

II-699 - CÉLULA A COMBUSTÍVEL MICROBIANA EM ESCALA AMPLIADA PARA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE DURANTE O TRATAMENTO DE EFLUENTES

Ana Carla Sorgato⁽¹⁾

Engenheira Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Mestre em Engenharia Ambiental (UFSC). Doutoranda em Engenharia Ambiental (UFSC).

Thamires Custódio Jeremias⁽²⁾

Mestre em Energia e Sustentabilidade (UFSC). Doutoranda em Engenharia Ambiental (UFSC).

Ketley Costa Rocha Arruda⁽³⁾

Mestre em Engenharia Química (Universidade Federal de Goiás - UFG). Doutoranda em Engenharia Ambiental (UFSC).

Fernanda Leite Lobo⁽⁴⁾

Doutora em Engenharia Ambiental (University of Colorado Boulder). Professora do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (Universidade Federal do Ceará - UFC).

Flávio Rubens Lapolli⁽⁵⁾

Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento (Universidade de São Paulo – USP). Professor do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (UFSC).

Endereço⁽¹⁾: Campus Universitário Reitor João Ferreira Lima – Trindade - Florianópolis – Santa Catarina - CEP: 88040970 - Brasil - Tel: +55 (48) 3721-7750 - e-mail: ana.sorgatogmail.com | ana.sorgato@posgrad.ufsc.br

RESUMO

O elevado consumo energético nas estações de tratamento de efluente aliado a capacidade de geração de energia elétrica a partir dos esgotos chama a atenção para a implementação de tecnologias que favoreçam a sustentabilidade destes sistemas. Células a combustíveis microbianas (CCM) podem ser aplicadas na geração de eletricidade direta por meio do tratamento de efluentes, isto é, promove a melhoria da qualidade de água e produção de energia limpa simultaneamente. A tecnologia vem se apresentando como uma promissora solução, mas seus estudos se concentram em escala laboratorial, em volumes de reator reduzidos, de 28 a 100 mL. Aumentar a escala operacional da CCM é desafiador, uma vez que demanda alta área superficial do eletrodo para manter as bactérias eletroativas em contato com o substrato e, conseqüentemente, manter a produção de energia elétrica. Frente esta perspectiva, o presente trabalho objetivou operar uma CCM com volume de 2L. Para isso, a CCM foi abastecida com efluente sintético em fluxo contínuo, com carga orgânica volumétrica de 1 kgCOD/m³.d e tempo de detenção hidráulica de 12 h. A CCM contou com eletrodos do tipo MEA, conectados por um sistema externo composto por fio de cobre e resistor externo de 1000 Ω. A CCM foi monitorada quanto a geração de energia elétrica (tensão, corrente elétrica, eficiência coulômbica) e capacidade de remoção de poluentes (DQO, NH₄⁺, PO₄³⁻). Os resultados indicaram a possibilidade de realizar o aproveitamento energético a partir desta tecnologia, uma vez que foi possível obter tensão média de 387,48 ± 118,10 mV. Quanto ao tratamento de efluentes, a CCM atingiu remoção média de DQO de 21%, no entanto não se verificou remoção de nutrientes. Portanto, a CCM pode ajudar a minimizar o potencial poluidor dos efluentes e gerar eletricidade passível de ser aplicada durante o tratamento de efluentes.

PALAVRAS-CHAVE: Tratamento de efluente, Bactérias eletroativas, Energia renovável, *Scale-up*; Sustentabilidade.

INTRODUÇÃO

Os processos envolvidos para o tratamento de águas residuárias, muitas vezes necessitam de grande quantidade de energia elétrica. O tratamento de efluentes pode representar até 3% do consumo global de eletricidade, e na maioria dos casos, está relacionado com o consumo de combustíveis fósseis (LI; YU; RITTMANN, 2015). Yang *et al.* (2020) afirmam que o consumo de energia em função do volume de esgoto tratado varia entre 0,112 a 0,808 kWh/m³. O elevado consumo energético empregado para o tratamento de efluente estimula a

busca por fontes renováveis como, por exemplo, a própria energia presente nos esgotos, proveniente da matéria orgânica (DENG *et al.*, 2023).

Desta forma, a recuperação energética a partir do tratamento de efluentes é uma alternativa para auxiliar os sistemas de tratamento a se tornarem sustentáveis. Uma maneira de promover esse aproveitamento energético é através da digestão anaeróbia. Seu produto final é a geração de biogás com potencial de recuperação para fontes energéticas, o qual demanda tratamentos adicionais para purificação (NGUYEN; BABEL, 2022). Por outro lado, células a combustível microbianas (CCM), do inglês *microbial fuel cell* (MFC), apresentam a capacidade de converter diretamente a energia química presente na matéria orgânica do efluente em eletricidade. Assim, esta tecnologia tem se destacado como uma alternativa apropriada para tratamento de efluentes e geração de eletricidade limpa simultâneos (LUO *et al.*, 2023).

A estrutura da CCM se assemelha a de uma pilha convencional, sendo composta por um compartimento anódico e catódico e uma membrana de troca de prótons (PEM). A CCM conta com ação biológica de microrganismos eletroativos. Portanto, no ânodo, em ambiente anaeróbio, as bactérias desenvolvem um biofilme eletroativo, sendo responsáveis pela oxidação da matéria orgânica presente no efluente (OBILEKE *et al.*, 2021; OPOKU *et al.*, 2022). Através da cadeia respiratória das bactérias eletroativas são produzidos elétrons, os quais são doados para o ânodo por meio de estruturas de transporte. Os elétrons são transferidos através do circuito externo para o cátodo, produzindo uma corrente elétrica (DWIVEDI *et al.*, 2022). Ainda no cátodo, ocorre a reação de redução do oxigênio, utilizando os elétrons provenientes do circuito externo, associado com os prótons gerados pela oxidação da matéria orgânica, sendo estes transportados através da membrana, que combinam com o oxigênio disponível na câmara catódica, para formar água (LUO *et al.*, 2023).

Diversas vantagens indicam que a CCM é uma alternativa sustentável para ser utilizada em estações de tratamento de efluentes (ETE). Por exemplo, a sua capacidade de converter diretamente a energia presente nos esgotos em eletricidade sem qualquer tratamento adicional; remoção de matéria orgânica, nutrientes e toxicidade; redução da produção de lodo em comparação com os processos de digestão anaeróbia e lodo ativado; dispensa aeração em muitos casos e pode ser utilizada em locais remotos (CANO *et al.*, 2021; DO *et al.*, 2018; LUTTERBECK *et al.*, 2020; MARASSI *et al.*, 2020; WANG *et al.*, 2018; YU *et al.*, 2021).

Embora as CCM sejam consideradas uma alternativa promissora para geração de energia renovável, sua aplicação ainda é restrita a escala laboratorial, com poucos estudos retratando a operação em cenários similares a realidade. Rossi *et al.* (2022) utilizaram uma CCM para tratamento de efluentes domésticos cujos resultados demonstraram uma densidade de potência máxima de 0,043 W/m² com 45% de remoção de demanda química de oxigênio (DQO). A produção de energia elétrica nas CCM é baixa, na faixa de mW. De acordo com Yu *et al.* (2021), as maiores densidades de potência reportadas para CCM operando com efluente real variam de 200 a 250 W m⁻³.

Nesse sentido, a aplicação da CCM no tratamento de efluentes para aproveitamento energético torna-se promissora devido a conversão direta de matéria orgânica em eletricidade. No entanto, pesquisas envolvendo CCM geralmente são aplicadas em reatores com um volume de trabalho de 28 mL, indicando a necessidade de executar pesquisas envolvendo a operação em maiores escalas (MARASSI *et al.*, 2020; ROSSI *et al.*, 2022). Ampliar a escala operacional da CCM é tecnicamente desafiador, devido à necessidade de uma alta área de superfície específica do eletrodo para manter as bactérias eletroativas em contato com o efluente e grandes volumes devem ser implantados para atingir uma quantidade de corrente apta para ser aplicada em sistemas reais (WANG, H.; PARK; REN, 2015; AN *et al.*, 2020).

Portanto, este estudo teve como objetivo a operação de uma CCM com cátodo exposto ao ar, com volume útil de trabalho de 2 L, operando com parâmetros baseados em dados de literatura para estação de tratamento de efluentes domésticos, a fim de avaliar o potencial de produção de energia elétrica e a capacidade de tratamento do efluente.

MATERIAIS E MÉTODOS

UNIDADE EXPERIMENTAL

Para execução desta pesquisa, utilizou-se uma CCM de câmara única, com cátodo exposto ao ar, em acrílico translúcido com volume de útil e de trabalho de 2 L. A CCM possuía eletrodo do tipo MEA (*Membrane Electrode Assembly*), com área útil de 132 cm². O eletrodo foi composto por uma membrana trocadora de prótons Nafion™ (212) alocada entre o ânodo de papel de carbono e cátodo de tecido de carbono coberto com uma camada de Platina (0,4 mgPt/cm²). Placas de aço inoxidável foram utilizadas como coletoras de elétrons, e conectadas por um sistema externo composto por fio de cobre e resistor externo de 1000 Ω. A disposição do eletrodo bem como a CCM empregada no experimento são apresentadas na Figura 1.

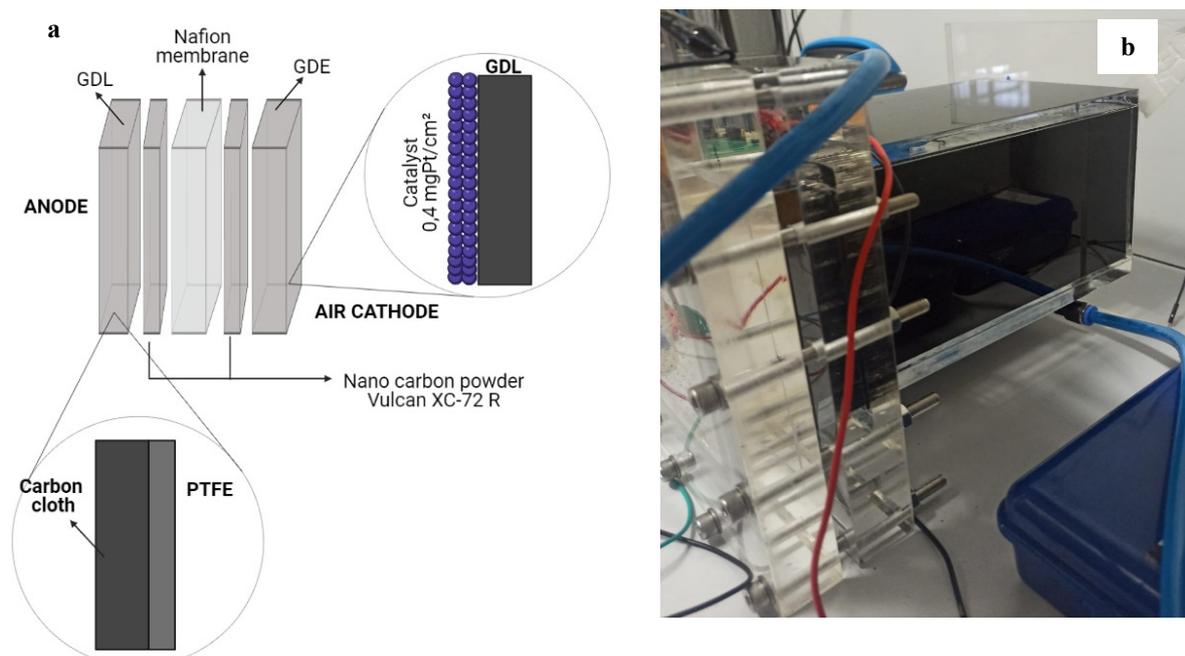


Figura 1: Disposição do eletrodo tipo MEA (a); CCM em acrílico com volume útil de 2 L em operação (b). Fonte: Sorgato (2022).

OPERAÇÃO DA CCM

O sistema foi inoculado utilizando lodo de reator anaeróbico de tratamento de efluentes domésticos da cidade de Florianópolis. A metodologia utilizada para inoculação e *start-up* foi previamente descrita Sorgato *et al.* (2022). A CCM atingiu estabilidade operacional em 15 dias. Dessa forma, a CCM passou a ser abastecida com efluente sintético com características similares ao efluente doméstico, com a seguinte composição 850 mg/L de CH₃COONa, 170 mg/L de KH₂PO₄, 280 mg/L de NH₄Cl, 10 mg/L de MgSO₄·7H₂O, 7,3 mg/L de CaCl₂·2H₂O, 0,2 mg/L de CuSO₄·5H₂O, 2,2 mg/L de ZnSO₄·7H₂O, 0,5 mg/L de CoCl₂·6H₂O, 5,00 mg/L de FeSO₄·H₂O, 2,15 mg/L (SOUZA *et al.*, 2020). O efluente sintético apresentou concentração média de DQO de aproximadamente 650 mg/L. A alimentação da CCM foi feita em regime contínuo utilizando uma bomba peristáltica (Watson Marlow, 323-S). Manteve-se o tempo de detenção hidráulica (TDH) igual a 12 h. A CCM foi operada com carga orgânica volumétrica (COV) igual a 1 kgCOD/m³.d. Durante a operação, a temperatura ambiente foi mantida em 30 °C e pH em 7,5. A Figura 2 apresenta o esquema operacional da CCM.

3.2 ANÁLISE DE DADOS

Para o monitoramento do sistema quanto a capacidade de tratamento de efluente, foram caracterizadas as amostras do efluente sintético bruto e efluente tratado pela CCM. As concentrações de DQO, N-NH₄⁺ e P-PO₄³⁻ foram avaliadas utilizando a metodologia Hach 8000, Método colorimétrico de Nessler e Método

molibdofosfórico, respectivamente. O pH, condutividade elétrica, oxigênio dissolvido e temperatura foram monitorados através de sonda multiparâmetros (AKSO, AK88).

A tensão (V) do circuito foi medida a cada 3 min através de um multímetro digital ET-2615A (Minipa®). A corrente elétrica (mA), foi calculada conforme a Lei de Ohm. A potência e a eficiência coulômbica foram determinadas de acordo com Logan et al. (2006). Ademais, a corrente e potência geradas foram normalizadas pela área de eletrodo a fim de se obter a densidade de corrente e potência, respectivamente.

As curvas de polarização foram geradas através da variação do resistor externo. Inicialmente, a CCM foi mantida em circuito aberto (sem resistor) até a observação da estabilidade de tensão. Após, os eletrodos foram reconectados ao resistor de 1000 Ω . Novamente, após a estabilização da tensão, o valor era anotado, e se reduziu a tensão, utilizando resistores externos de 500, 200, 100, 50, 20, 10 Ω (YANG *et al.*, 2020).

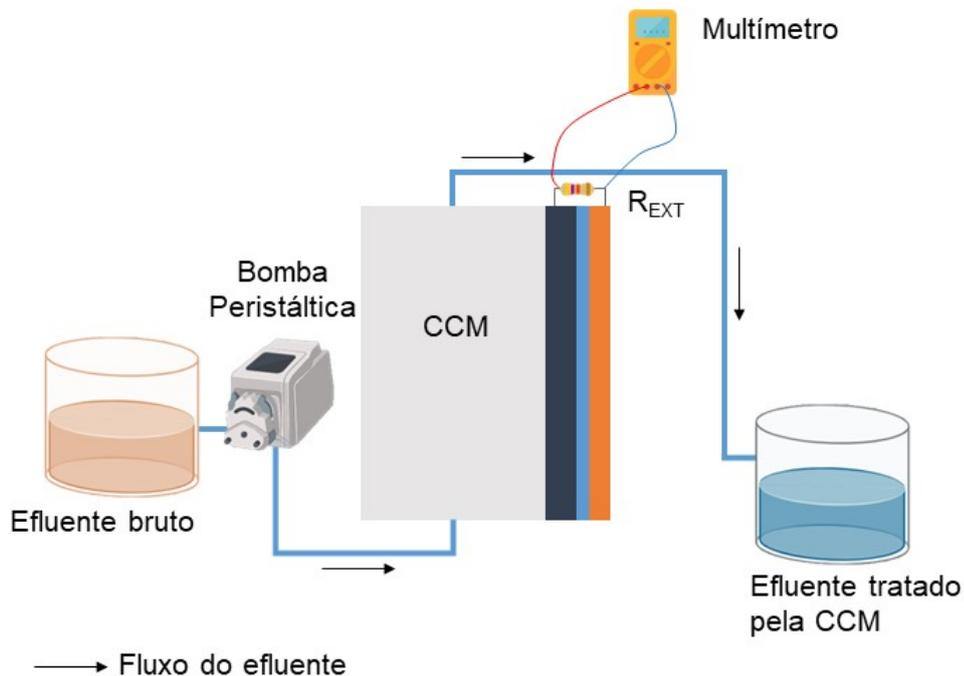


Figura 2: Esquema operacional da CCM. Fonte: Sorgato (2022).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A densidade de corrente é um parâmetro eletroquímico que representa o fluxo de elétrons entregue à reação de redução de oxigênio no cátodo. Durante os primeiros dias de operação da CCM, foi possível observar a oscilação da geração de corrente elétrica, expressa em função de densidade de corrente (Figura 3). Isso se deve a alteração do regime de operação da CCM, bem como o substrato, o qual passou de fluxo intermitente e meio de crescimento, durante a inoculação para contínuo e efluente sintético, respectivamente. A produção de corrente elétrica aumentou em poucos dias, atingindo valor máximo de 0,46 mA/m². Após o dia 23, a densidade de corrente elétrica diminuiu gradualmente para 0,03 mA/m², aproximadamente.

A oscilação observada na produção de corrente elétrica pode ser atribuída a adaptação do biofilme as condições do meio. Pasternak, Greenman e Ieropoulos (2018) pontuaram comportamento semelhante, na qual evidenciou-se que as alterações das condições do meio provocaram impacto no biofilme eletroativo, que reajustou o seu metabolismo para as novas condições. Após, a tensão aumenta gradativamente até atingir a estabilidade (ZHANG *et al.*, 2019).

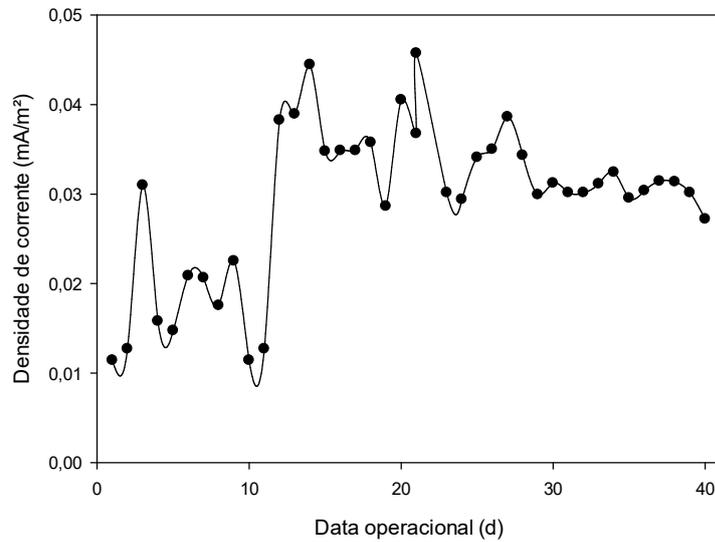


Figura 3: Densidade de corrente.

A Figura 4 apresenta a curva de polarização, bem como a potência máxima produzida pela CCM nas condições impostas pelo experimento. A CCM operando sem a influência do resistor externo, ou seja, em circuito aberto, atingiu a tensão de 680 mV. Após variar os resistores, obteve-se a densidade máxima de potência igual a 15,93 mW/m².

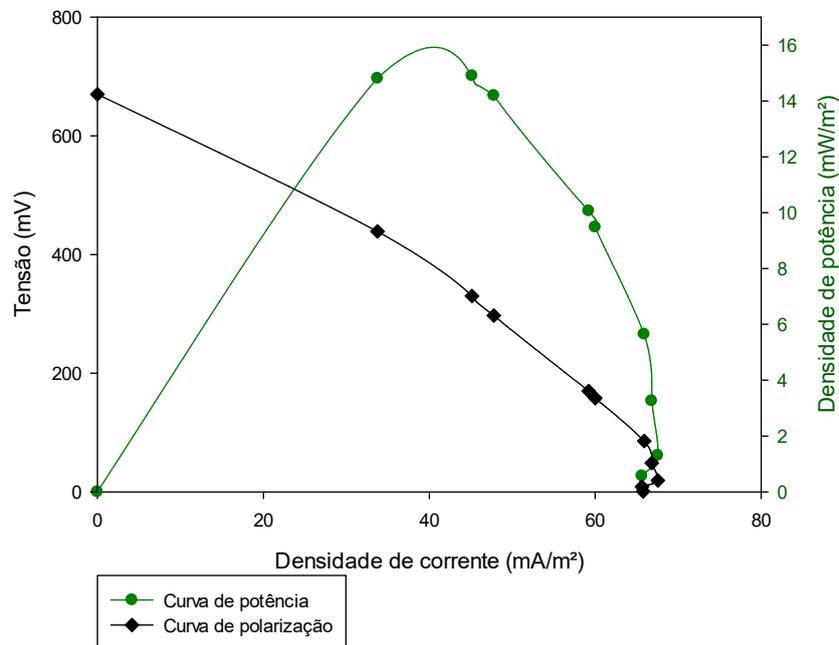


Figura 4: Curva de potência e polarização.

Através das curvas de polarização e seu formato parabólico, é possível identificar perdas tipicamente ôhmicas, as quais podem ser atribuídas às perdas metabólicas, resistências eletrolíticas e a presença da membrana trocadora de prótons (LOGAN *et al.*, 2006; MARASSI *et al.*, 2020). Quanto maior a resistência interna da CCM, menor será a densidade de potência produzida, pois uma quantidade substancial de elétrons será perdida para superar a resistência formada dentro da CCM (ULLAH; ZESHAN, 2020).

A fonte de carbono da CCM, o acetato de sódio, foi adicionada a uma concentração de 642,2 mgDQO/L. Neste estudo, a eficiência média de remoção de DQO foi de $21,13 \pm 5,02$ % em um TDH de 12 h (Tabela 1). Ahn e Logan (2010) encontraram resultados semelhantes, cerca de 30% de remoção de DQO, operando uma CCM com esgoto doméstico em fluxo contínuo (OLR 1 kg/m³d).

As taxas de remoção de DQO na CCM são afetadas pela operação do reator, atividade dos microrganismos eletroativos e não eletroativos, afinidade pelo substrato e área de superfície do eletrodo do ânodo (YE *et al.*, 2020). Ademais, o TDH também pode ter influenciado, uma vez que valores superiores resultam em maior tempo de contato para os microrganismos oxidarem a matéria orgânica e transferir os elétrons, melhorando o desempenho do sistema (SUBHA *et al.*, 2019; YE *et al.*, 2020).

Além disso, a eficiência de remoção de DQO pode ser explicada pela resistência externa ($R_{ext} = 1000 \Omega$). A resistência externa afeta a taxa de transferência de elétrons, atividade metabólica e cinética de degradação orgânica, visto que é possível observar maiores taxas de remoção em resistores externos inferiores (ZHANG *et al.*, 2011). A eficiência média de remoção de DQO diminuiu de $85,63 \pm 0,08$ % para $82,70 \pm 0,31$ % conforme a resistência externa foi variada de 200 para 2000 Ω (YANG *et al.*, 2022).

Tabela 1: Valores médios e desvios padrão de tensão, densidade de potência, eficiência coulombic e remoção de DQO.

| PARÂMETROS | VALOR MÉDIO |
|-----------------------|-----------------------------------|
| Tensão | $387,48 \pm 118,10$ V |
| Densidade de potência | $0,08 \pm 0,04$ mW/m ² |
| Eficiência coulômbica | $5,32 \pm 2,38$ % |
| Remoção de DQO | $21,13 \pm 5,02$ % |

Uma vez que a remoção de DQO foi baixa, diversos estudos sugerem o acoplamento da CCM como outras tecnologias de tratamento afim de completar a remoção de matéria orgânica e atender os padrões de lançamento de efluente, podendo citar como exemplo o emprego de biofiltro (ROSSI *et al.*, 2022), biorreator a membrana (ZANG *et al.*, 2023), *wetland* (MITTAL *et al.*, 2023), entre outros

Cabe destacar que a CCM avaliada por este estudo não apresentou capacidade para remoção de nitrogênio amoniacal e fosfato, uma vez que as concentrações de entrada foram 78,83 mg/L e 9,06 mg/L, e saída igual a 91,68 mg/L e 10,11 mg/L, respectivamente. Entende-se que esta limitação pode estar atrelada a falta de alternância de ambientes anaeróbios e aeróbios para remoção biológica destes nutrientes (METCALF; EDDY, 2014). Como estes nutrientes não foram removidos, estes podem ser utilizados como aceptores de elétrons, afetando a produção de eletricidade (MARASSI *et al.*, 2020; SUBHA *et al.*, 2019).

Diferentes aceptores de elétrons presentes na câmara anódica (nitrito, sulfato, oxigênio dissolvido) exibem propriedades físicas e químicas diferentes do ânodo (por exemplo, potencial de oxidação) e, portanto, afetam a eficiência da produção de eletricidade (MARASSI *et al.*, 2020; SU *et al.*, 2018). Morris e Jin (2009) avaliaram a operação de uma CCM com presença de NO_3^- e SO_4^{2-} . Os resultados sugeriram que a presença destes compostos favoreceu o desenvolvimento de bactérias que consumiam a matéria orgânica presente no meio, entretanto, estas não utilizavam o ânodo comoceptor de elétrons, resultando decréscimo na geração de energia elétrica.

Por fim, a CCM foi monitorada de acordo com a eficiência coulômbica (EC). Este parâmetro é utilizado para avaliar a recuperação de energia da CCM com base na DQO removida e corrente elétrica produzida. Com isso, a EC apresentou valores entre 2,38 a 8,41%, ou seja, este valor corresponde a matéria orgânica que foi efetivamente utilizada para geração de eletricidade (Tabela 1). Zhuang *et al.* (2012) também observaram que CCM alimentadas com efluentes domésticos produzem menores eficiências coulômbicas, devido à complexidade do substrato e da interferência causada pela oxidação anaeróbica, fermentação e atividade metanogênica.

A EC é controlada por três fatores principais: (i) atividade do microrganismo; (ii) processo competitivo para doador de elétrons; e (iii) respiração aeróbica devido à difusão de oxigênio na câmara do ânodo (CANO *et al.*, 2021). Portanto, este parâmetro é reduzido quando outros aceptores de elétrons estão presentes no meio e são utilizados em processos como fermentação, por exemplo, ao invés de serem empregados na geração de energia elétrica (SUBHA *et al.*, 2019).

Vale destacar também, que a energia elétrica produzida pela CCM foi dissipada na forma de calor devido a utilização de resistor, evidenciando a necessidade do acoplamento de dispositivos para coleta e armazenamento de energia elétrica., a fim de viabilizar o aproveitamento energético. Para facilitar a geração, extração e armazenamento eficiente da energia produzida pela CCM, sistemas de gerenciamento de energia (*Power Management System – PMS*) podem ser acoplados (DUTTA *et al.*, 2022). Lobo, Wang e Ren (2017) utilizaram um circuito elétrico e uma bateria de íon-lítio para a coleta e armazenamento da energia produzida pela CCM, respectivamente, durante o tratamento de efluente. O circuito elétrico foi capaz de controlar a CCM nos pontos de MPP, ponto de máxima corrente (*maximum power point – MPP*), aumentando a potência em 81 a 375%.

CONCLUSÕES

No presente estudo, foi avaliada a operação de uma CCM de cátodo exposto ao ar, com volume útil de trabalho de 2 L. Os resultados demonstraram que a CCM alimentada com efluente sintético simulando efluente doméstico pode ser usada para recuperação de energia e remoção da matéria orgânica. O sistema obteve geração de tensão média de $387,48 \pm 118,10$ mV, permitiu a produção média de densidade de corrente de $0,08 \pm 0,04$ mA/m² e máxima densidade de potência de $15,93$ mW/m². Quanto ao tratamento de efluentes, a CCM operando em TDH de 12 h, removeu em média $21,13 \pm 5,02\%$ de DQO. Uma vez que as condições do meio se mantiveram anaeróbicas, não foi possível remover nutrientes, como amônia e ortofosfato, visto que necessitam da alternância de ambientes aeróbios e anaeróbios. O desempenho da CCM quanto ao tratamento de efluente indicam a necessidade de um pós-tratamento.

Portanto, espera-se que a implementação da CCM para tratar águas residuais seja usada como uma fonte alternativa, renovável, sustentável e não tóxica de geração de energia. Como sugestão para trabalhos futuros, é importante avaliar o desempenho da CCM com efluentes reais, monitorar a toxicidade do efluente produzido pela CCM e aplicar dispositivos para recuperar a energia produzida e destinar para novos usos, visando a sustentabilidade energética das estações de tratamento de efluente.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação de Santa Catarina (FAPESC), da Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Os autores agradecem à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e ao Laboratório de Reúso das Águas (LaRA) pela oportunidade do desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AHN, Y.; LOGAN, B. E. *Effectiveness of domestic wastewater treatment using microbial fuel cells at ambient and mesophilic temperatures. Bioresource Technology*, v. 101, n. 2, p. 469–475, 2010.
2. AN, B. M.; SEO, S. ju; HIDAYAT, S.; PARK, J. Y. *Treatment of ethanalamine and electricity generation using a scaled-up single-chamber microbial fuel cell. Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 81, p. 1–6, 25 jan. 2020.
3. CANO, V.; CANO, J.; NUNES, S. C.; NOLASCO, M. A. *Electricity generation influenced by nitrogen transformations in a microbial fuel cell: assessment of temperature and external resistance. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 139, p. 110590, 1 abr. 2021.
4. DENG, S.; WANG, C.; HAO NGO, H.; GUO, W.; YOU, N.; TANG, H.; YU, H.; TANG, L.; HAN, J. *Comparative review on microbial electrochemical technologies for resource recovery from wastewater towards circular economy and carbon neutrality. Bioresource Technology*, v. 376, p. 128906, 1 maio 2023.
5. DO, M. H.; NGO, H. H.; GUO, W. S.; LIU, Y.; CHANG, S. W.; NGUYEN, D. D.; NGHIEM, L. D.;

- NI, B. J. *Challenges in the application of microbial fuel cells to wastewater treatment and energy production: A mini review. Science of the Total Environment*, v. 639, p. 910–920, 2018.
6. DUTTA, A.; JACOB, C. A.; DAS, P.; CORTON, E.; STOM, D.; BARBORA, L.; GOSWAMI, P. *A review on power management systems: An electronic tool to enable microbial fuel cells for powering range of electronic appliances. Journal of Power Sources*, v. 517, p. 230688, 1 jan. 2022.
 7. DWIVEDI, K. A.; HUANG, S. J.; WANG, C. T.; KUMAR, S. *Fundamental understanding of microbial fuel cell technology: Recent development and challenges. Chemosphere*, v. 288, p. 132446, 1 fev. 2022.
 8. LI, W. W.; YU, H. Q.; RITTMANN, B. E. *Chemistry: Reuse water pollutants. Nature* 2015 528:7580, v. 528, n. 7580, p. 29–31, 2 dez. 2015.
 9. LOBO, F. L.; WANG, X.; REN, Z. J. *Energy harvesting influences electrochemical performance of microbial fuel cells. Journal of Power Sources*, v. 356, p. 356–364, 15 jul. 2017.
 10. LOGAN, B. E.; HAMELERS, B.; ROZENDAL, R.; SCHRÖDER, U.; KELLER, J.; FREGUIA, S.; AELTERMAN, P.; VERSTRAETE, W.; RABAEY, K. *Microbial fuel cells: Methodology and technology. Environmental Science and Technology*, v. 40, n. 17, p. 5181–5192, 2006.
 11. LUO, J.; TIAN, W.; JIN, H.; YANG, J.; LI, J.; WANG, Y.; SHEN, W.; REN, Y.; ZHOU, M. *Recent advances in microbial fuel cells: A review on the identification technology, molecular tool and improvement strategy of electricigens. Current Opinion in Electrochemistry*, v. 37, p. 101187, 1 fev. 2023.
 12. LUTTERBECK, C. A.; MACHADO, Ê. L.; SANCHEZ-BARRIOS, A.; SILVEIRA, E. O.; LAYTON, D.; RIEGER, A.; LOBO, E. A. *Toxicity evaluation of hospital laundry wastewaters treated by microbial fuel cells and constructed wetlands. Science of the Total Environment*, v. 729, 10 ago. 2020.
 13. MARASSI, R. J.; QUEIROZ, L. G.; SILVA, D. C. V. R.; DOS SANTOS, F. S.; SILVA, G. C.; DE PAIVA, T. C. B. *Long-term performance and acute toxicity assessment of scaled-up air-cathode microbial fuel cell fed by dairy wastewater. Bioprocess and Biosystems Engineering*, v. 43, n. 9, p. 1561–1571, 1 set. 2020.
 14. METCALF; EDDY. *Wastewater Engineering - Treatment and resource recovery*. Boston: McGraw-Hi, 2014.
 15. MITTAL, Y.; NOORI, M. T.; SAEED, T.; YADAV, A. K. *Influence of evapotranspiration on wastewater treatment and electricity generation performance of constructed wetland integrated microbial fuel cell. Journal of Water Process Engineering*, v. 53, p. 103580, 1 jul. 2023.
 16. MORRIS, J. M.; JIN, S. *Influence of NO₃ and SO₄ on power generation from microbial fuel cells. Chemical Engineering Journal*, v. 153, n. 1–3, p. 127–130, 1 nov. 2009.
 17. NGUYEN, H. D.; BABEL, S. *Insights on microbial fuel cells for sustainable biological nitrogen removal from wastewater: A review. Environmental Research*, v. 204, p. 112095, 1 mar. 2022.
 18. OBILEKE, K. C.; ONYEAKA, H.; MEYER, E. L.; NWOKOLO, N. *Microbial fuel cells, a renewable energy technology for bio-electricity generation: A mini-review. Electrochemistry Communications*, v. 125, p. 107003, 1 abr. 2021.
 19. OPOKU, P. A.; JINGYU, H.; YI, L.; GUANG, L.; NORGBEY, E. *Scaled-up multi-anode shared cathode microbial fuel cell for simultaneous treatment of multiple real wastewaters and power generation. Chemosphere*, v. 299, p. 134401, 1 jul. 2022.
 20. PASTERNAK, G.; GREENMAN, J.; IEROPOULOS, I. *Dynamic evolution of anodic biofilm when maturing under different external resistive loads in microbial fuel cells. Electrochemical perspective. Journal of Power Sources*, v. 400, p. 392–401, 1 out. 2018.
 21. ROSSI, R.; HUR, A. Y.; PAGE, M. A.; THOMAS, A. O. B.; BUTKIEWICZ, J. J.; JONES, D. W.; BAEK, G.; SAIKALY, P. E.; CROPEK, D. M.; LOGAN, B. E. *Pilot scale microbial fuel cells using air cathodes for producing electricity while treating wastewater. Water Research*, v. 215, p. 118208, 15 maio 2022.
 22. SORGATO, A. C.; JEREMIAS, T. C.; LOBO, F. L.; LAPOLLI, F. R. *Bioelectricity generation in microbial fuel cell by a membrane electrode assemble: Startup assessment. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON INNOVATIONS IN ENERGY ENGINEERING & CLEANER PRODUCTION IEE CP, 2022, [...]. 2022. v. 22, p. 1.*
 23. SORGATO, A. C. *Célula a combustível microbiana: operação em diferentes tempos de detenção hidráulica e extração de energia ativa. 2022. 129 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.*
 24. SOUZA, E.; FOLLMANN, H. V. D. M.; DALRI-CECATO, L.; BATTISTELLI, A. A.; LOBO-RECIO,

- M. A.; BELLI, T. J.; LAPOLLI, F. R. *Membrane fouling suppression using intermittent electric current with low exposure time in a sequencing batch membrane bioreactor. Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 8, n. 4, p. 104018, 1 ago. 2020.
25. SU, S. G.; CHENG, H. Y.; ZHU, T. T.; WANG, H. C.; WANG, A. J. *Kinetic competition between microbial anode respiration and nitrate respiration in a bioelectrochemical system. Bioelectrochemistry*, v. 123, p. 241–247, 1 out. 2018.
 26. SUBHA, C.; KAVITHA, S.; ABISHEKA, S.; TAMILARASAN, K.; ARULAZHAGAN, P.; RAJESH BANU, J. *Bioelectricity generation and effect studies from organic rich chocolaterie wastewater using continuous upflow anaerobic microbial fuel cell. Fuel*, v. 251, p. 224–232, 1 set. 2019.
 27. ULLAH, Z.; ZESHAN, S. *Effect of substrate type and concentration on the performance of a double chamber microbial fuel cell. Water Science and Technology*, v. 81, n. 7, p. 1336–1344, 1 abr. 2020.
 28. WANG, H.; PARK, J. Do; REN, Z. J. *Practical energy harvesting for microbial fuel cells: A review. Environmental Science and Technology American Chemical Society*, 17 mar. 2015.
 29. WANG, J.; ZHOU, B.; GE, R.; SONG, T. shun; YU, J.; XIE, J. *Degradation characterization and pathway analysis of chlortetracycline and oxytetracycline in a microbial fuel cell. RSC Advances*, v. 8, n. 50, p. 28613–28624, 7 ago. 2018.
 30. YANG, H.; CHEN, J.; YU, L.; LI, W.; HUANG, X.; QIN, Q.; ZHU, S. *Performance optimization and microbial community evaluation for domestic wastewater treatment in a constructed wetland-microbial fuel cell. Environmental Research*, v. 212, p. 113249, 1 set. 2022.
 31. YANG, X.; WEI, J.; YE, G.; ZHAO, Y.; LI, Z.; QIU, G.; LI, F.; WEI, C. *The correlations among wastewater internal energy, energy consumption and energy recovery/production potentials in wastewater treatment plant: An assessment of the energy balance. Science of The Total Environment*, v. 714, p. 136655, 20 abr. 2020.
 32. YE, Y.; NGO, H. H.; GUO, W.; CHANG, S. W.; NGUYEN, D. D.; ZHANG, X.; ZHANG, S.; LUO, G.; LIU, Y. *Impacts of hydraulic retention time on a continuous flow mode dual-chamber microbial fuel cell for recovering nutrients from municipal wastewater. Science of the Total Environment*, v. 734, p. 139220, 2020.
 33. YU, J.; PARK, Y.; WIDYANINGSIH, E.; KIM, S.; KIM, Y.; LEE, T. *Microbial fuel cells: Devices for real wastewater treatment, rather than electricity production. Science of the Total Environment*, v. 775, p. 145904, 25 jun. 2021.
 34. ZANG, L.; YANG, X. L.; XU, H.; DENG, Y. J.; YUE, Z. X.; SONG, H. L. *Alleviating membrane fouling by enhanced bioelectricity generation via internal reflux of sludge mixed liquor in microbial fuel cell-membrane bioreactor (MFC-MBR) coupling system. Journal of Membrane Science*, v. 673, p. 121495, 5 maio 2023.
 35. ZHANG, L.; ZHU, X.; LI, J.; LIAO, Q.; YE, D. *Biofilm formation and electricity generation of a microbial fuel cell started up under different external resistances. Journal of Power Sources*, v. 196, n. 15, p. 6029–6035, 1 ago. 2011.
 36. ZHANG, P.; YANG, C.; XU, Y.; LI, H.; SHI, W.; XIE, X.; LU, M.; HUANG, L.; HUANG, W. *Accelerating the startup of microbial fuel cells by facile microbial acclimation. Bioresource Technology Reports*, v. 8, p. 100347, 1 dez. 2019.
 37. ZHUANG, L.; ZHENG, Y.; ZHOU, S.; YUAN, Y.; YUAN, H.; CHEN, Y. *Scalable microbial fuel cell (MFC) stack for continuous real wastewater treatment. Bioresource Technology*, v. 106, p. 82–88, 2012.