

II- 276 - ECONOMIA CIRCULAR EM BIORREFINARIAS: EMPREGO DE BIORRETORES ANAERÓBIOS DE MEMBRANA PARA RECICLAGEM DE VINHOTO

Victor Rezende Moreira ⁽¹⁾

Engenheiro Químico pela Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais. Doutorando em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais.

Thais Girardi Carpanez ⁽¹⁾

Engenheira Ambiental e Sanitarista pela Universidade Federal de Juiz de Fora. Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais. Doutoranda em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais.

Fábio Soares dos Santos ⁽¹⁾

Engenheiro Ambiental pela Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais.

Miriam Cristina Santos Amaral ⁽¹⁾

Professora adjunta do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais.

Endereço ⁽¹⁾: Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 - Pampulha, Belo Horizonte - MG, CEP: 31270-901- Brasil - e-mail: victorrznde.eng@gmail.com (Victor Rezende Moreira), tgcarpanez@gmail.com (Thais Girardi Carpanez), fabiosoares04@gmail.com (Fábio Soares dos Santos), mcsamaral@yahoo.com.br (Míriam Cristina Santos Amaral)

RESUMO

A obtenção de biocombustível está profundamente associada a uma elevada produção de efluentes líquidos, dentre eles a vinhaça. Estima-se que sejam gerados 15 L de vinhaça para cada litro de etanol produzido. Uma alternativa ao seu tratamento são os processos biológicos como os biorreatores de membrana (BRM), que oferecem as vantagens de maior robustez em caso de oscilações na qualidade do afluente e completa retenção de microrganismos. Além disso, com os BRMs anaeróbios, também é possível recuperar o biogás gerado, e seu permeado apresenta composição favorável a utilização como fertilizante ou em práticas de fertirrigação. Desta forma, este trabalho objetivou avaliar o desempenho de um biorreator anaeróbio de membrana no tratamento da vinhaça com vistas na recuperação de água para reuso, biogás na forma de metano, e permeado para formulação de fertilizantes. O biorreator em escala de bancada foi constituído por cinco tanques e operou por 80 dias consecutivos, com capacidade constante de tratamento de 0,24 L/h. Foram monitorados a recuperação de água para reuso, biometano, e permeado para a formulação de fertilizantes. O sistema anaeróbio teria potencial para produzir 6,1 Nm³ de metano para cada metro cúbico de vinhaça tratado, o que corresponde ao potencial de produção de energia de 26,1 kW/m³. Além disso, o permeado produzido demonstrou qualidade suficiente para sua utilização nas práticas de fertirrigação ou como material percursor de fertilizante organomineral. O sistema mostrou-se de aplicação viável, com produção efetiva de biogás, possibilidade de recuperação de efluentes para produção de fertilizantes e de água para reuso. Entretanto, trabalhos futuros seriam necessários para validar os sistemas em escalas maiores.

PALAVRAS-CHAVE: Efluente industrial; Membranas; Processo Biológico; Vinhaça

INTRODUÇÃO

Os Estados Unidos e o Brasil são líderes na produção de etanol, que juntos representam cerca de 70% da produção mundial (Moreira et al., 2022a). Apesar das vantagens associadas ao biocombustível, sua obtenção está associada a uma elevada produção de efluentes líquidos, dentre eles a vinhaça. Estima-se que sejam gerados 15 L de vinhaça para cada litro de etanol produzido (Carpanez et al., 2022). Uma alternativa ao seu tratamento são os processos biológicos. Dentre eles, os biorreatores de membrana (BRM) oferecem as vantagens de maior robustez em caso de oscilações na qualidade do afluente e completa retenção de microrganismos. Além disso, o maior tempo de retenção de lodo contribui para um efluente tratado de maior qualidade, em alguns casos dentro dos requisitos para reuso industrial (Silva et al., 2021). Para os BRMs anaeróbios, também é possível recuperar o biogás, e seu permeado apresenta composição favorável a utilização como fertilizante em práticas de fertirrigação.

A oportunidade de recuperação e reutilização de subprodutos tem potencial para diminuir nossa dependência de matérias-primas como água, energia ou mesmo fertilizantes, todos possíveis de serem obtidos a partir da vinhaça. Esta é uma perspectiva sob os princípios da economia circular, incentivada em vários países. Na União Europeia, por exemplo, 18 dos 27 países já reutilizam efluentes tratados de alguma forma (Moreira et al., 2022a).

Desta forma, o objetivo deste trabalho foi de avaliar o desempenho de um biorreator anaeróbio de membrana no tratamento da vinhaça visando a recuperação de água para reuso, biogás na forma de metano, e permeado para formulação de fertilizantes.

MATERIAIS E MÉTODOS

A vinhaça foi fornecida por uma biorrefinaria que produz etanol a partir do caldo da cana, com capacidade média para processar 800 mil toneladas de cana e produzir 42 mil m³ de álcool hidratado por safra (vazão média de vinhaça: 527 m³/h). As amostras foram homogeneizadas e armazenadas sob refrigeração (4°C) em recipientes fechados de 50 litros, dos quais foram coletadas alíquotas e caracterizadas de acordo com o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.

O biorreator em escala de bancada foi constituído por cinco tanques, dois deles utilizados como reatores biológicos e colocados em série para separar os estágios acidogênico (volume útil e altura de 6,7 L e 43,5 cm) e metanogênico (volume e altura útil de 24 L e 53,1 cm), um terceiro para armazenar o vinhoto bruto, outro tanque de vácuo que garantia a pressão transmembrana necessária para a filtração e, por fim, um tanque para coletar o permeado, que também servia como tanque de alimentação para o retrolavagem. O tanque metanogênico foi equipado com um módulo de membrana submersa com área de filtração superficial de 0,0450 m², densidade de empacotamento de 500 m²/m³, com membranas de polieterimida com média tamanho de poro de 0,45 µm. O módulo de membrana utilizado foi fabricado pela PAM Membranas Seletivas Ltda. (Rio de Janeiro, Brasil). O biorreator operou por 80 dias consecutivos; antes do monitoramento, a biomassa foi aclimatada conforme descrito por Mota et al. (2013). O sistema operou com capacidade constante de tratamento de 0,24 L/h.

Durante a operação foram monitorados a recuperação de água para reuso, biometano, e permeado para a formulação de fertilizantes. A estimativa de recuperação de água considerou a vazão média anual de vinhaça e a taxa de recuperação alcançada pelo sistema. A aplicação potencial como fertilizante foi baseada na taxa de aplicação nos solos, estabelecendo o volume máximo de permeado a ser aplicado por hectare que garantisse os benefícios da adubação sem riscos de salinização do solo e lixiviação de nutrientes para os mananciais subterrâneos. O biometano foi considerado o principal biogás produzido, estimado com base na relação teórica de produção de CH₄ por DQO removida (0,35 NL/g (Inc et al., 2013)). Potenciais emissões de dióxido de carbono associadas a aplicação da vinhaça ao solo, como fertilizante organo-mineral ou na forma de fertirrigação, foram estimadas considerando a biodegradação da matéria orgânica Especificações sobre como estes e os demais valores foram obtidos são apresentadas com maiores detalhes em Moreira et al. (2022b).

RESULTADOS

As correntes de vinhotto bruto e tratado foram caracterizadas e os resultados apresentados na Tabela 1. Diariamente, o biorreator seria capaz de recuperar 0,117 m³-permeato/m²-membrana. Dado que a biorrefinaria em que a vinhaça foi amostrada produz em média ~527 m³/h de vinhaça, seria necessária uma área total de membrana de 4505 m² para a reciclagem da vinhaça e sua recuperação como permeado. Em termos de consumo específico de energia, seriam necessários 16,1 MWh/m³ para manter a operação do sistema quando projetado para tratar a vazão de vinhaça reportada pela biorrefinaria. Além de água de reuso, o permeado também poderia ser destinado a práticas de fertirrigação ou para a formulação de fertilizantes uma vez que apresentou valores elevados de nitrogênio e fósforo (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização físico-química da vinhaça bruta e do permeado do biorreator de membrana anaeróbios. DQO: demanda química de oxigênio, COT: carbono orgânico total, ST: sólidos totais, ST-F: sólidos totais – fixos, ST-V: sólidos totais – voláteis.

Parâmetro	Vinhoto bruto	Permeado BRM anaeróbio
DQO (mg/L)	13.376,3	308,0
COT (mg/L)	3.860	119
ST (mg/L)	11.319,1	2.791,6
ST-F (mg/L)	2.365,0	2.102,5
ST-V (mg/L)	8.954,1	689,1
Nitrogênio total (mg/L)	82,0	65,4
PO ₄ (mg/L)	102,6	44,3
SO ₄ (mg/L)	442,2	116,0
Na (mg/L)	118,4	361,5
K (mg/L)	3.166,4	3.398,6
Mg (mg/L)	710,5	622,4
Ca (mg/L)	253,8	220,4

ANÁLISE DOS RESULTADOS

As biorrefinarias são indústrias de uso intensivo de água e requerem cerca de 3,2 m³-H₂O/t de cana processada, sendo 25% para lavagem de cana, 29% para condensadores barométricos, 14% para resfriamento de barragens de fermentação e 19% para condensadores de álcool (Torquato et al., 2004). O cenário justifica a alternativa de recuperação de água da vinhaça e sua reutilização, com potencial para reduzir a captação de água de fontes primárias. Uma alternativa é a sua utilização como água de processo e na lavagem de cana, pois não requerem água com alto padrão de qualidade, e ainda são necessários altos volumes. Um balanço de massa considerando a quantidade de cana processada pela biorrefinaria mostrou que a lavagem da cana demandaria aproximadamente 314 m³/h de permeado, aproximadamente 60% do volume de permeado produzido. A fração restante poderia ser utilizada para outros fins, como por exemplo a obtenção de fertilizantes ou práticas de fertirrigação.

A transformação do permeado em fertilizante organo-mineral permitiria um melhor aproveitamento de seus nutrientes, além de ser uma forma ambientalmente correta de destiná-lo (Kusumaningtyas et al., 2020). Em países como o Brasil, altamente dependente da importação de fertilizantes e grande produtor de etanol de cana-de-açúcar, o uso da vinhaça como matéria-prima para um fertilizante organo-mineral pode ser uma alternativa interessante e mais sustentável. A conversão do material em um fertilizante demanda de outras etapas a fim de enquadrá-lo às exigências preconizadas na IN 61/2020. Ainda assim, destacam-se algumas vantagens para o fertilizante organo-mineral frente a prática de fertirrigação como o menor aporte de matéria orgânica excessiva ao solo, consequentemente produzindo uma menor quantidade de CO₂, e menor volume de insumo necessário para adubar um hectare de plantação. A dependência do mercado externo sujeita o Brasil e outros países aos preços impostos pelos exportadores, bem como à disponibilidade desses itens (Pinheiro et

al., 2022). Aspectos econômicos também devem ser considerados ao decidir sobre uma melhor estratégia de reutilização. Por exemplo, em cenários de escassez de água, por exemplo, a demanda por lavagem de cana-de-açúcar poderia ser priorizada e a vazão do biorreator atenderia a essa necessidade.

Além do permeado e sua utilização nas práticas de fertirrigação, o sistema anaeróbio teria potencial para produzir 6,1 Nm³ de metano para cada metro cúbico de vinhaça tratada, o que corresponde ao potencial de produção de energia de 26,1 kW/m³. Esse valor é superior ao consumo específico de energia do sistema avaliado (13,1 MW/m³). Assim, a demanda energética do sistema poderia ser suprida e o excedente destinado para outros fins. Na Figura 1 são apresentadas as principais correntes geradas considerando o escalonamento do processo a fim de atender a vazão de vinhoto gerado pela indústria em estudo.

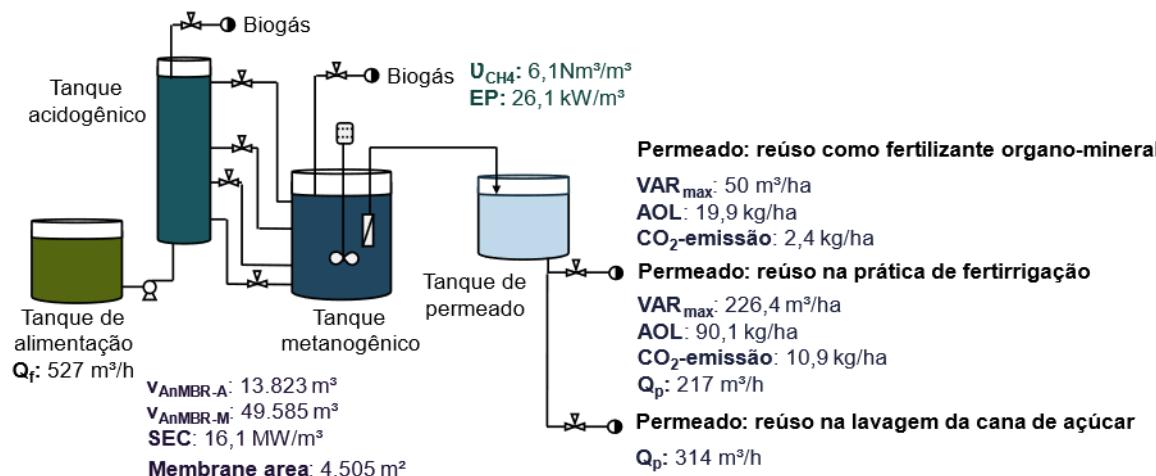


Figura 1. Escalonamento do biorreator de membrana anaeróbico. Q_f : vazão de alimentação de vinhaça bruta, Q_p : vazão de permeado, V_{AnMBR} : volume do reator (A) acidogênico e (M) metanogênico, SEC: consumo específico de energia, VAR_{max} : taxa máxima de aplicação de permeado em solos, AOL: carga orgânica aplicada, $CO_2\text{-emissão}$: potenciais emissões de dióxido de carbono, v_{CH_4} : volume potencial de produção de metano, e EP: potencial energético.

CONCLUSÕES

Os resultados sugerem a viabilidade do sistema anaeróbio para tratar o volume total de vinhaça produzido pela biorrefinaria (527 m³/h). Se tratado, seria capaz de produzir 26,1 kW/m³-vinhaça de energia, além da recuperação de água para reuso e de nutrientes para produção de fertilizantes. Em um contexto amplo, a tecnologia teria um potencial teórico para melhor reaproveitamento da vinhaça após seu tratamento e diminuir nossa dependência de recursos primários pelo potencial de reciclar água, fertilizantes e energia. Trabalhos futuros seriam necessários para validar os sistemas em escalas maiores, principalmente em termos de recuperação de fertilizantes e seus benefícios para a cultura da cana-de-açúcar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Carpanez, T. G., Moreira, V. R., Assis, I. R., & Amaral, M. C. S. (2022). Sugarcane vinasse as organo-mineral fertilizers feedstock: Opportunities and environmental risks. *Science of The Total Environment*, 154998.
- Moreira, V. R., Lebron, Y. A. R., & Amaral, M. C. S. (2022a). Enhancing industries exploitation: Integrated and hybrid membrane separation processes applied to industrial effluents beyond the treatment for disposal. *Chemical Engineering Journal*, 430, 133006.
- Moreira, V. R., Carpanez, T. G., dos Santos, F. S., Santos, L. S., dos Santos Fernandes, D., França-Neta, L. S., ... & Amaral, M. C. S. (2022b). Circular economy in biorefineries: Scale-up of anaerobic/aerobic membrane bioreactors for vinasse recycling. *Journal of Cleaner Production*, 377, 134448.
- Silva, A. F. R., Brasil, Y. L., Koch, K., & Amaral, M. C. S. (2021). Resource recovery from sugarcane vinasse by anaerobic digestion–A review. *Journal of environmental management*, 295, 113137.

5. Inc et al., 2013. M.&E. Inc, G. Tchobanoglous, F.L. Burton, R. Tsuchihashi, H.D. Stensel. Wastewater Emgomeeromg: Treatment and Resource Recovery (2013).
6. Mota, V. T., Santos, F. S., & Amaral, M. C. (2013). Two-stage anaerobic membrane bioreactor for the treatment of sugarcane vinasse: assessment on biological activity and filtration performance. *Bioresource Technology*, 146, 494-503.
7. Pinheiro, Y. A., Konda, S. T., & Bonini, L. D. M. (2022). Impactos da pandemia Covid-19 na importação de fertilizantes para o agronegócio brasileiro. CARVALHO, AC; CASTRO, AC Implicações socioeconômicas da covid-19 no Brasil e no mundo. Editora Científica Digital.
8. Torquato et al., 2004. J.R. Torquato, N.H. Callado, V.A. Pedrosa, I.M.C. Pimentel, A.C.V. Menezes, S.P.F. Omena. Demanda de água nos processos industriais de açúcar e álcool (water demand in sugar and alcohol industrial processes). XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas (2004).