

XI-678 - Estudo do comportamento da inoculação de uma célula a combustível microbiana de câmara única operada com eletrodo do tipo MEA

Thamires Custódio Jeremias ⁽¹⁾

Engenheira Ambiental pela Universidade do Extremo Sul Catarinense (UNESC). Mestre em Energia e Sustentabilidade pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Doutoranda em Engenharia Ambiental na UFSC.

Ana Carla Sorgato ⁽²⁾

Mestre em Engenharia Ambiental (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).

María Ángeles Lobo-Recio ⁽⁴⁾

Doutora em Química (Universidad Complutense de Madrid – UCM). Professora do Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental (UFSC).

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: thamires.custodio92@gmail.com

RESUMO

O despejo ambientalmente inadequado de efluentes ricos em matéria orgânica nos corpos hídricos receptores é um impacto ambiental deletério encontrado em diversos países. O uso insustentável dos combustíveis fósseis e o aumento da demanda energética, também contribuem para o agravamento dos problemas ambientais e socioambientais no mundo. É neste cenário que, nos últimos anos, as células a combustível microbianas (CCM) têm chamado a atenção da comunidade científica. As CCM são consideradas uma fonte de energia renovável, capazes de tratar o efluente e gerar energia elétrica através de reações metabólicas naturais dos microrganismos. Embora as vantagens descritas, o sistema ainda encontra limitações devido ao baixo potencial de conversão em energia elétrica. É nesta perspectiva que o conjunto de eletrodos de membrana, conhecidos como *membrane electrode assembly* (MEA) foram desenvolvidos através de uma combinação de eletrodos visando aumentar a geração de energia elétrica pela CCM. O objetivo do presente trabalho consistiu em avaliar o comportamento de uma CCM de câmara única operada com eletrodos do tipo MEA, durante o período de inoculação. Para o alcance dos resultados, o estudo foi dividido em duas etapas. Durante a etapa 1 (E1) foi introduzida uma mistura do meio de crescimento e lodo anaeróbico (cultura mista de microrganismos). Após 12 dias, foi adicionado um sistema de aquecimento que manteve a temperatura controlada. Na etapa 2 (E2) houve apenas a inserção da solução de crescimento após o esgotamento do reator. Em todas as etapas o sistema foi operado em regime de batelada alimentada. A fase de inoculação da CCM teve duração total de 28 dias, com período de 13 dias na E1 e 15 dias na E2. Os resultados demonstram um impacto positivo na aclimação das bactérias na CCM com a introdução do sistema de aquecimento, com o aumento da energia elétrica produzida. A rápida estabilização da tensão observada na E2, sugeriu a eficiente formação do biofilme eletroativo na matriz do ânodo. A tensão máxima gerada pela CCM foi de 602,8 mV. As máximas remoções de DQO e eficiência coulômbica foram, respectivamente, de 89,58% e 21,82%. De uma maneira geral, cabe destacar o sucesso da fase de inoculação da CCM operada com eletrodo do tipo MEA.

PALAVRAS-CHAVE: Inóculo; Tratamento biológico; Energia elétrica; Bactérias anaeróbicas; Biofilme

INTRODUÇÃO

A disposição inadequada de efluentes com elevado aporte de matéria orgânica e nutrientes, como fósforo e nitrogênio, sem tratamento prévio ou submetidos a um processo de tratamento insatisfatório, tem sido apontada como um dos principais fatores responsáveis pela degradação da qualidade ambiental dos ecossistemas

aquáticos. A poluição causada por estes efluentes atinge proporções alarmantes, afetando diretamente o equilíbrio dinâmico da biota presente nos rios, lagos, zona estuarina e costeira. Em virtude da composição tóxica e/ou patogênica destes efluentes, os mananciais contaminados podem também acarretar em riscos à saúde humana.

Neste cenário, outro aspecto importante tem ganhado a atenção nos últimos anos, que consiste no aumento da demanda energética. Muitos esforços têm sido empregados no desenvolvimento de novos sistemas de energia que sejam renováveis e que auxiliem na diminuição dos impactos ambientais decorrentes do uso de combustíveis fósseis. Assim, surgem as células a combustível microbianas (CCM), que podem ser abastecidas com substratos ricos em matéria orgânica, como os efluentes sanitários, industriais e agroindustriais, gerando energia elétrica a partir de uma fonte renovável e melhorando, simultaneamente, a qualidade do efluente (SURESH *et al.*, 2022). Devido a esta dupla habilidade, as CCM têm recebido destaque como uma tecnologia extremamente promissora.

Na CCM, a energia química proveniente da fonte orgânica é diretamente transformada em energia elétrica pela ação de bactérias eletroativas. Estas bactérias são capazes de formar um biofilme no eletrodo a fim de transferir os elétrons produzidos a partir da degradação da matéria orgânica (OBILEKE *et al.*, 2021). A estrutura da CCM é composta por dois eletrodos: ânodo e cátodo. No compartimento do ânodo, em ambiente anaeróbio, as bactérias oxidam a matéria orgânica presente no substrato. Por meio destes processos de oxidação, são gerados elétrons e prótons. Estes elétrons são direcionados e/ou mediados para o ânodo, sendo transportados para o cátodo através de um sistema condutor externo, normalmente, acoplado a um resistor (LOGAN, 2008; LOGAN *et al.*, 2006). No cátodo, normalmente em ambiente aeróbio, ocorre a etapa de redução por meio da reação de prótons e elétrons com o oxigênio, formando água como resultante final da reação química.

A configuração arquitetônica da CCM está associada ao número de compartimentos específicos para a ocorrência das reações de oxidação (ânodo) e redução (cátodo). Assim, a literatura reporta dois tipos de estruturas: a CCM de câmara dupla (CCM-D) e a CCM de câmara única ou simples (CCM-U). Embora estas configurações apresentem *design* diferentes, ambas compartilham dos mesmos princípios operacionais de obtenção da bioenergia e degradação dos compostos orgânicos. Na CCM-D, os eletrodos, ânodo e cátodo, são devidamente separados por uma membrana de troca iônica, apresentando compartimentos próprios e definidos de oxidação e redução do substrato (YE *et al.*, 2019). Em contrapartida, a CCM-U, consiste na presença de um único compartimento que abriga ambos os eletrodos. O ânodo fica inserido no substrato orgânico, enquanto o cátodo possui a sua face exposta ao ar atmosférico (GUL *et al.*, 2021).

A fase de inoculação deste sistema é importante, pois é através desta que é formado o biofilme na superfície do ânodo. É neste estágio inicial de formação do biofilme que ocorre a colonização de bactérias, permitindo a sua aderência na superfície do eletrodo, influenciando diretamente no desempenho da CCM (KONDAVEETI *et al.*, 2020). A matriz do biofilme é composta basicamente por água, substâncias poliméricas extracelulares e bactérias, sendo caracterizada pela heterogeneidade estrutural, diversidade genética e complexas interações entre os membros da comunidade microbiana (VENKATA MOHAN *et al.*, 2014).

A fonte de inoculação microbiana afeta a composição microbiana do biofilme eletroativo e o desempenho do mecanismo de transferência de elétrons para o ânodo (ZHOU *et al.*, 2022). A cultura pura geralmente é usada para estudar os princípios básicos de transferência de elétrons, o que auxilia no entendimento das características, comportamento e funções do biofilme. No entanto, a inoculação de cultura pura precisa garantir condições assépticas mais rigorosas (VILAS BOAS *et al.*, 2019). Porém, CCM inoculadas por comunidades microbianas mistas possuem melhor estabilidade, adaptabilidade nutricional e resistência ao estresse (READ *et al.*, 2010). Biofilmes formados por culturas mistas são originários de várias fontes, como esgoto doméstico (MASHKOUR *et al.*, 2021), solo (MOCALI *et al.*, 2013), lodo ativado (GAJDA *et al.*, 2018), entre outras.

Embora as inúmeras vantagens, como geração de energia elétrica direta, baixa geração de lodo e a redução da concentração da matéria orgânica, este sistema ainda apresenta muitos desafios e um caminho longo até a sua consolidação em escala industrial, devido, principalmente, à baixa conversão de energia elétrica (SRIVASTAVA *et al.*, 2020). Para superar estas deficiências ampliando o desempenho da CCM, estudos recentes reportam o uso do conjunto de eletrodos de membrana, conhecido como *membrane electrode assembly* (MEA). O MEA é composto por uma camada difusora de gases (GDL) e um eletrodo de difusão de gases (GDE) (MASHKOUR *et al.*, 2021). A GDL consiste em uma estrutura porosa feita pela tecelagem de fibras de carbono, a qual é constituída por tecido de carbono, uma camada microporosa de fibras de carbono e um tratamento

hidrofóbico com politetrafluoretileno (PTFE) (SANTORO *et al.*, 2011). O GDE é formado por uma GDL contendo uma camada adicional de catalisador (HERNANDEZ-ALDAVE; ANDREOLI, 2020). A vantagem do MEA consiste na melhoria do contato eletrodo-membrana e na redução da distância entre os eletrodos, contribuindo para a redução da resistência interna.

Em CCM, o uso de MEA ainda é muito incipiente, poucos estudos da literatura relatam a eficiência do sistema utilizando MEA. Desta forma, esta pesquisa teve como princípio contribuir para o estado da arte quanto ao desempenho de uma CCM operada com MEA.

O objetivo geral deste trabalho consistiu em avaliar o desempenho na etapa de inoculação de uma célula a combustível microbiana de câmara única (CCM-U), projetada com sistema de conjunto de eletrodos de membrana (MEA). Os objetivos específicos desta pesquisa foram direcionados visando os seguintes aspectos: (i) analisar o comportamento da geração de energia elétrica da unidade experimental durante o período de inoculação; (ii) avaliar a capacidade de remoção da matéria orgânica e, conseqüentemente, a eficiência coulômbica do reator.

METODOLOGIA

UNIDADE EXPERIMENTAL

A CCM utilizada neste trabalho teve configuração de câmara única, sendo construída em material acrílico com volume de 2L (Figura 1). Os eletrodos foram do tipo MEA, com área de 132 cm². O ânodo foi composto por um GDL de papel de carbono. O cátodo foi constituído por um GDE com carga de 0,4 mg Pt cm⁻². Entre os eletrodos, foi disposta uma membrana trocadora de prótons (Nafion[®] 212). O MEA foi constituído por uma camada de nanopartícula de carbono (Vulcan XC 72R), cujo objetivo consistiu em auxiliar na condutividade elétrica e uma camada hidrofóbica de PTFE, visando reduzir a difusão de oxigênio dentro do compartimento do ânodo. Placas de aço inoxidável foram utilizadas como coletores de elétrons. Os eletrodos foram conectados por um fio de cobre a um resistor externo de 1000 Ω.

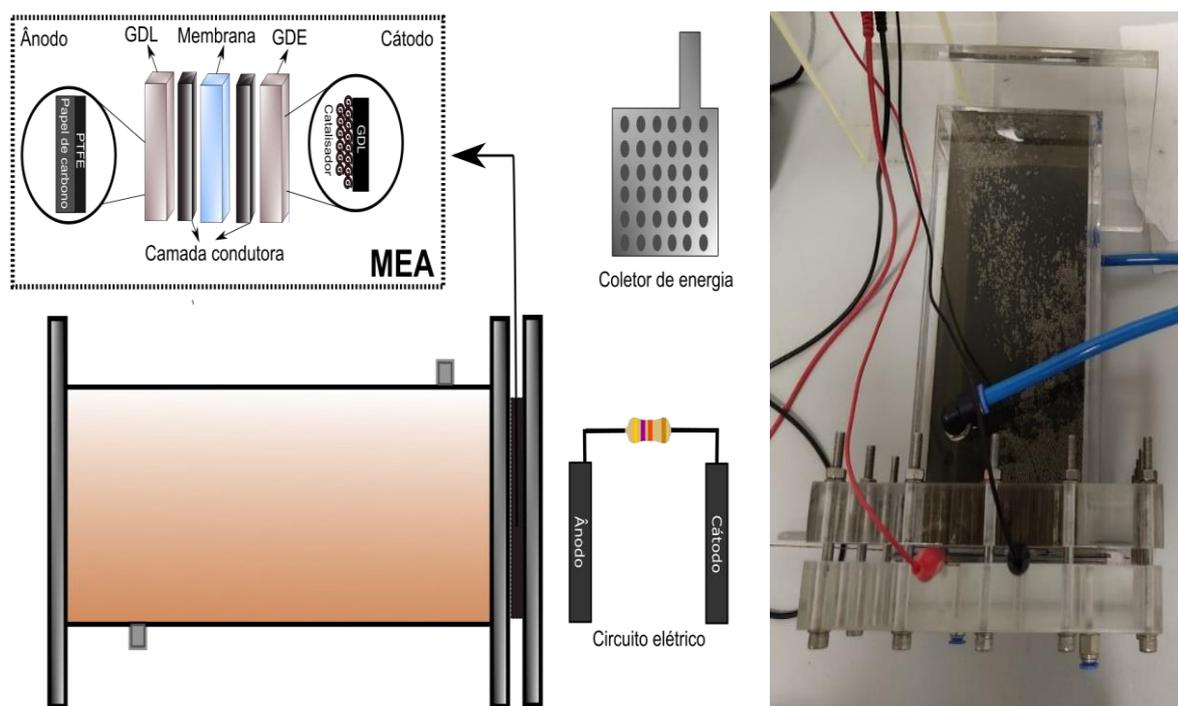


Figura 1: Unidade experimental.

INOCULAÇÃO E CONDIÇÕES OPERACIONAIS

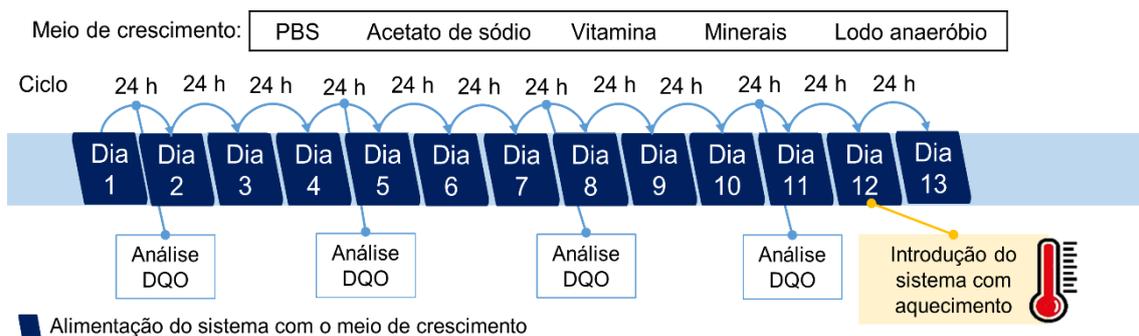
O sistema foi inoculado com lodo anaeróbico oriundo de um UASB de sistema de tratamento de efluentes da cidade de Jaraguá do Sul/ SC pertencente ao Serviço Autônomo Municipal de Água e Esgoto (SAMAE). Foi

utilizado um meio de crescimento composto por uma solução tampão de fosfato (PBS) 50 mM (4,57g Na₂HPO₄, 2,45g NaH₂PO₄·H₂O, 0,31g NH₄Cl, 0,13g KCl), acetato de sódio (1 g L⁻¹), vitaminas (5 mL L⁻¹) e minerais (12,5mL L⁻¹). A CCM foi operada com vazão de recirculação de 49 mL min⁻¹, com fluxo ascendente.

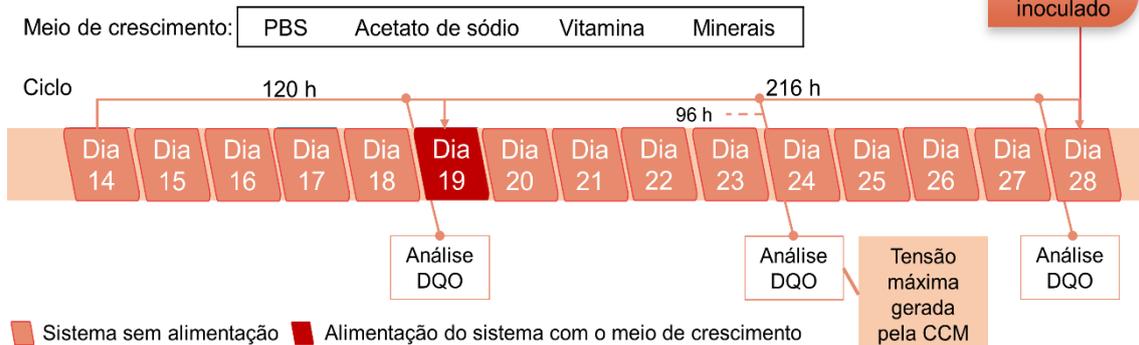
A aclimação foi conduzida em duas etapas (Figura 2). A etapa 1 (E1) consistiu na introdução de uma mistura do meio de crescimento e lodo anaeróbio (50 mL lodo L⁻¹). O reator foi operado em regime de batelada alimentada, com a introdução da mistura a cada 24 h. No dia 12, foi inserido um sistema de aquecimento que manteve a temperatura controlada em 28±2°C.

Após a CCM atingir a estabilidade com uma tensão de 500 mV, a etapa 2 (E2) foi iniciada com o esgotamento do reator e a inserção apenas da solução de crescimento. A operação de cada ciclo foi regida pelo decréscimo da tensão próximo a 50 mV. A CCM foi considerada inoculada após o registro de dois ciclos completos.

Etapa 1



Etapa 2



Ciclo= Tempo de retenção do líquido reacional dentro da CCM em processo de batelada

Figura 2: Metodologia adotada no processo de inoculação da célula a combustível microbiana.

PARÂMETROS DE MONITORAMENTO

As concentrações de demanda química de oxigênio (DQO), antes e após a introdução do efluente no sistema, foram determinadas mediante espectroscopia VIS por meio da análise colorimétrica utilizando o espectrofotômetro da marca Hach® DR/5000. Os reagentes empregados na quantificação contemplaram os kits também da marca Hach® cuja metodologia de análise foi seguida pelo método 8000, conforme descrito de forma adaptada pelo *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017). O pH, condutividade e a temperatura foram monitorados através de uma sonda multiparâmetros (AKSO® 88).

O monitoramento dos parâmetros de eletricidade gerada pela CCM foi realizado por um sistema de aquisição de dados, composto por um multímetro digital conectado a um *datalogger* (ET-22651 A-Minipa). Os registros dos dados de tensão elétrica foram coletados a cada 180s.

A curva de polarização foi realizada por meio da abertura do circuito elétrico, respeitando o tempo de estabilização da tensão que durou aproximadamente 30 min. Após este período, foram variadas as resistências externas (1000, 500, 200, 100, 50, 20 e 10 Ω) com intervalo de 10 min. A base de cálculo para obtenção dos parâmetros de interesse encontra-se na Tabela 1.

Tabela 1: Base de cálculo dos parâmetros de monitoramento do sistema.

PARÂMETRO	EQUAÇÃO	DESCRIÇÃO
Corrente elétrica	$I = \frac{U}{R_{ext}}$	Calculada pela Lei de Ohm, o I consiste na corrente elétrica que passa através do circuito elétrico, a qual é diretamente proporcional diferença de potencial e inversamente proporcional a resistência externa do circuito.
Densidade de corrente	$D_c = \frac{I}{A}$	Consiste na normalização de acordo com a área do ânodo.
Potência	$P = UI$	A potência está atrelada à tensão e à corrente elétrica gerada pelo sistema.
Densidade de potência	$D_p = \frac{P}{A}$	Consiste na normalização de acordo com a área do ânodo.
Eficiência Coulômbica	$EC = \frac{M \int_{t_0}^{t_1} Idt}{nFv\Delta DQO}$	Representa a quantidade máxima de energia elétrica que pode ser produzida a partir da oxidação da matéria orgânica.
Eficiência de remoção	$\%Remoção = \frac{(C_0 - C_f)}{C_0} \times 100$	Representa o percentual de remoção do parâmetro de interesse.
Observações:		
I = corrente (A)		
U = tensão (V)		
R = resistência externa (Ω)		
D _c = densidade de corrente (A m ⁻² ou A cm ⁻²)		
A = área de projeto do ânodo (m ² ou cm ²)		
P = Potência (W)		
D _p = densidade de potência (W m ⁻² ou W cm ⁻²)		
M = massa molecular do oxigênio		
F = constante de Faraday-96485 C mol ⁻¹ e ⁻		
n = n° de elétrons produzidos na degradação do substrato-mol e ⁻ mol ⁻¹ O ₂		
v = volume da CCM (L)		
ΔDQO = variação da demanda química por oxigênio-mgL ⁻¹		
C ₀ = concentração inicial (mg L ⁻¹)		
C _f = concentração final (mg L ⁻¹)		

RESULTADO E DISCUSSÕES

POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A fase de inoculação da CCM teve duração total de 28 dias (Figura 3). O tempo de aclimação está diretamente relacionado à formação do biofilme, que é afetado por diversos parâmetros como a temperatura, material do ânodo, composição do efluente e configuração do reator (BOND *et al.*, 2012). Assim, destaca-se que entre os dias 1 e 11 o sistema foi operado sem fonte adicional de calor, em temperatura ambiente ($\sim 20 \pm 2^\circ\text{C}$, período de inverno). Durante este período, verificou-se uma lenta adaptação das bactérias ao sistema, evidenciado pela baixa e instável energia elétrica gerada pela CCM.

De fato, a temperatura exerce uma forte influência sobre as diversas variáveis da CCM como, por exemplo, a cinética do sistema, transferência de massa, termodinâmica e a natureza/ distribuição da comunidade microbiana (GADKARI *et al.*, 2020; GOSWAMI; MISHRA, 2018). Acredita-se que devido a temperatura controlada adotada ($\sim 30^\circ\text{C}$) durante a fase de inoculação, houve o predomínio de bactérias mesofílicas que, normalmente, proliferam em temperatura ótima em torno de 15 – 35°C (LOGAN, 2008). O aumento e a estabilidade da energia elétrica produzida após a introdução do sistema de aquecimento, corroboram com o disposto na literatura,

segundo a qual, de acordo com Munoz-Cupa et al. (2021), temperaturas entre 30° e 45°C podem facilitar a formação do biofilme e potencializar a atividade bioeletrocatalítica.

Na E1, a tensão se manteve relativamente estável durante os dias 3 a 5, atingindo a máxima de 100,5 mV. Durante os dias 8 e 9, a energia produzida teve um decréscimo de 70,0 mV atingindo 22,1 e 31,0 mV, respectivamente. Após a introdução do sistema de aquecimento, a tensão obteve um incremento de 181,5 mV indo para 456,1 mV. A E1, foi finalizada com o registro da tensão máxima obtida de 583,3 mV no dia 13.

A primeira parte da E2 compreendeu um ciclo de 5 dias (dia 14 a 19). A tensão máxima registrada neste período foi de 589,1 mV (dia 15). Na segunda parte da E2, após a alimentação do sistema no dia 19, a tensão atingiu rapidamente a estabilidade de ~500mV e operou durante um ciclo de 9 dias. A tensão máxima obtida pela CCM foi de 602,8 mV (dias 23 e 24). As mesmas observações de geração de energia elétrica bem-sucedida em CCM com MEA também foram observadas em estudos anteriores durante a fase de inóculo do sistema (KIM *et al.*, 2009; MIN *et al.*, 2012). Resultados semelhantes foram descritos por Sorgato *et al.* (2022) durante a fase de inóculo de um sistema operado com uma CCM utilizando um eletrodo do tipo MEA

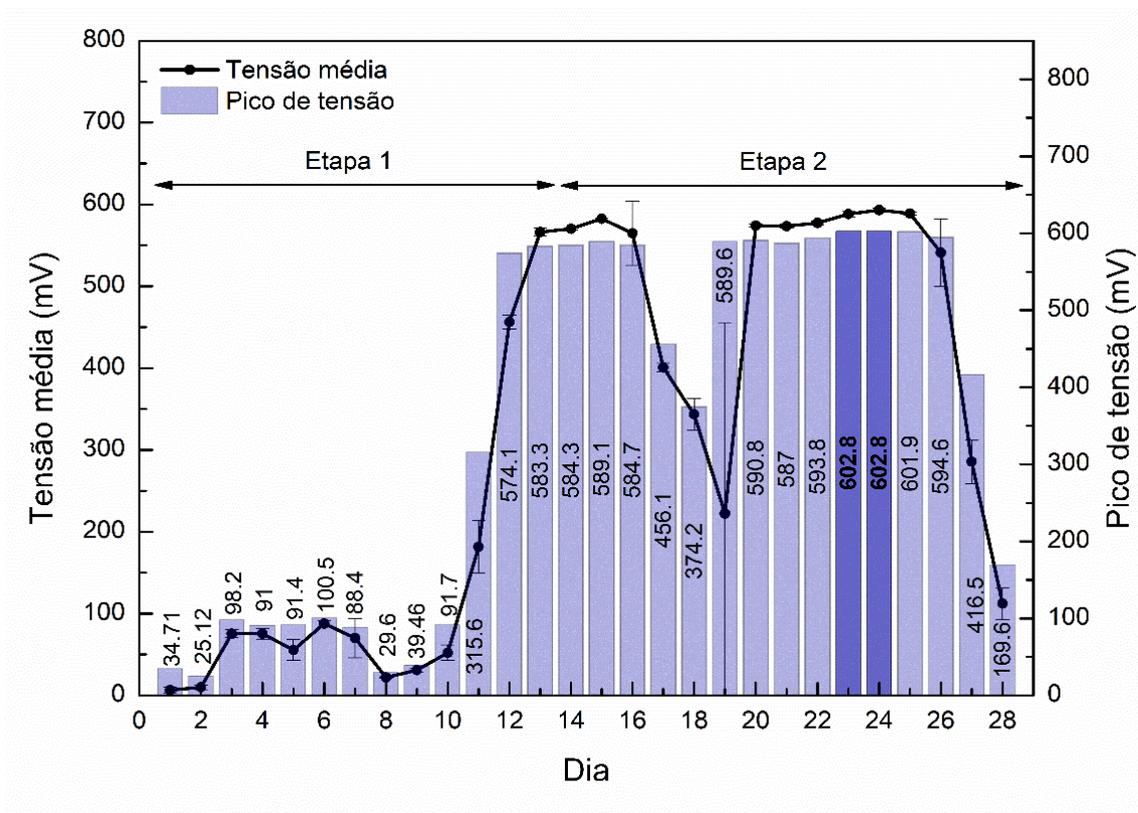


Figura 3: Geração de energia elétrica produzida pela célula a combustível microbiana.

A formação do biofilme, um dos processos mais importantes durante a fase de inoculação, precisa apresentar uma boa interação entre os microrganismos e o eletrodo, garantindo a eficiente movimentação dos elétrons para o eletrodo. Mukherjee *et al.* (2020) explicam que a formação do biofilme é caracterizada pela adesão microbiana e pelo processo de maturação. Assim, entre os dias 1 e 10 possivelmente ocorreu a adesão microbiana, que consiste na formação do biofilme evidenciada pela fixação inicial das células microbianas no substrato. Nos dias 11 a 28 da operação da CCM provavelmente ocorreu o estágio de maturação do biofilme na superfície do ânodo, caracterizado pela estabilidade da energia elétrica gerada pelo reator.

TESTE DA CURVA DE POLARIZAÇÃO

As densidades máximas de corrente e potência foram, respectivamente, de 44,57 mA m⁻² e 26,87 mW m⁻² (R_{ext}=1000Ω), indicando a presença de atividade bacteriana e a formação de um de biofilme eletroativo.

As curvas de polarização representam uma ferramenta valiosa na análise e caracterização das CCM. O teste de curva de polarização demonstrou que a densidade máxima de potência foi de $39,58 \text{ mW m}^{-2}$ e a densidade de corrente atingiu $115,59 \text{ mA m}^{-2}$ ($R_{\text{ext}} = 200\Omega$) (Figura 4). De acordo com os resultados, quanto menor a R_{ext} , maior a corrente elétrica do circuito e menor a tensão gerada na CCM.

No teste de curva de polarização foi possível verificar as três zonas citadas por Logan *et al.* (2006): (i) partindo da tensão de circuito aberto, ocorreu a queda inicial da tensão, associada às perdas de ativação; (ii) a queda lenta da tensão e linear com a corrente foi associada às perdas ôhmicas; e (iii) ocorreu a queda rápida da tensão em correntes mais elevadas, evidenciando as perdas pelos efeitos de transporte de massa. Um problema comum encontrado ao avaliar curvas de polarização é o *overshoot* de potência, que consiste na resposta do sistema em alta densidade de corrente em que a tensão e a corrente caem muito rapidamente (WATSON; LOGAN, 2011). O *overshoot* foi evidenciado no processo de inóculo da CCM, possivelmente associado à formação de um biofilme ainda não completamente consolidado (WINFIELD *et al.*, 2011). Embora a presença do *overshoot*, a evidência da formação das três zonas permite avaliar o bom desempenho da CCM no processo de inoculação do sistema.

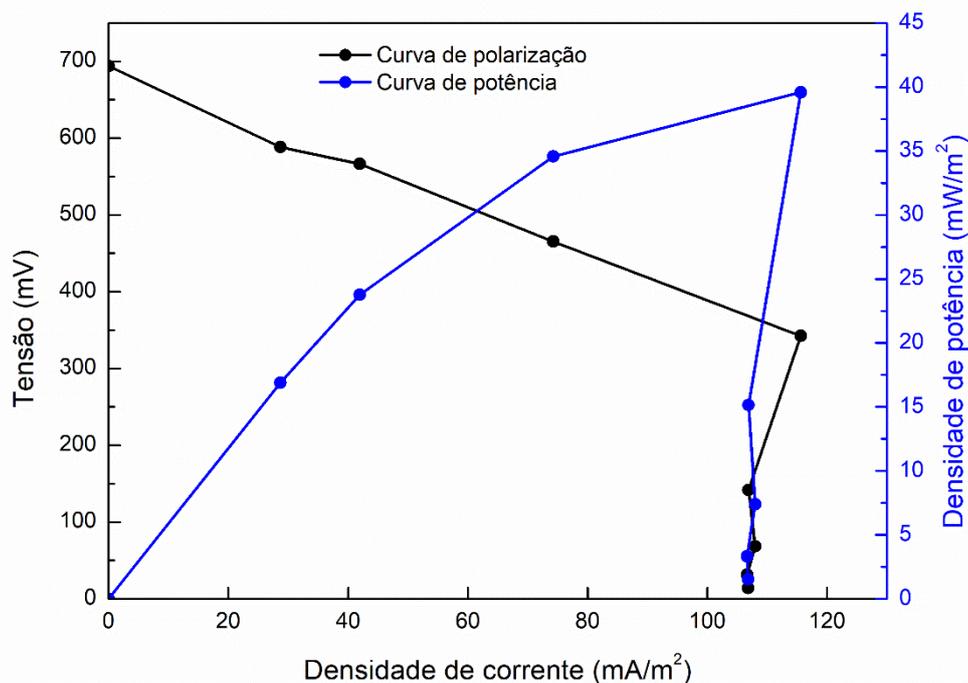


Figura 4: Curva de polarização.

Apesar da presença do *overshoot* no teste da curva de polarização, Winfield *et al.* (2011) explicam que o tempo favorece o estabelecimento de um biofilme mais maduro desaparecendo o *overshoot*. Assim, as bactérias presentes no ânodo serão capazes de produzir corrente suficiente mesmo em tensões mais baixas (IEROPOULOS *et al.*, 2010).

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA

A DQO inicial da solução de crescimento foi de 768 mg L^{-1} , pH 7,0 e condutividade de $6,9 \text{ mS cm}^{-1}$. Os parâmetros de monitoramento da CCM encontram-se na Tabela 2.

Na E1, foi observada a influência da temperatura no desempenho da CCM refletido no decréscimo da remoção de DQO e no baixo percentual de eficiência coulômbica (EC) (dia 8). Na E2 quanto maior o tempo do ciclo, maiores foram os percentuais de remoção da DQO e o acréscimo da EC. Em um ciclo de 9 dias, entre os dias 19 e 28, foram atingidos os valores máximos de remoção de DQO (89,58%) e EC (21,82%).

Neste estudo, foi possível analisar o impacto da temperatura na formação do biofilme, representado pelo decréscimo da tensão e da EC (dia 8). Em temperaturas mais elevadas o desempenho bioeletrocatalítico do biofilme é aumentado. Assim, a temperatura durante a fase inicial de crescimento do biofilme influencia na abundância das diferentes espécies microbianas, bem como na sua distribuição dentro do biofilme (PATIL *et al.*, 2010).

Tabela 2: Dados de eficiência da célula a combustível microbiana durante a fase de inoculação.

ETAPA	DIA	CICLO (DIAS)	TENSÃO MÉDIA (mV)	REMOÇÃO DE DQO (%)	EFICIÊNCIA COULÔMBICA (%)
1	1	1	6,42	4,30	0,90
	4	1	75,38	53,45	0,57
	8	1	22,07	50,20	0,25
	11	1	181,56	46,42	3,20
2	19	5	222,31	88,53	11,80
	23	4	588,26	68,23	13,87
	28	9	112,23	89,58	21,82

Os ciclos representam o tempo de permanência do efluente dentro do reator. Como já esperado, quanto mais elevado o número de dias, maior é o tempo que as bactérias têm para promover a degradação da matéria orgânica. Na E1, com ciclos de apenas 1 dia, a remoção máxima da DQO foi de 53,45%. Em contraste, após ciclos de 5 e 9 dias (E2), as remoções de DQO foram, respectivamente, de 88,53% e 89,58%. A queda abrupta da tensão no dia 18 foi associada à exaustão da fonte de carbono para geração de energia elétrica. Após a alimentação do sistema (dia 19) houve o restabelecimento rápido da tensão, sugerindo a formação de um biofilme mais estruturado na matriz do ânodo.

Na E1, apenas 3,2% da energia contida no substrato foi convertida em eletricidade. Após a formação de uma comunidade bacteriana mais desenvolvida no biofilme, obteve-se o aumento da EC, atingindo o máximo de 21,82%.

CONCLUSÕES

O tempo de aclimação está diretamente relacionado à formação do biofilme, que é afetado por diversos parâmetros, entre eles a temperatura, material do ânodo e composição do efluente, que foram estudados neste trabalho. Neste estudo, durante a fase de inoculação, o sistema eletroquímico demonstrou ótimos resultados na geração de energia elétrica e na remoção da DQO. A proporcionalidade dos percentuais de remoção de DQO e EC denotam a presença de atividade microbiana dentro do reator.

Os resultados demonstraram o sucesso da fase de inoculação da CCM operada com eletrodo do tipo MEA. A fonte de inóculo utilizada, o lodo de esgoto doméstico, forneceu a estrutura microbiana adequada para o desenvolvimento do biofilme na matriz do ânodo.

O tempo favoreceu o estabelecimento de um biofilme mais maduro apesar do *overshoot*. Assim, as bactérias presentes no ânodo serão capazes de produzir corrente suficiente mesmo em tensões mais baixas.

A temperatura é um parâmetro importante nos processos biológicos. A presença de uma fonte de aquecimento durante o período de inoculação foi substancial para a formação do biofilme no ânodo, demonstrando a importância da temperatura durante a etapa de aclimação do reator biológico. Desta forma, a temperatura pode ser um parâmetro aliado na otimização do sistema. O incremento da temperatura dentro do reator mostrou ser uma maneira direta de acelerar a formação do biofilme eletroativo e reduzir o tempo de aclimação das bactérias. Com base no pressuposto, acredita-se que em virtude do impacto positivo da temperatura, esta estratégia pode ser aplicada no período de inoculação de um sistema em larga escala, especialmente, por ser estratégia com procedimento simples e de fácil controle.

Recomendam-se estudos mais profundos acerca da comunidade microbiana presente no biofilme eletroativo, avaliando de forma mais efetiva a sua diversidade, permitindo, desta forma, correlações mais contundentes.

AGRADECIMENTOS

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

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

1. APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Washington DC: APHA, American Public Health Association, 2017.
2. BOND, D. R.; STRYCHARZ-GLAVEN, S. M.; TENDER, L. M.; TORRES, C. I. *On electron transport through geobacter biofilms*. *ChemSusChem*, v. 5, n. 6, p. 1099–1105, 2012.
3. GADKARI, S.; FONTMORIN, J. M.; YU, E.; SADHUKHAN, J. *Influence of temperature and other system parameters on microbial fuel cell performance: Numerical and experimental investigation*. *Chemical Engineering Journal*, v. 388, p. 124176, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2020.124176>
4. GAJDA, I.; GREENMAN, J.; SANTORO, C.; SEROV, A.; MELHUIH, C.; ATANASSOV, P.; IEROPOULOS, I. A. *Improved power and long term performance of microbial fuel cell with Fe-N-C catalyst in air-breathing cathode*. *Energy*, v. 144, p. 1073–1079, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2017.11.135>
5. GOSWAMI, R.; MISHRA, V. K. *A review of design, operational conditions and applications of microbial fuel cells*. *Biofuels*, v. 9, n. 2, p. 203–220, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17597269.2017.1302682>.
6. GUL, H.; RAZA, W.; LEE, J.; AZAM, M.; ASHRAF, M.; KIM, K. H. *Progress in microbial fuel cell technology for wastewater treatment and energy harvesting*. *Chemosphere*, v. 281, p. 130828, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.130828>
7. HERNANDEZ-ALDAVE, S.; ANDREOLI, E. *Fundamentals of Gas Diffusion Electrodes and Electrolysers for Carbon Dioxide Utilisation: Challenges and Opportunities*. *Catalysts*, v. 10, n. 6, p. 713, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/CATAL10060713>.
8. IEROPOULOS, I.; WINFIELD, J.; GREENMAN, J. *Effects of flow-rate, inoculum and time on the internal resistance of microbial fuel cells*. 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.12.108>
9. KIM, J. R.; PREMIER, G. C.; HAWKES, F. R.; DINSDALE, R. M.; GUWY, A. J. *Development of a tubular microbial fuel cell (MFC) employing a membrane electrode assembly cathode*. *Journal of Power Sources*, v. 187, n. 2, p. 393–399, 2009. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2008.11.020>
10. KONDAVEETI, S.; LEE, S. H.; PARK, H. D.; MIN, B. *Specific enrichment of different Geobacter sp. in anode biofilm by varying interspatial distance of electrodes in air-cathode microbial fuel cell (MFC)*. *Electrochimica Acta*, v. 331, p. 135388, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.ELECTACTA.2019.135388>
11. LOGAN, B. E. *Microbial fuel cell*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.
12. 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. Disponível em: <https://doi.org/10.1021/es0605016>.
13. MASHKOUR, M.; RAHIMNEJAD, M.; MASHKOUR, M.; SOAVI, F. *Increasing bioelectricity generation in microbial fuel cells by a high-performance cellulose-based membrane electrode assembly*. *Applied Energy*, v. 282, p. 116150, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2020.116150>
14. MATEO, S.; ZAMORANO-LÓPEZ, N.; BORRAS, L.; FERNANDEZ-MORALES, F. J.; CAÑIZARES, P.; SECO, A.; RODRIGO, M. *Effect of sludge age on microbial consortia developed in MFCs*. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*, v. 93, n. 5, p. 1290–1299, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/JCTB.5488>
15. MIN, B.; POULSEN, F. W.; THYGESEN, A.; ANGELIDAKI, I. *Electric power generation by a submersible microbial fuel cell equipped with a membrane electrode assembly*. *Bioresource Technology*, v. 118, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2012.04.097>

16. MOCALI, S.; GALEFFI, C.; PERRIN, E.; FLORIO, A.; MIGLIORE, M.; CANGANELLA, F.; BIANCONI, G.; DI MATTIA, E.; DELL'ABATE, M. T.; FANI, R.; BENEDETTI, A. *Alteration of bacterial communities and organic matter in microbial fuel cells (MFCs) supplied with soil and organic fertilizer. Applied Microbiology and Biotechnology*, v. 97, n. 3, p. 1299–1315, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/S00253-012-3906-6/FIGURES/4>.
17. MUKHERJEE, M.; ZAIDEN, N.; TENG, A.; HU, Y.; CAO, B. *Shewanella biofilm development and engineering for environmental and bioenergy applications. Current Opinion in Chemical Biology*, v. 59, p. 84–92, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.CBPA.2020.05.004>
18. MUNOZ-CUPA, C.; HU, Y.; XU, C.; BASSI, A. *An overview of microbial fuel cell usage in wastewater treatment, resource recovery and energy production. Science of The Total Environment*, v. 754, p. 142429, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.142429>
19. OBIKEKE, K.; 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, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.ELECOM.2021.107003>
20. PATIL, S. A.; HARNISCH, F.; KAPADNIS, B.; SCHRÖDER, U. *Electroactive mixed culture biofilms in microbial bioelectrochemical systems: The role of temperature for biofilm formation and performance. Biosensors and Bioelectronics*, v. 26, n. 2, p. 803–808, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.BIOS.2010.06.019>
21. READ, S. T.; DUTTA, P.; BOND, P. L.; KELLER, J.; RABAEY, K. *Initial development and structure of biofilms on microbial fuel cell anodes. BMC Microbiology*, v. 10, n. 1, p. 1–10, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/1471-2180-10-98/FIGURES/6>. Acesso em: 1 abr. 2023.
22. SANTORO, C.; AGRIOS, A.; PASAOGULLARI, U.; LI, B. *Effects of gas diffusion layer (GDL) and micro porous layer (MPL) on cathode performance in microbial fuel cells (MFCs). International Journal of Hydrogen Energy*, v. 36, n. 20, p. 13096–13104, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2011.07.030>
23. 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. International Conference on Innovations in Energy Engineering & Cleaner Production IEE CP*, v. 22, n. 50 mL, p. 1, 2022.
24. SRIVASTAVA, P.; ABBASSI, R.; YADAV, A. K.; GARANIYA, V.; KHAN, F. *Microbial fuel cell-integrated wastewater treatment systems. Integrated Microbial Fuel Cells for Wastewater Treatment*, p. 29–46, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817493-7.00002-3>
25. SURESH, R.; RAJENDRAN, S.; KUMAR, P. S.; DUTTA, K.; VO, D. V. N. *Current advances in microbial fuel cell technology toward removal of organic contaminants – A review. Chemosphere*, v. 287, p. 132186, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.132186>
26. VENKATA MOHAN, S.; VELVIZHI, G.; ANNIE MODESTRA, J.; SRIKANTH, S. *Microbial fuel cell: Critical factors regulating bio-catalyzed electrochemical process and recent advancements. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 40, p. 779–797, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.07.109>
27. VILAS BOAS, J.; OLIVEIRA, V. B.; MARCON, L. R. C.; SIMÕES, M.; PINTO, A. M. F. R. *Optimization of a single chamber microbial fuel cell using Lactobacillus pentosus: Influence of design and operating parameters. Science of the Total Environment*, v. 648, p. 263–270, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.061>
28. WATSON, V. J.; LOGAN, B. E. *Analysis of polarization methods for elimination of power overshoot in microbial fuel cells. Electrochemistry Communications*, v. 13, n. 1, p. 54–56, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.ELECOM.2010.11.011>
29. WINFIELD, J.; IEROPOULOS, I.; GREENMAN, J.; DENNIS, J. *The overshoot phenomenon as a function of internal resistance in microbial fuel cells. Bioelectrochemistry*, v. 81, n. 1, p. 22–27, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.BIOELECTCHEM.2011.01.001>
30. YE, Y.; NGO, H. H.; GUO, W.; CHANG, S. W.; NGUYEN, D. D.; LIU, Y.; NI, B. jie; ZHANG, X. *Microbial fuel cell for nutrient recovery and electricity generation from municipal wastewater under different ammonium concentrations. Bioresource Technology*, v. 292, p. 121992, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2019.121992>
31. ZHOU, L.; WU, Y.; ZHANG, S.; LI, Y.; GAO, Y.; ZHANG, W.; TIAN, L.; LI, T.; DU, Q.; SUN, S. *Recent development in microbial electrochemical technologies: Biofilm formation, regulation, and application in water pollution prevention and control. Journal of Water Process Engineering*, v. 49, p. 103135, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/J.JWPE.2022.103135>