ANÁLISE COMPARATIVA DE DESEMPENHO NA PRODUÇÃO DE CORRENTE ELÉTRICA EM CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL MICROBIANAS OPERADAS COM LODO DE REATOR ANAERÓBIO UASB

Luana Maria Schneider[(1)]
Graduanda em Engenharia de Biossistemas FZEA/USP.
Aldo Ivan Céspedes Arce[(2)]
Especialista de Laboratório FZEA/USP; Mestre em Zootecnia - FZEA/USP; Graduação em Curso de Formação de Oficiais Aviadores - AFA/Brasil.
Leonardo Pinto de Magalhães[(3)]
Pós-doutorando no Centro de Pesquisa Aplicada em Sustentabilidade Hídrica e Gestão de Recursos Ambientais - FZEA/USP; Doutor em Engenharia de Sistemas Agrícolas - ESALQ/USP; Engenheiro de Biossistemas – FZEA/USP.
Ernane José Xavier Costa [(4)]
Prof. Dr. na Faculdade de Zootecnia e Engenharia de Alimentos - FZEA/USP; Doutorado em Engenharia Elétrica - Poli/USP; Física - UFV.

Endereço[(1)]**:** Av. Duque de Caxias Norte, 225 - Jardim Elite, no Campus Fernando Costa, em Pirassununga - São Paulo, Brasil, CEP: 13635-900. Tel: +55 (19) 99978-0118 - e-mail: luana.maria22@usp.br.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise do desempenho eletroquímico e da eficiência de produção de corrente elétrica em Células de Combustível Microbianas (*Microbial Fuel Cells* - MFCs) utilizando lodo anaeróbio de reator UASB (*Upflow Anaerobic Sludge Blanket*) como fonte de microrganismos eletrogênicos. O foco principal consistiu na comparação entre duas configurações de separação protônica: membrana de troca de prótons (PEM) e ponte salina com NaCl. Os experimentos foram conduzidos monitorando-se a corrente e a densidade de potência sob regime de aclimatação bacteriana estável. A configuração operada com ponte salina obteve melhor desempenho, alcançando um pico de corrente de 0,072 mA, resultando em uma densidade de potência máxima de 5,03 mW/m². Em contrapartida, o sistema com membrana PEM atingiu um pico de corrente de 0,0058 mA, e uma densidade de potência de 0,330 mW/m². Esses resultados evidenciam as limitações da membrana PEM em sistemas complexos como o lodo UASB, onde a bioincrustação é favorecida pelas propriedades do líquido anódico e da membrana e limita a transferência iônica. Desse modo conclui-se que a ponte salina estabelece-se como uma alternativa econômica e eficiente para mediar a troca de prótons em MFCs, tendo o lodo UASB como uma potencial fonte de energia nesses sistemas.

PALAVRAS-CHAVE: Efluente, tratamento de esgoto, energia renovável

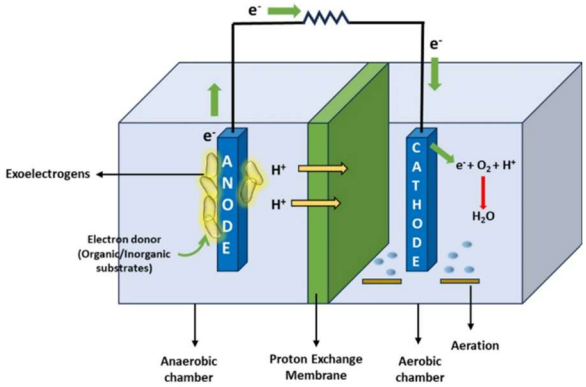
INTRODUÇÃO

Até 2050, projeta-se que as fontes renováveis forneçam 60% do mercado mundial de eletricidade (Chakma et al., 2025). Em contrapartida a essa busca por sustentabilidade, o tratamento convencional de esgoto em Estações de Tratamento (ETEs) ainda é um processo altamente oneroso devido ao seu elevado consumo energético (Kurniawan et al., 2022). (Das; Venu; Rao, 2026) analisam diversos estudos e estimam o consumo energético médio de 0,7 ± 0,6 kWh/m³ em ETEs.

Esse cenário é agravado pelo manejo do lodo biológico, um resíduo cujo tratamento e descarte geram custos elevados para a planta operacional, visto que o mesmo chega a corresponder a cerca de um sexto da carga orgânica de entrada sob condições favoráveis (Tomei; Garrido, 2024). Diante dessa problemática, as Células de Combustível Microbianas (MFCs) emergem como uma solução estratégica, pois possuem a capacidade de aliar a degradação desse lodo problemático proveniente dos biorreatores à produção simultânea de energia elétrica, otimizando os custos e a matriz energética das ETEs, como (Kurniawan et al., 2022; Ndive et al., 2025) relataram.

As MFCs caracterizam-se por ser sistemas bioeletroquímicos, normalmente contam com duas câmaras de operação, sendo uma anódica anaeróbia, e outra catódica aeróbica, separadas fisicamente por um mediador de íons H^+ (Chakma et al., 2025). Eletrodos, de material inerte são submersos no anólito e no católito conforme a Figura 1.

Figura 1 - Esquemático de funcionamento de uma MFC



Fonte: (Choudhary; Verma; Ray, 2024).

No compartimento anódico, microrganismos exoeletrogênicos atuam como biocatalisadores em ambiente anaeróbio, oxidando a matéria orgânica presente no substrato e produzindo dióxido de carbono (CO_2) prótons (H^+) e elétrons (e^-) como mostra a Equação 1, por exemplo (Obileke et al., 2021).

$$CH_3COOH + H_2O \rightarrow 2CO_2 + 8H^+ + 8e^-$$ equação (1)

Os elétrons produzidos são transferidos para os eletrodos por transferência direta, quando há o contato entre os microrganismos e o material, o que forma um biofilme, ou por meio de intermediadores de elétrons do meio (Qiu et al., 2024).

Com isso, o fluxo de elétrons é direcionado por meio de um circuito externo para o cátodo, gerando corrente elétrica nesse processo. Simultaneamente, os prótons migram pelo mediador de íons em direção ao compartimento catódico, onde se combinam com os elétrons e com um aceptor final, normalmente o comumente o oxigênio para formar água (Equação 2), fechando o ciclo bioeletroquímico (Chakma et al., 2025; Obileke et al., 2021)

$$\mathbf{8H^+ + 8e^- + 2O_2 \rightarrow 4H_2O}$$ equação (2)

A eficiência da bioeletrogênese depende intrinsecamente da ecologia e da resiliência da comunidade microbiana estabelecida no ânodo (Widera et al., 2024), onde biofilmes mais espessos tem maior eficiência na transferência de carga (Ratheesh et al., 2024). Nesse contexto, o lodo proveniente de reatores anaeróbios de manta de lodo (UASB) constitui um inóculo de altíssimo desempenho para as MFCs, uma vez que abriga consórcios microbianos densos, estruturados em grânulos e amplamente adaptados à digestão anaeróbia de altas cargas orgânicas (Mazaheri; Doosti; Zoqi, 2024). Essa complexidade estrutural e diversidade biológica viabiliza o metabolismo dos substratos e otimizam a taxa de transferência extracelular de elétrons.

Apesar do grande potencial de recuperação energética, a viabilidade de implementação em larga escala das MFCs é severamente limitada por gargalos econômicos e operacionais atrelados aos separadores físicos. As Membranas de Troca de Prótons (PEM) comerciais, como a Nafion 117, constituem o padrão-ouro devido à sua alta condutividade iônica; contudo, podem representar até 60% do custo total de fabricação do reator, o que torna o sistema financeiramente inviável (Ramirez-nava; Mart; Hern, 2021; Siddik et al., 2024). Além do fator econômico, as PEMs comerciais sofrem com a perda progressiva de eficiência provocada pela bioincrustação (*biofouling*). Em matrizes complexas ricas em Substâncias Poliméricas Extracelulares (EPS), características do lodo granular UASB, o acúmulo de biomassa e de macromoléculas hidrofóbicas obstrui os poros da membrana, elevando a impedância do sistema e suprimindo o fluxo de corrente a longo prazo (Najafpour-Darzi, 2025).

Diante dessa limitação, mediadores iônicos alternativos, como as pontes salinas compostas por polímeros gelatinosos (ágar) e sais condutores (NaCl ou KCl), vêm sendo investigados como uma solução de baixo custo e fácil confecção (Uddin; Prodhan; Nurnabi, 2025). Embora a literatura aponte que pontes salinas imponham perdas ôhmicas iniciais maiores que as membranas comerciais (Siddik

et al., 2024), o baixo custo ainda estimula pesquisas com esse mediador, buscando-se configurações ideais de operação (Christwardana et al., 2020; Saini; Shankar, 2025).

OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho consiste em avaliar e comparar o desempenho bioeletroquímico de Células de Combustível Microbianas operadas exclusivamente com lodo anaeróbio de reator UASB, estabelecendo uma análise comparativa entre o uso de PEM e ponte salina como agentes separadores.

Como objetivos específicos, busca-se a validação da geração energética em MFCs; a mensuração da corrente elétrica e da respectiva densidade produzida; além da avaliação de parâmetros elétricos que visam avaliar a potêncial aplicação de MFCs como fontes de energia, considerando a carga de operação, a e o tempo de recuperação do sistema para avaliar a possibilidade de trocar a membrana Nafion 117 por uma ponte salina.

METODOLOGIA UTILIZADA

A montagem experimental das MFCs seguiu as diretrizes metodológicas de(Uddin; Prodhan; Nurnabi, 2025), utilizando recipientes PET de 500 ml. O delineamento incluiu duas configurações distintas de separação: a MFC 1, conectada via ponte salina, e a MFC 2, integrada com membrana de troca de prótons (PEM). Os eletrodos foram confeccionados com placas de grafite (50 mm x 21 mm x 1 mm) em ambos os compartimentos, conectadas a fios de cobre isolados. A vedação completa com adesivo termoplástico assegurou a estanqueidade necessária para manter o ambiente anódico sob condições estritamente anaeróbias.

Para a confecção da ponte salina, preparou-se uma solução composta por 4g de ágar bacteriológico, 22g de NaCl e 180ml de água destilada. A mistura foi aquecida a 90°C sob agitação magnética constante até a obtenção da fluidez adequada, confirmada por teste de gota, e posteriormente transferida para tubos de PVC com 1/2 polegada de diâmetro e 3,0 cm de comprimento. O sistema foi integrado após um período de repouso de 2 horas para a solidificação total do material.

A câmara anódica foi preenchida com um substrato de 500mL composto por lodo anaeróbio proveniente da saída 2 do reator D da ETE "Laranja Azeda", Pirassununga, água de arroz e água destilada, na proporção de 3:4:3, sem qualquer tratamento prévio. Já a câmara catódica continha exclusivamente 500mL de água destilada, mantendo-se a saturação de oxigênio por meio de um sistema de bombeamento de ar com imersão de 7 cm. A exaustão de gases e o controle de pressão foram gerenciados por um tubo de 6mm selado hidraulicamente em um béquer com água, o que impediu a reentrada de oxigênio.

A disposição dos eletrodos garantiu a submersão de 12 cm das placas de grafite nos líquidos das câmaras, com as conexões de cobre passando por orifícios selados nas tampas para o monitoramento externo. O experimento operou sob temperatura controlada de 30°C em câmara germinadora, na ausência de luz, por 19 dias.

O monitoramento da tensão em circuito aberto foi realizado via plataforma Arduino com microprocessador ESP-Wroom-32. Conectores tipo jacaré capturavam a diferença de potencial, que era amplificada com ganho de 2,5 via LM358 para leitura precisa do microprocessador, sendo convertida em sinal digital (ADC) e descontando o ganho, para o registro da tensão sem o ganho do amplificador em circuito aberto. Essa ferramenta foi utilizada para garantir que as mediadas de corrente fossem realizadas com o sistema estabilizado. Para a determinação da corrente, variou-se resistências externas fechando o circuito (450 kΩ a 10 Ω) em ordem decrescente de resistência com ciclo único e aguardando 10 min para cada resistência aplicada, sendo monitorado com um multímetro digital da Keysight 34460A . Desse modo, aplicou-se a Lei de Ohm (Equação 3) sobre a tensão medida em cada resistência ao final dos 10 minutos, de modo a viabilizar a construção da curva de polarização.

$$\mathbf{i} = \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{R}}$$ equação (3)

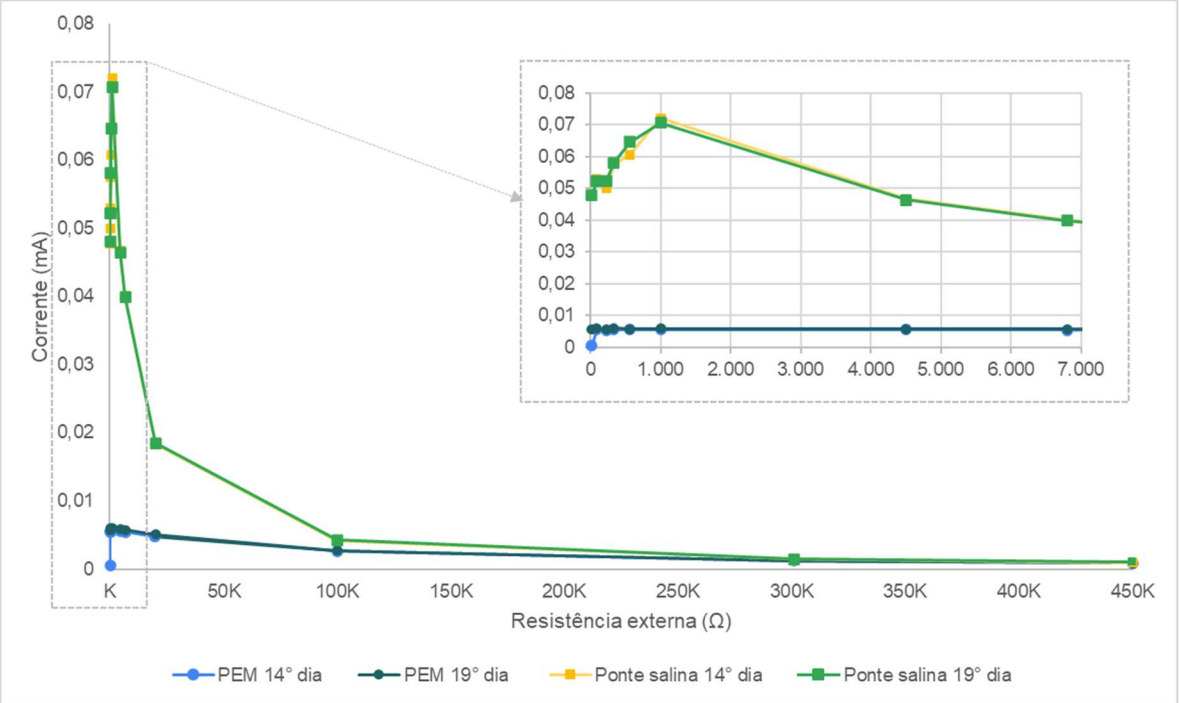
O cálculo da densidade de corrente derivou-se da aplicação da equação 3, normalizada pela área superficial ativa do eletrodo do anodo (medidas separadamente após o corte para maior precisão), sendo para a MFC com membrana 0,0021781 m² e com ponte salina 0,0021614 m². Para cálculo de potência multiplicou-se a corrente pela tensão correspondente, e também normalizou-se pela área do eletrodo.

A aplicação de carga no sistema ocorreu em dois dias, no primeiro ao 14° dia de experimento, quando a tensão em circuito aberto já estava estabilizada. E novamente no 19° dia do mesmo experimento, após 3 dias da estabilização da tensão em circuito aberto. Dessa forma, obteve-se 2 curvas de polarização para o sistema.

RESULTADOS OBTIDOS

No que tange à geração de corrente elétrica nas MFCs, a célula equipada com membrana registrou seu valor máximo 0,0058 mA no segundo dia de coleta, sob a resistência de 1000 Ω, como é possível observar na Figura 2, não houveram diferenças significativas entre os valores de corrente coletados nos dois dias. Nesse sentido, no sistema com ponte salina, o pico de corrente foi de 0,072 mA na primeira coleta, também sob a resistência de 1000 Ω, destacando a superioridade da produção em relação com a MFC com membrana sujeitas a mesma resistência externa.

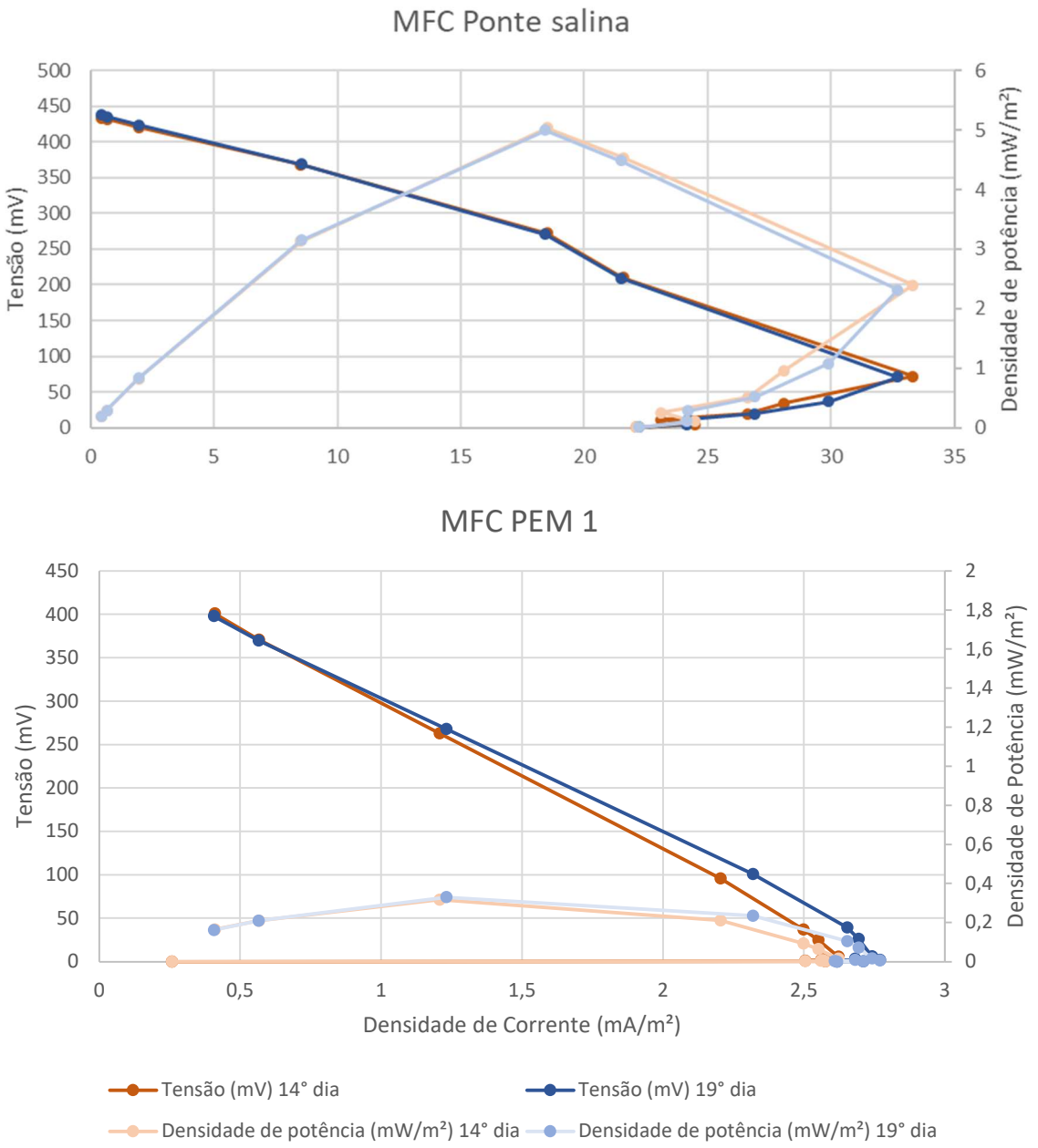
Figura 2 – Relação da resistência externa com a corrente obtida



Fonte: Autoria própria (2026).

Na curva de polarização desenvolvida (Figura 3), nota-se que tanto para o sistema com ponte salina quanto para o com PEM, em densidades de corrente maiores houve "colapso" no gráfico, retornando valores menores que medidos anteriormente. Esse fenômeno foi registrado entre as resistências 560 Ω e 10 Ω.

Figura 3 – Curva de polarização e de potência.



Fonte: Autoria própria (2026).

Além disso, é notório a diferença de densidade de corrente entre o sistema com ponte salina e com PEM, sendo registrado maior a densidade de corrente no sistema com ponte salina em ambos os dias. Consequentemente a densidade de potência também foi maior para o separador alternativo.

ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A avaliação comparativa do desempenho bioeletroquímico das MFCs destacou a ponte salina como um potencial mediador de prótons se comparado a *Nafion* 117, esse resultado tem relação com o fenômeno de bioincrustação relatado na literatura e que atinge a PEM, prejudicando a troca de prótons e consequentemente o desempenho da MFC (Najafpour-Darzi, 2025).

Além disso, é possível observar que em ambas as MFCs com o aumento da corrente, houve queda de tensão levando a um colapso nas curvas de polarização e potência. Esse efeito está relacionado com a diminuição da resistência para valores menores que 560 Ω. Esse fenômeno está relacionado a alta exigência de corrente atrelada a perda de carga da MFC que não comporta a exigência imposta (Abrevaya et al., 2015) .

Para além disso, compara-se o ponto de máxima potencia das MFCs, sendo que para a MFC com ponte salina, como mostra a Figura 3, a densidade de potência foi extremamente superior nas duas medições, atingindo 5,03 mW/m² e 4,99 mW/m² no primeiro e segundo monitoramento respectivamente. Enquanto para o sistema com PEM esses valores foram de 0,318 mW/m² e 0,330 mW/m². Tais dados têm relação doreta com as perdas ômicas no sistema, por resistência do separador protonico, liquido anodico e catódico e biofilme (Abrevaya et al., 2015; Logan et al., 2006).

Para fim de comparação normalizando a produção de corrente pela área do eletrodo, a densidade de corrente o valor máximo alcançado nesse experimento tanto para o sistema com PEM quanto para o com ponte salina, foi inferior ao obtido por (Saner; Mungray, 2023), sendo esse de 112 mA/m². Entretanto, se aproxima de valores obtidos por (Uddin et al., 2019) que obteve densidades de corrente máximas de 13,07 mA/m², 8,02 mA/m² e 4,65 mA/m², variando a fonte de lodo. Essas diferenças comprovam o impacto do lodo e do delineamento experimental na produção de corrente e consequente eficiência do sistema.

Portanto, a ponte salina se estabelece como uma alternativa econômica e robusta capaz de atingir pontos de máxima potência superiores quando comparada a membranas sujeitas a bioincrustação, por exemplo. Além disso, isso valida o uso de lodo UASB em conjunto com soluções de baixo custo para o desenvolvimento de sistemas sustentáveis e acessíveis de produção de energia. Para além disso, reitera o desenvolvimento de pesquisas com essa tecnologia de modo a aproximar ainda mais essa solução de um case aplicável no cotidiano.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos reiteram a viabilidade técnica e a robustez do lodo anaeróbio proveniente de reatores UASB como um inóculo eficaz para Células de Combustível Microbianas (MFCs). A análise comparativa revelou que a configuração com ponte salina atingiu os índices mais elevados de desempenho. Essa alternativa de baixo custo demonstrou ser eficaz para a estabilidade do sistema. Sugere-se, para investigações futuras, a otimização da condutividade na ponte salina e a busca por configurações mais seletivas, além do teste de novos materiais para os eletrodos visando melhorar a transferência de elétrons. Adicionalmente, recomenda-se a exploração de novos modelos de MFCs que possibilitem a aplicação prática do lodo em contextos além do ambiente laboratorial.

AGRADECIMENTOS

Este projeto foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa de São Paulo (FAPESP), processo N° 2026/00900-1.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABREVAYA, Ximena C. *et al. Analytical applications of microbial fuel cells. Part I: Biochemical oxygen demand. Biosensors and BioelectronicsElsevier* Ltd, , 15 jan. 2015.

2. CHAKMA, Ripel *et al. Recent Applications, Challenges, and Future Prospects of Microbial Fuel Cells: A Review. Global Challenges*, v. 9, n. 5, p. 2500004, 1 maio 2025.

3. CHOUDHARY, Meena; VERMA, Palindhi; RAY, Sanak. *A comprehensive review on bio-electrochemical systems for wastewater treatment: process, electricity generation and future aspect. Environment, Development and Sustainability*, 2024.

4. CHRISTWARDANA, Marcelinus *et al. Performance evaluation of yeast-assisted microalgal microbial fuel cells on bioremediation of cafeteria wastewater for electricity generation and microalgae biomass production. Biomass and Bioenergy*, v. 139, n. January, p. 105617, 2020.

5. DAS, Reshmi; VENU, Vishnudatha; RAO, Lakshminarayana. *Total suspended solids as a simplified metric for predicting optimized dissolved oxygen in wastewater treatment: Comparing process-based and artificial neural network models. Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, v. 219, n. October 2025, p. 110599, 2026.

6. KURNIAWAN, Tonni Agustiono *et al. Microbial Fuel Cells (MFC): A Potential Game-Changer in Renewable Energy Development. Sustainability (Switzerland)*MDPI, , 1 dez. 2022.

7. LOGAN, Bruce E. *et al. Microbial fuel cells: Methodology and technology. Environmental Science and Technology*, 1 set. 2006.

8. MAZAHERI, Afsaneh; DOOSTI, Mohammad Reza; ZOQI, Mohammad Javad. *Evaluation of upflow anaerobic sludge blanket (UASB) performance in synthetic vinasse treatment. Desalination and Water Treatment*, v. 317, 1 jan. 2024.

9. NAJAFPOUR-DARZI, Ghasem. *Microbial Fuel Cell New Source of Power. In: Biochemical Engineering and Biotechnology*. *[S.l.]*: Elsevier, 2025. p. 591–621.

10. NDIVE, Julius Nnamdi *et al. Dual-Chamber microbial fuel cell for Azo-Dye degradation and electricity generation in Textile wastewater treatment. Waste Management Bulletin*, v. 3, n. 3, p. 100195, 2025.

11. OBILEKE, Ke Christ *et al. Microbial fuel cells, a renewable energy technology for bio-electricity generation: A mini-review. Electrochemistry CommunicationsElsevier* Inc., , 1 abr. 2021.

12. QIU, Yunfeng *et al. Nanoelectrochemistry in microbial fuel cells*. *[S.l.]*: INC, 2024.

13. RAMIREZ-NAVA, Jonathan; MART, Mariana; HERN, Giovanni. *The Implications of Membranes Used as Separators in Microbial Fuel Cells*. p. 1–27, 2021.

14. RATHEESH, Anjana *et al. Tailored synthesis of CoFe2O4 nanorods to prevent clogging in the microstructured biochar-supported MFC anode for sustained performance. Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 12, n. 5, p. 113581, 2024.

15. SAINI, Anuj; SHANKAR, Vijay. *Investigating microbial fuel cell performance by developing salt bridge from agar and activated carbon derived from pine cones. Advances in Environmental Technology*, v. 11, n. 2, p. 116–129, 2025.

16. SANER, A. B.; MUNGRAY, A. K. *Performance of Microbial fuel cell as a post treatment unit of UASB reactor for distillery spent wash. Research Journal of Chemistry and Environment,* v. 27, n. 12, p. 90–105, 2023.

17. SIDDIK, A. Abubakkar *et al. An effective, novel and low-cost proton exchange membrane for microbial fuel cell-based bioelectricity production. Bioresource Technology Reports*, v. 27, p. 101929, 1 set. 2024.

18. TOMEI, Maria Concetta; GARRIDO, Juan Manuel. *Anaerobic treatment of domestic wastewater: Present status and potentialities. [S.l.: S.n.]*.

19. UDDIN, Sheikh Shehab *et al. Analysis of Measured Current Densities and Power Densities Obtained From a Microbial Fuel Cell Using Saltbridge as Membrane. In: International Conference on Innovation in Engineering and Technology (ICIET)*, 2019. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8660915>. Acesso em: 28 jul. 2026

20. UDDIN, Sheikh Shehab; PRODHAN, Md Mahidul Haque; NURNABI, Mohammad. *Studies on agar salt bridge based dual chamber microbial fuel cells using sludge and dustbin waste. Biomass Conversion and Biorefinery*, v. 15, n. 6, p. 9435–9443, 1 mar. 2025.

21. WIDERA, Bartosz *et al. Relationship between biodiversity and power generated by anodic bacteria enriched from petroleum-contaminated soil at various potentials. International Biodeterioration and Biodegradation*, v. 194, n. February, 2024.