranar biocatalítico (RMB): a) fluxo transmembranar ($J_{\infty} = 1,96345 \pm 0,0902 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$); b) teor de etanol e do teor de sólidos solúveis (0Brix) para o processo fermentativo em RMB. (Teor de etanol) $_{\infty} = 12,84 \pm 0,96 \text{ \%}$ (°Brix) $_{\infty} = 14,78 \pm 1,00$.

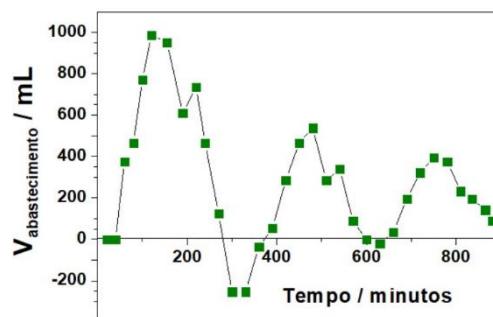


Fonte: Autoria própria

A variação temporal de Brix (Fig. 2b) mostrou melhoria de comportamento neste sistema, sendo facilmente controlado o patamar de açúcares fermentescíveis, estimado por iteração em $14,78 \pm 1,00 \text{ \%}$. Experimentos precedentes forneceram 10,78 e 10,41. Significativamente também foi observado o patamar atingido para o teor de etanol, estimado por iteração em $12,84 \pm 0,96 \text{ \%}$ em comparação aos 5% atingidos nos experimentos precedentes a este trabalho. O valor imposto como meta de Brix foi de 16,8 %, a partir do qual calculou-se a demanda por Brix em volume, conforme Fig. 2b.

A demanda por Brix, ou (Volume de Abastecimento) foi um cálculo instantâneo efetuado durante o experimento, estimando o volume necessário por hora ao reator para a manutenção do teor de sólidos solúveis. Optou-se pela reposição de mosto e de fermento uma vez por hora, conforme valores de volume de Mosto A adicionado, em amarelo na tabela 5. A retirada e reposição de 10% do volume adicionado a cada hora propõem renovação completa das leveduras do sistema em dez horas de experimento, mediante retirada de células mortas e reposição de novas. Junto com estes 10 % em volume retirados do sistema saem leveduras vivas também, além das mortas, sendo necessário um processo paralelo de recuperação de leveduras vivas que possam ser retornadas ao sistema. A Fig. 3 ilustra a variação temporal da demanda por Brix do sistema, mostrando máximos de intensidade biológica do processo fermentativo e mínimos que demonstram relativo repouso do processo fermentativo.

Fig. 3. Variação temporal da demanda por abastecimento do teor de sólidos solúveis durante o processo fermentativo



Fonte: autoria própria

Conclusões

O reator membranar biocatalítico, na configuração proposta neste estudo, representou um avanço em relação aos trabalhos anteriores. O aumento da área de membrana para 0,210 m², aliado ao uso de películas celulósicas, possibilitou maior controle do processo, refletindo na estabilidade do teor de sólidos solúveis ($14,78 \pm 1,00\%$) e no alcance de um patamar de etanol de $12,84 \pm 0,96\%$, valores superiores aos já obtidos em estudos anteriores.

A adoção da reposição periódica de mosto e levedura contribuiu para reduzir o acúmulo de células mortas e preservar a atividade do fermento, aproximando o sistema das condições de um reator de mistura ideal. Esses resultados demonstram que a configuração do protótipo foi capaz de conduzir o processo fermentativo contínuo, consolidando uma base sólida para evoluções futuras.

Portanto, este trabalho marca um passo importante no desenvolvimento da tecnologia, mas também evidencia a necessidade de novos ajustes operacionais e testes em condições ampliadas, reforçando a continuidade da pesquisa como caminho para consolidar sua aplicação prática.

Verificou-se considerável melhoria do processo de fermentação em reator membranar biocatalítico, operando como um reator de mistura ideal, em comparação a trabalhos anteriores. O teor de etanol atingido chegou a patamar nunca conseguido em trabalhos precedentes. O aumento de área de superfície filtrante proporcionou melhora da troca entre filtrado e retido, aumentando o controle sobre o teor de sólidos solúveis e por consequência melhorando os resultados de fermentação.

Ainda prosseguimos com a necessidade de ajustes nas relações entre área de superfície de membranas, volume de reator e teor de sólidos solúveis no mosto. Entretanto, a principal perspectiva deste trabalho seria a recuperação de leveduras vivas do volume retirada a cada hora, o que tornaria possível retorná-las ao processo fermentativo, mediante separação das leveduras mortas. Atualmente esta necessidade já configura uma limitação industrial, mesmo quando considerado o processo Melle-Boinot.

Agradecimentos

A todos os alunos que, ao longo destes anos se dedicaram e acreditaram em nossa parceria. Jéssica, Juliana, Celso, Mateus, Marcelo, Anderson, Roberta, Dani, Suelen, Éder, Denise, Leonardo e Silvana.

Referências

- AMORIM, H. V.; BASSO, L. C.; LOPES, M. L. **Sugar cane juice and molasses, beet molasses and sweet sorghum: composition and usage for fuel ethanol production.** In: UNICA (org.). *Ethanol and Bioelectricity: Sugarcane in the Future of the Energy Matrix*. São Paulo: UNICA, 2009. p. 365–381.
- ARMOA, M. H. **Síntese hidrotérmica de matrizes macroporosas de sílica a partir de vidro.** 2002. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2002.
- ARAÚJO, L. F. **Competitividade do bioetanol frente aos combustíveis fósseis.** *Revista Brasileira de Energia Renovável*, v. 12, n. 3, p. 55–70, 2023.
- BILATO, M. A. **Clarificação de caldo de cana por filtração tangencial utilizando membranas cerâmicas.** 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2013.
- CÂMARA, Claudionor Neves; GUIMARÃES, Camila Carla. Fermentação alcóolica: um estudo de caso sobre as ações adotadas para a otimização deste processo. *Ciência & Tecnologia: FATEC-JB*, Jaboticabal, v. 16, n. 1, p. e16102, 2024. DOI: <https://doi.org/10.52138/citec.v16i1.333>
- FERREIRA, M. J. R.; GONÇALVES, E. C.; VIEIRA, A. L.; ARMOA, M. H.; MADALENO, L. L. **Etanol obtido em reator membranar biocatalítico.** In: SIMPÓSIO DE TECNOLOGIA SUCROENERGÉTICA E DE BIOCOMBUSTÍVEIS, 2., 2014, Jaboticabal. *Anais...* Jaboticabal: Fatec, 2014.

GONÇALVES, E. C.; SILVA, S. S. B.; FERREIRA, M. J. R.; VIEIRA, A. L.; ARMOA, M. H.; MADALENO, L. L. **Obtenção de etanol em processo contínuo utilizando reator membranar biocatalítico.** *Ciência & Tecnologia: Fatec-JB*, v. 8, Suplemento, p. 45–50, 2016.

NASCIMENTO, A. M. **Tratamento de esgoto sanitário por processo de separação com membranas cerâmicas.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

SILVA, S. S. B.; GONÇALVES, E. C.; FERREIRA, M. J. R.; VIEIRA, A. L.; ARMOA, M. H.; MADALENO, L. L. **Produção de etanol em reator membranar biocatalítico: comparação entre processos.** *Ciência & Tecnologia: Fatec-JB*, v. 8, Suplemento, p. 37–44, 2016.

FERMENTAÇÃO ALCÓOLICA: um estudo de caso sobre as ações adotadas para a otimização deste processo. *Ciência & Tecnologia, /S. I.J*, v. 16, n. 1, p. e16102, 2024. DOI: [10.5213/citec.v16i1.333](https://doi.org/10.5213/citec.v16i1.333). Disponível em: <https://publicacoes.fatecjaboticabal.edu.br/citec/article/view/333>. Acesso em: 12 set. 2025.