

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Marcos Henrique Perrude

Performance de uma célula a combustível microbiana (CCM) operada com sistema de extração de energia ativa

Florianópolis
2023

Marcos Henrique Perrude

Performance de uma célula a combustível microbiana (CCM) operada com sistema de extração de energia ativa

Relatório de iniciação tecnológica
submetido ao curso de Engenharia
Sanitária e Ambiental do Campus
Florianópolis da Universidade Federal de
Santa Catarina

Orientador: Prof. Flávio Rubens Lapolli, Dr

Florianópolis

2023

Resumo

Com o aumento da demanda de consumo de energia elétrica mundialmente, novas meios de produção de energia são fundamentais. A bioenergia é considerada um potencial para essa produção, pois ocorre a extração de energia através de materiais biológicos. Sendo assim, o desenvolvimento de métodos de produção de bioenergia é essencial. Uma tecnologia que vem ganhando notoriedade nas últimas décadas são as células de combustível microbianas (CCMs), a qual se baseia na extração de energia através da oxidação de compostos orgânicos presentes em águas residuárias. Entretanto, por ser uma tecnologia em expansão, alguns obstáculos se mostraram evidentes, como por exemplo parâmetros de funcionamento, características de construção e baixa eficiência coulômbica. Sendo assim, no presente estudo, avaliou-se uma CCM de câmara única (CCM-U) de 2 L para o tratamento de efluente sintético (semelhante ao efluente sanitário). A CCM foi inoculada e aclimatada com lodo anaeróbio proveniente de uma estação de tratamento de efluente sanitário (ETE). Dividido em 2 fases, a operação se deu em fluxo contínuo, com tempo de detenção hidráulica (TDH) de 12 horas. Na primeira, com a utilização de um resistor, foi obtido o ponto de máxima de potência da CCM, na tensão de 0,270 V. Na segunda, o resistor foi substituído por um circuito elétrico com a finalidade de extração de energia elétrica e operado no ponto de máxima potência (0,270 V), sendo direcionada para o carregamento de uma bateria de lítio 3,7 V. Além disso, na célula de combustível microbiana com um resistor externo (CCM-R) se obteve uma corrente máxima foi de 0,28 mA, correspondendo a uma densidade de corrente máxima de 135 mA m⁻³ e eficiência coulômbica de 2,48 ± 0,66%. No entanto, não foi possível fazer o aproveitamento dessa energia, visto que, toda energia era dissipada no resistor na forma de calor. Já na célula de combustível microbiana com o sistema de extração ativa de energia (CCM-C), a potência e a eficiência coulômbica, aumentaram em aproximadamente 2,5 e 2,4 vezes, respectivamente. Isso se deve pelo fato da CCM-C atuar no ponto de máxima potência, permitindo o carregamento de uma bateria. Em relação ao tratamento do efluente, ambas obtiveram um cenário parecido, com uma remoção de cerca de 27% de DQO. Somado a isso, por ser um sistema apenas anaeróbio, não obteve remoção de amônia e fósforo, visto que seria necessário a troca de ambiente aeróbio e anaeróbio para realizar o tratamento. Com isso, evidenciou-se a necessidade de um sistema de pós-tratamento. O Sistema aqui estudado apresenta uma oportunidade para geração de eletricidade a partir do tratamento de efluentes.

Palavras-chave: Tratamento de efluente, Bioenergia, Geração de eletricidade.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	5
1.1	OBJETIVOS.....	6
1.1.1	OBJETIVO GERAL.....	6
1.1.2	OBJETIVO ESPECÍFICOS.....	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1	CÉLULA COMBUSTÍVEL MICROBIANA.....	7
2.1.1	DEFINIÇÃO E FUNDAMENTOS.....	7
2.1.3	ATIVIDADE BIOLÓGICA.....	9
2.1.4	ASPECTOS ESTRUTURAIS.....	9
2.1.5	ASPECTOS OPERACIONAIS.....	11
2.2	APLICAÇÃO PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES.....	13
2.3	EXTRAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA.....	14
3	METODOLOGIA.....	16
3.1	CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO.....	17
3.2	INÓCULO E SUBSTRATO.....	18
3.3	EXTRAÇÃO DE ENERGIA ATIVA.....	19
3.4	ANÁLISES.....	20
3.4.1	ENSAIOS ELETROQUÍMICOS.....	20
3.4.2	MONITORAMENTO DA QUALIDADE DO EFLUENTE.....	21
4	RESULTADOS.....	22
4.1	PARÂMETRO ELETROQUÍMICOS.....	22
4.2	TRATAMENTO DE EFLUENTE.....	23
5	CONCLUSÃO.....	25
	REFERÊNCIAS.....	27

1 INTRODUÇÃO

O modo de vida e desenvolvimento atual da humanidade é vista como insustentável frente a modernidade que promove o desencadeamento de diversas crises energéticas mundiais (Du, Li e Gu, 2007), devido a isso, novos meios de produção energética são indispensáveis para o futuro (Nan *et al.*, 2022).

A bioenergia renovável é encarada como um alívio para esses problemas (Du, Li e Gu, 2007). No Brasil, o esgotamento sanitário é responsável por consumir 1,42 TWh ano (SNIS, 2019), apesar de necessitar uma quantidade de energia considerável, o tratamento convencional de efluentes não possui a capacidade de aproveitar potencial presente nas águas residuárias (Do *et al.*, 2018). Logo, a implementação de novos métodos de tratamento e produção de energia são essenciais para o desenvolvimento sustentável da sociedade.

As Células de Combustível Microbianas (CCM) são uma solução inovadora para o tratamento de efluentes e esgoto sanitário, contribuindo para o tratamento de efluentes enquanto simultaneamente ocorre a produção de energia elétrica por um sistema externo (Idris *et al.*, 2016). Semelhante a uma pilha, no ânodo, o eletrodo é responsável por captar os elétrons liberados através da oxidação da matéria orgânica pela ação de bactérias eletroativas, em condições anaeróbias (Prathiba, Kumar e Vo., 2022). Com a oxidação da matéria orgânica, ocorre também a liberação de prótons, do qual que, através de uma membrana trocadora de prótons, é constituído o cátodo da célula (Prathiba, Kumar e Vo, 2022; Logan *et al.*, 2006). A produção de energia elétrica acontece quando os dois polos são conectados através de um circuito externo com a presença de um resistor externo, promovendo passagem de elétrons do ânodo para o cátodo pela diferença de potencial (Logan *et al.*, 2006)

Em decorrência do CCM se basear em um tratamento composto por bactérias, o funcionamento baseado em condições favoráveis é um fator decisivo para uma boa eficiência (Obileke *et al.*, 2021). Devido a isso, fatores como atividade biológica, aspectos estruturais e operacionais são um fator limitante na produção de energia e tratamento do efluente (Idris *et al.*, 2016; Meylani *et al.*, 2023; Prathiba, Kumar e Vo, 2022).

Apesar de uma CCM se apresentar como uma solução, uma barreira dessa tecnologia é a baixa produção de energia elétrica promissora (Yu *et al.*, 2021). Limitada a alguns milliwatts de densidade de potência (mW/m²), a CCM vem sendo

alvo de diversas pesquisas para uma alta eficiência tanto na produção de energia elétrica quanto no potencial de tratamento, favorecendo assim a aplicabilidade em larga escala (Do *et al.*, 2018). Vale destacar que a tecnologia é recente e ainda está se desenvolvendo.

Uma alternativa para um aumento da produção de energia elétrica é a operação da CCM baseado no sistema de controle de rastreamento de ponto de potência máxima (*maximum power point tracking* - MPPT), do qual rastreia o ponto em que ocorre a máxima geração de energia (*Maximum Power Point* - MPP) e promovendo uma maior eficiência coulômbica (Degrenne *et al.*, 2012).

Com isso, o objetivo desta pesquisa foi analisar capacidade de operação uma CCM frente ao tratamento de um efluente sintético similar ao doméstico, se baseando na análise de parâmetros físico-químicos, além de analisar e comparar a capacidade de extração de energia elétrica, utilizando o MPPT, em relação ao uso convencional com um resistor.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral desta proposta de pesquisa foi avaliar a performance de uma CCM de câmara única em escala piloto (2 L), abastecida com efluente doméstico sintético, acoplada a um módulo de extração de energia ativa, para carregamento de uma bateria de lítio (3,7 V).

1.1.2 Objetivo específicos

- a) Operar a CCM-U com resistor e determinar o ponto máximo de potência do sistema;
- b) Avaliar a operação da CCM-U com circuito elétrico para extração de energia ativa e armazenamento;
- c) Comparar a operação da CCM-U com resistor passivo e circuito elétrico;
- d) Avaliar a capacidade de tratamento de efluente e melhoria dos parâmetros físico-químicos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CÉLULA COMBUSTÍVEL MICROBIANA

2.1.1 Definição e fundamentos

A sustentabilidade é vista atualmente como um dos principais desafios enfrentados pela humanidade, com os níveis atuais de consumo é necessário de cerca de 1,7 planetas Terra para supri-lo (WWF,2023).

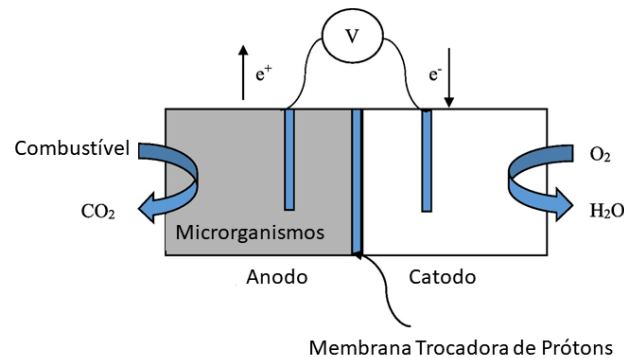
Com a tendência de aumento de consumo de energia elétrica para o futuro, novos meios de produção são indispensáveis (Nan *et al.*, 2022). Uma possibilidade é a produção de energia elétrica através do tratamento de efluentes, por exemplo, a digestão anaeróbia (Obileke *et al.*, 2021). No entanto, o biogás gerado a partir desse processo requer uma série de tratamentos para torná-lo viável de ser utilizado e possui perdas associadas (Nguyen e Babel, 2022).Frente a esta perspectiva, Células de Combustíveis Microbianas (CCM) apresentam como uma solução promissora, uma vez que são capazes de tratar o efluente e produzir energia elétrica de maneira direta.

As CCMs possuem a capacidade de tratar os efluentes (Rossi *et al.*, 2022), reduzindo a demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), sulfetos, nitratos, amônia e nitrogênio (Kumar *et al.*, 2019a; Park *et al.*, 2017; Zhong *et al.*, 2017). Além disso, CCMs também podem tratam características residuais específicas, como a presença de corantes, metais pesados e sendo uma alternativa eficiente para a dessalinização (Kumar *et al.*, 2019).

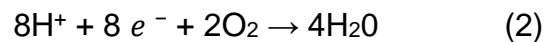
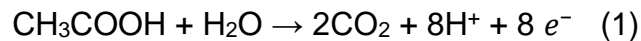
Somado a isso, por meio da oxirredução da matéria orgânica de águas residuais feito pelas bactérias, a CCM é capaz de fornecer energia elétrica com a utilização de eletrodos na câmara de tratamento (Idris *et al.*, 2016; Rossi *et al.*, 2022).

Considerando a Figura 1 e usando o Acetato (CH_3COOH) como fonte de carbono, o funcionamento de uma CCM inicia-se com a oxidação do substrato na câmara anódica pela respiração anaeróbia dos microorganismos, produzindo dióxido de carbono e resultando na liberação de elétrons e prótons (Equação 1) (Obileke *et al.*, 2021). Após isso os elétrons são recolhidos pelas superfícies do eletrodo do ânodo e transferidos pela câmara catódica por meio de circuito externo.

FIGURA 1 – Representação esquemático CCM



Fonte: Adaptado de He *et al.*, 2006 apud Obileke *et al.* (2021)



Na câmara catódica, os elétrons reagem com o receptor de elétrons (oxigênio – ambiente aeróbio) e prótons ocorrendo a formação de moléculas de água em decorrência dessa reação (Equação 2) (Flimban *et al.*, 2019; Obileke *et al.*, 2021). Sendo assim, é produzida uma diferença de potencial entre as câmaras e então forma-se um fluxo de elétrons no circuito externo, levando à geração de energia elétrica.

Portanto, como a CCM funciona similar a uma pilha, com reações de oxidação-redução, esta tem seu desempenho avaliado por parâmetros como tensão, corrente elétrica e potência. A tensão (V) se refere à diferença de potencial elétrico entre o cátodo e o ânodo, podendo ser mensurada com o auxílio de um multímetro (Silva, 2018).

A corrente elétrica (I) corresponde ao fluxo ordenado de elétrons dentro de um sistema condutor, quando existe uma diferença de potencial elétrico entre as extremidades, sendo calculado através da Lei de Ohm, sendo expressa em Ampère (A) (Silva Filho, 2018).

A potência (P) da CCM corresponde à quantidade de energia concedida por uma fonte de carbono a cada unidade de tempo, sendo medida em Watt (W) (LOGAN *et al.*, 2006). O cálculo consiste na razão entre a corrente elétrica (I) e tensão (V) (Rabaey e Verstraete, 2005).

2.1.3 Atividade biológica

Existe uma ampla gama de bactérias que podem ser utilizadas para a inoculação e utilização em CCMs, podem ser provenientes de culturas puras como *Bacillus subtilis*, *Streptococcus lactis*, *Escherichia coli*, *Rhodoferax sp*, mas também de culturas mistas como uma cultura de *Escherichia coli* e *Saccharomycopsis fibuligera* (Meylani *et al.*, 2023; Prathiba, Kumar e Vo, 2022).

Estudos apontam que com a utilização de culturas puras de bactérias do gênero *Geobacter sp.*, *Shewanella sp* e *Rhodoferax sp*, é possível obter uma alta eficiência na transferência de elétrons (Prathiba, Kumar e Vo, 2022; Rabaey *et al.*, 2004) devido a sua capacidade de fazer a transferência direta de elétrons. Isto é, estas fazem a transferência de elétrons de forma direta para o material do eletrodo através do contato extracelular (Prathiba, Kumar e Vo, 2022).

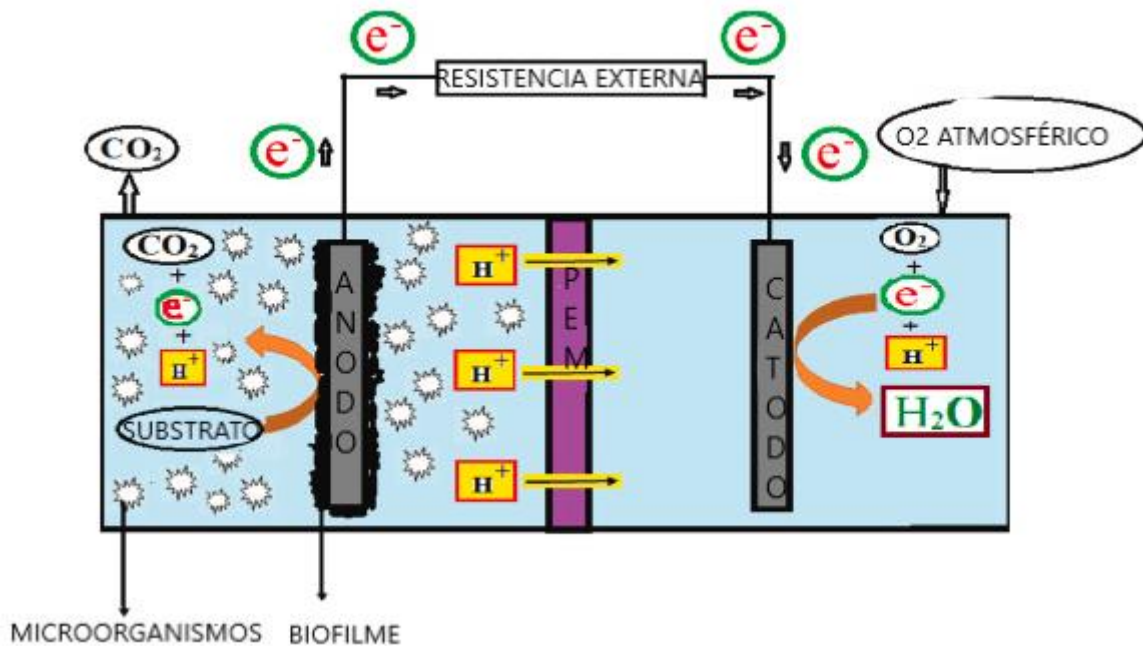
De acordo com Prathiba, Kumar e Vo (2022), a transferência de elétrons é realizada através de proteínas do citocromo tipo C localizados na parede externa da célula microbiana, semelhantes a nanofios condutores e sendo necessário a aderência das bactérias na superfície do eletrodo.

Em contrapartida, Logan *et al.* (2006) apontam que a utilização de CCMs com fontes ricas e diversas de bactérias, por exemplo lodo, como inóculo no ânodo, se obtém uma maior densidade de potência durante o tratamento da água residual. Além disso, com a utilização de culturas mistas, o tratamento da água residual é adequado devido à alta adaptabilidade e cooperação em decorrência da vasta gama de microrganismos presentes (Kumar *et al.*, 2019b)

2.1.4 Aspectos estruturais

É possível desenvolver diversas configurações estruturais de CCM, mas se apresentam principalmente em CCM de câmara dupla (CCM-D) e CCM de câmara única (CCM-U) (Kumar *et al.*, 2019). A CCM-D baseia-se na divisão da CCM em duas câmaras, catódica e anódica, separadas por uma membrana de troca de prótons (Obileke *et al.*, 2021) ou por uma ponte salina para permitir a locomoção dos prótons (Figura 2) (Du, Li e Gu, 2007). No ambiente anódico se localiza as bactérias que irão oxidar de substrato em ambiente anaeróbio, enquanto na câmara catódica é onde ocorre a reação de redução e formação da molécula de água como já mencionado no tópico 2.1.1.

Figura 2 – CCM de câmara dupla (CCM-D).

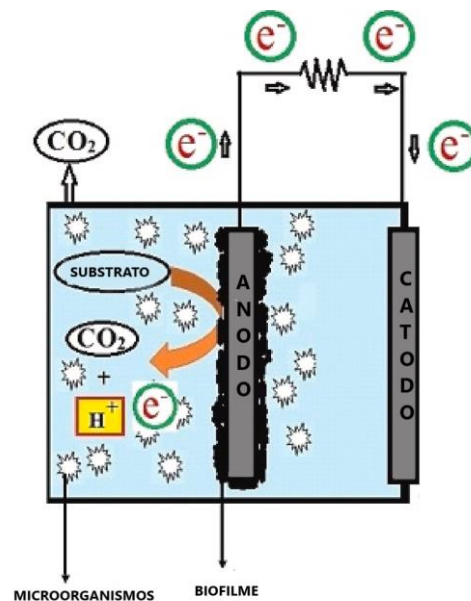


Fonte: Adaptado de Prathiba, Kumar e Vo, (2022).

O papel da membrana trocadora de prótons é efetuar a transferência de prótons da câmara anódica para a câmara catódica, além de controlar a difusão de oxigênio presente no cátodo na câmara anódica, o qual deve permanecer em condições anaeróbicas (Prathiba, Kumar e Vo, 2022). Em contrapartida, a passagem de prótons pode ocasionar uma incrustação dessa membrana, prejudicando assim a geração de energia devido ao aumento da resistência interna no CCM, e alteração no desempenho das bactérias (Obileke *et al.*, 2021).

Já na CCM-U (Figura 3), se apresenta como um sistema mais simplificado e econômico (Prathiba, Kumar e Vo, 2022). O ânodo e o cátodo são acoplados sem barreiras físicas, ou seja, sem a membrana dividindo as câmaras (Obileke *et al.*, 2021). O cátodo é diretamente exposto ao ar. Dessa forma, os elétrons são transferidos do ânodo para o cátodo de forma direta, e dispensa a aeração externa (Prathiba, Kumar e Vo, 2022).

Figura 3- Ilustração de CCM de câmara única (CCM-U).



Fonte: Adaptado de Prathiba, Kumar e Vo, (2022)

Devido as características de construção e operação, a CCM-U é considerada o sistema mais viável para a produção em grande escala (Du, Li e Gu, 2007) possuindo vantagens como a diminuição na resistência interna, não necessita aeração, operação simples e espaçamento reduzido dos eletrodos. No entanto, a CCM-U possui problemas como a alta difusão de oxigênio (Flimban *et al.*, 2019)

2.1.5 Aspectos operacionais

Para extrair o máximo de benefícios na utilização de CCMs para o tratamento de águas residuais, critérios de construção e funcionamento devem ser adotados. Fatores como pH, temperatura, área de superfície do eletrodo, tipo e material de eletrodo, membrana e regime de operação, entre outros, são aspectos cruciais para o desempenho de uma CCM (Do *et al.*, 2018; Prathiba, Kumar e Vo, 2022).

De acordo com Do *et al.*, (2018), o material do eletrodo afeta o desempenho do CCM através da taxa de adesão bacteriana, taxa de transferência de elétrons e eficiência eletroquímica. Os autores afirmam que de acordo com a finalidade dos componentes básicos de um CCM, diferentes configurações e materiais devem ser adotados na hora de sua construção para um maior desempenho. O Quadro 1 apresenta alguns dos materiais comumente empregados.

Quadro 1- Composição de componentes básicos da CCM.

Itens	Materiais
Ânodo	Grafite, feltro de grafite, papel carbono, tecido carbono, Pt, Pt preto, carbono vítreo reticulado.
Cátodo	Grafite, feltro de grafite, papel carbono, tecido carbono, Pt, Pt preto.
Câmara anódica	Vidro, policarbonato, plexiglas
Câmara catódica	Vidro, policarbonato, plexiglas
Sistema de troca de prótons	Nafion, Ultrex, polietileno.poly (estireno – co – divinilbenzeno), ponte salina, septo de porcelana ou apenas eletrotil
Catalisador eletrônico	Pt, Pt black, MnO ₂ , Fe ³⁺ , polianilina, mediador de elétrons imobilizado no ânodo

Fonte: Adaptado de Do *et al.* (2018)

O controle do pH ainda é um desafio para o desenvolvimento de CCMs (Flimban *et al.*, 2019), sua ação afeta diretamente a atividade microbiana, atividade eletroquímica, transferências de elétrons, controle de oxigênio e tratamento do efluente (Flimban *et al.*, 2019; Oibileke *et al.*, 2021; Radouani *et al.*, 2023). Além disso, com desenvolvimento microbiana afetado, a formação do biofilme é pode ser prejudicada, afetando a transferência de elétrons e conseqüentemente a produção de energia (Oibileke *et al.*, 2021).

Entretanto, diferentes cepas de bactérias possuem diferentes pHs ideais para o máximo desenvolvimento bacteriano e atividade metabólica (Yong *et al.*, 2013), sendo assim, não há uma concordância acerca do pH ideal para a operação de um CCM. No estudo desenvolvido por Nimje *et al.* (2011), com a utilização de uma cultura pura de *Enterobacter cloacae* em uma CCM-D, se obteve maior corrente elétrica em um pH de 6,5 utilizando um efluente doméstico. Isso se deve à própria bactéria possuir uma atividade de descarga eletrônica mais lenta em pH alcalino. Sendo assim, a faixa de pH recomendada para a operação do CCM é entre 6 e 9 (Oibileke *et al.*, 2021).

A temperatura também é um fator determinante no desempenho do CCM, ela afeta o metabolismo bacteriano, fluxo de massa, termodinâmica, permeabilidade da membrana e controle de reações enzimática (Bird *et al.*, 2022; Oibileke *et al.*, 2021). Além disso, ela influencia na dominância bacteriana durante a formação do biofilme (Radouani *et al.*, 2023), favorecendo sua formação e ajudando também na inicialização do CCM em maiores temperaturas (Oibileke *et al.*, 2021).

Uma CCM pode operar em um sistema de operação de contínuo (Bird *et al.*, 2022) e em batelada (Pannell *et al.*, 2016). Em decorrência da preocupação em

escalar sistemas de tratamento com CCM, o fluxo contínuo é o preferível para o tratamento de águas residuais (Do *et al.*, 2018).

Além disso, de acordo com Du, Li e Gu, (2007), a resistência externa presente em decorrência do fluxo de elétrons entre os eletrodos, em parâmetros reais de aplicação, promove uma perda ôhmica no CCM, sendo encarada como um fator limitante para a geração de eletricidade (Obileke *et al.*, 2021).

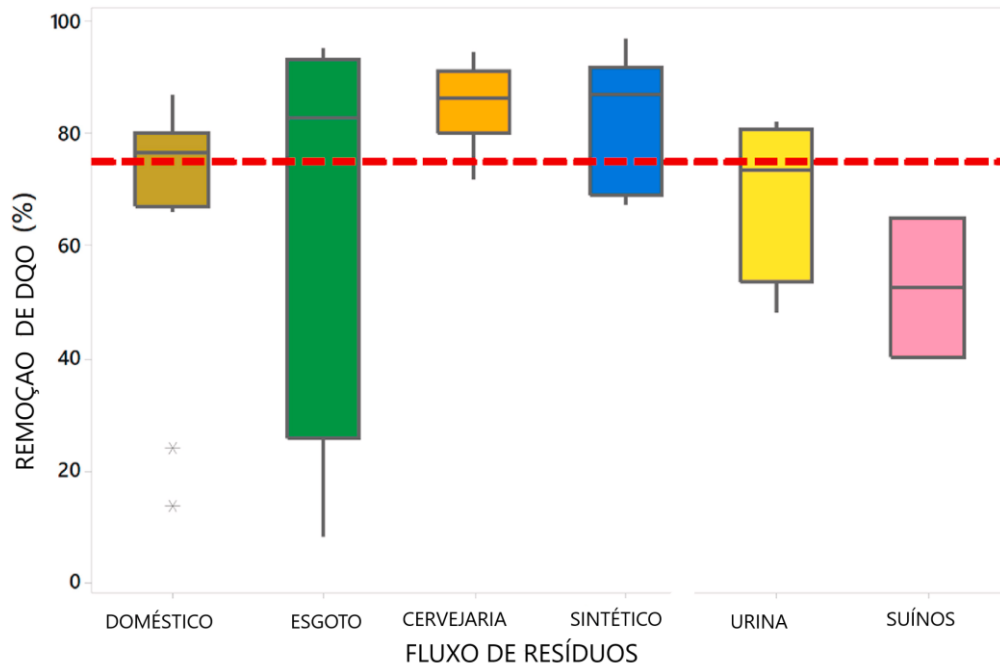
2.2 APLICAÇÃO PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES

Somado a produção de energia, CCM se apresenta como um eficiente método de tratamento de águas residuais, com capacidade de remoção de DQO, DBO, metais pesados (Prathiba, Kumar e Vo, 2022), metais tóxicos, corantes (Yaqoob *et al.*, 2020), nitrogênio (Park *et al.*, 2017), sulfeto, nitrato (ZHONG *et al.*, 2017) e fósforo (Zhang *et al.*, 2013). No entanto, a falta de estudos referente as características gerais de funcionamento para o tratamento de águas residuais em escala real, ainda é uma barreira para a aplicação (Bird *et al.*, 2022).

Apesar do tratamento de águas residuais alcançarem remoções de DQO entre 50% a 95 % (Bird *et al.*, 2022; Obileke *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2013), a maioria dos estudos empregam pequenos volumes de tratamento (28 – 500 ml), evidenciando uma precária base para a implementação em escalas maiores, compatíveis com estações de tratamento de efluentes.

Bird *et al.* (2022) realizaram uma revisão de estudos acerca do tratamento de diversas fontes de águas residuais por CCM. Os resultados, apresentados na Figura 4, demonstraram uma remoção eficiente na maioria dos efluentes. No entanto, o efluente de suínos ficou abaixo dos demais em decorrência da presença de poluentes recalcitrantes.

Figura 4 - Remoção de DQO em função do tipo de efluente.



Fonte: Adaptado de Bird *et al.*, (2022)

Além disso, no estudo desenvolvido por Zhang *et al.* (2013), realizou-se uma instalação de duas CCMs em uma estação municipal de tratamento de efluentes. Através de uma CCM desnitrificante, a remoção de nitrogênio total aumentou substancialmente (27,1%- 76,2%), juntamente com uma remoção eficiente de sulfato (81,2 %) e diminuição dos sólidos totais, decorrente da produção secundária de lodo. Entretanto nesse mesmo estudo, foi observado uma diminuição na densidade da corrente elétrica produzida, podendo ser em decorrência da incrustação da membrana e do eletrodo catódico.

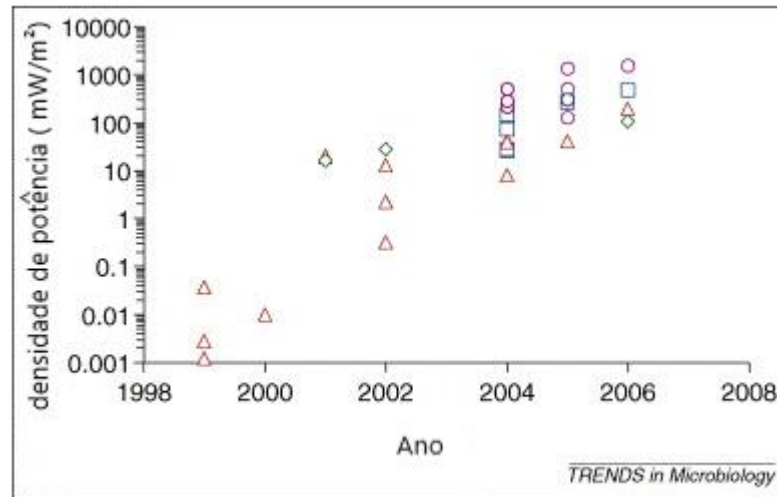
2.3 EXTRAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

A CCM vem sendo considerado uma alternativa promissora para o tratamento de efluentes, sendo possível o tratamento enquanto ocorre produz energia elétrica. Entretanto, essa tecnologia apresenta desafios, a arquitetura e funcionamento do sistema ainda é uma barreira para produção de uma alta densidade de potência (Idris *et al.*, 2016).

Idris *et al.* (2016) realizaram uma revisão bibliográfica acerca da extração de energia de CCMs (Figura 5), Os resultados indicam que apesar do aumento de densidade de potência, essa tecnologia necessita de uma maior compreensão de elementos essenciais, como o tipo de bactéria, os mecanismos de transferência de

elétrons e como ocorre a interação dessas bactérias dentro do sistema de CCM, sendo aspectos discutidos nos tópicos 2.1 e 2.2.

Figura 5- densidade de energia ao longo do tempo (baseado em pesquisas publicadas).

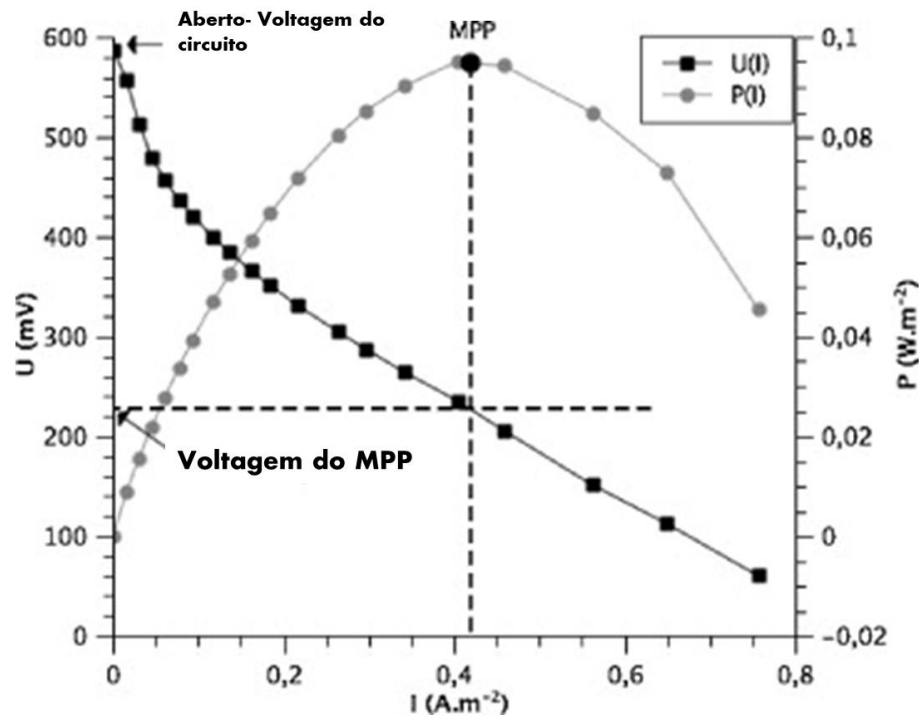


Fonte: Adaptado de Idris *et al.* (2016)

A extração de energia em uma CCM se deve a aplicação de um circuito externo com resistores acoplado a célula, induzindo a produção de uma corrente elétrica pelo fechamento do circuito (Bird *et al.*, 2022). Esse método é o modo convencional de extração de energia, caracterizado pela presença de resistor para a recuperação de energia elétrica através da passagem passiva de corrente elétrica (Lu *et al.*, 2019).

Entretanto métodos aprimorados de extração de energia como a aplicação de um sistema de controle de rastreamento de ponto de potência máxima (MPP), do qual rastreia o ponto em que ocorre a máxima geração de energia, juntamente com um conversor indutivo permite uma otimização de coleta de energia, baseando-se no controle de operação de funcionamento da CCM (Degrenne *et al.*, 2012). Degrenne *et al.* (2012) afirmam que esse método de funcionamento se baseia no rastreamento do MPP, através da construção da curva de polarização, com o controle de resistência feito por um algoritmo de MPPT (Figura 6).

Figura 6- Curvas de polarização e densidade de potência normalizadas MPPT



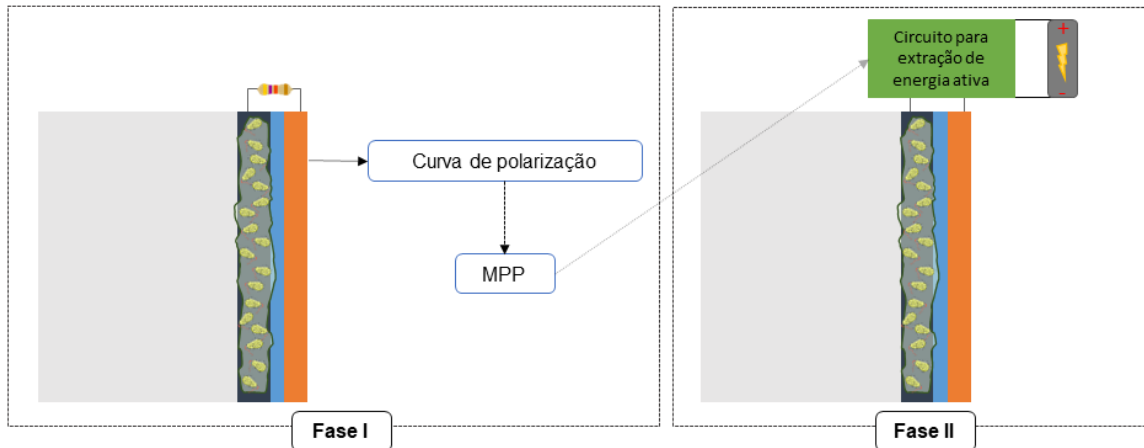
Fonte: Adaptado de Degrenne et al. (2012)

3 METODOLOGIA

O presente projeto de pesquisa foi executado nas dependências do Laboratório de Reúso de Águas (LaRA), do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). O projeto ocorreu em 2 fases, como demonstra a Figura 7.

- **Fase I (CCM-R):** A CCM foi operada em condições ótimas para o referido reator, as quais foram determinadas previamente em projeto de iniciação científica. Um resistor de 1000Ω foi conectado ao reator. Nesta etapa, foi determinado o ponto máximo de potência da CCM. Além disso, esta etapa serviu como um controle para realizar a comparação com a operação com o circuito elétrico. A CCM foi monitorada quanto os parâmetros de geração de energia elétrica e qualidade do efluente tratado pela CCM.
- **Fase II (CCM-C):** compreendeu a operação da CCM com circuito elétrico para extração de energia ativa, em ponto máximo de potência determinado na fase anterior. Ainda, a uma bateria recarregável de lítio (3,7 V) foi acoplada ao circuito elétrico, sendo possível armazenar a energia gerada, a qual pode ter sido destinada para suprir a demanda de outras tecnologias para o tratamento de efluente. Assim sendo, a performance da CCM foi monitorada quanto a geração de eletricidade (tensão, corrente e potência) e qualidade do efluente produzido.

Figura 7 - Fluxograma do projeto de pesquisa.

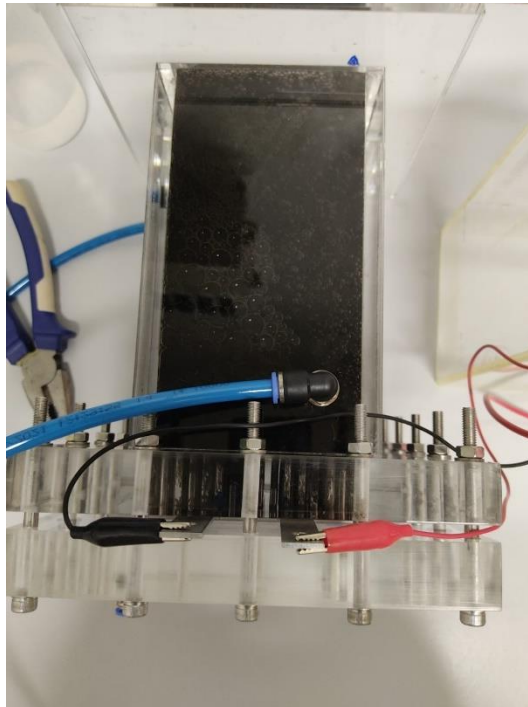


Nota: Fase I, operação da CCM acoplada com resistor (CCM-R). Para Fase II, CCM operada com sistema de extração de energia através de circuito elétrico (CCM-C).

3.1 CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO

Para execução deste projeto de pesquisa, foi utilizada CCM de câmara única, com cátodo exposto ao ar, em acrílico translúcido com volume de útil de 2 L. A unidade experimental foi construída pela empresa NovoCell® e é ilustrada pela Figura 8.

Figura 8 – Célula a combustível microbiana de câmara única.



Fonte: Acervo LaRA.

A CCM possuía um eletrodo do tipo MEA (*membrane electrode assembly*), em que a membrana trocadora de prótons é prensada entre os dois eletrodos. Para o

ânodo foi utilizado papel de carbono e PTFE (Teflon®). O cátodo foi um tecido de carbono acrescido de catalisador Platina com carga de 0,4 mg/cm². Entre os eletrodos, havia membrana trocadora de prótons (Nafion™ 212, DuPont), recoberta em cada face por camada de nanopartículas de Carbono (Vulcan XC-72 R). A área total foi de 144 cm². Placas de aço inoxidável foram utilizadas como coletores de elétrons. Os eletrodos permaneceram conectados externamente por um fio de cobre.

A operação se deu em fluxo contínuo, com tempo de detenção hidráulica (TDH) de 0,5 d e carga orgânica volumétrica (COV) aplicada de 1,00 kgDQO/m³.dia. O abastecimento ocorreu por meio de bomba peristáltica (Watson Marlow - 323). O sistema conteve com reservatórios para armazenamento de efluente bruto e tratado. Os ensaios ocorreram em temperatura controlada de 30°C, com pH próximo da neutralidade.

Durante a primeira fase, a CCM-R foi operada nas condições descritas. Os eletrodos foram conectados através de fios de cobre e garras de jacaré. Nesta fase, foi utilizado um resistor de 1000 Ω , e realizado ensaios eletroquímicos para determinar as condições ideais para extração de energia da CCM. Durante a segunda fase, o resistor externo foi substituído por um circuito elétrico.

3.2 INÓCULO E SUBSTRATO

A fonte de bactérias para inoculação da CCM foi proveniente de lodo anaeróbio de reator biológico da estação de tratamento de efluente sanitário (ETE) (Figura 9). O substrato empregado durante a execução da pesquisa foi esgoto sintético, a fim de reproduzir as características de efluente doméstico. O efluente sintético foi preparado de acordo com Souza et al. (2020), sendo: 850 mg/L de CH₃COONa, 28 mg/L de KH₂PO₄, 200 mg/L de NH₄Cl. Também adicionou-se micronutrientes em solução (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 de MnSO₄·H₂O e 10 mg/L de NaCl. O efluente sintético foi preparado diariamente com água deionizada.

Figura 9 –Coleta de lodo da ETE.



Fonte: Acervo LARA

3.3 EXTRAÇÃO DE ENERGIA ATIVA

Na fase II, a CCM foi operada no ponto máximo de potência com extração de energia ativa através de um circuito elétrico (CCM-C). O circuito elétrico para extração de energia ativa foi o módulo BQ25505 (Texas Instruments). O circuito elétrico corresponde a um sistema integrado de gerenciamento de energia Nano-Power, projetado especificamente para adquirir e gerenciar com alta eficiência os microwatts (μW) para miliwatts (mW) de potência geradas por uma variedade de fonte DC de alta impedância (Hi-Z). O módulo também possui um conversor/carregador de impulso modulado (PFM), que viabiliza o carregamento de uma bateria.

Portanto, o circuito elétrico foi controlado para rastrear a potência máxima produzida pela CCM ao operar em tensão constante, a qual foi determinada no teste de curva de polarização e potência durante a Fase I. A energia extraída de cada CCM pelo circuito elétrico foi armazenada em baterias de polímero de íon lítio (1050 mAh, 3,7 V, Rontek®). A descarga da bateria foi feita quando a carga máxima da bateria de lítio for atingida (ou seja, 3,65 V) e foi finalizada em 3,05 V. A conexão entre o circuito elétrico, CCM, bateria foi feita por *jumpers*. O sistema foi monitorado com multímetro digital.

3.4 ANÁLISES

3.4.1 Ensaios eletroquímicos

A tensão do circuito foi medida a cada 3 minutos através de um multímetro digital (ET-2615A, Minipa) conectado nas extremidades do resistor. A corrente elétrica gerada pelo sistema foi calculada por meio da Lei de Ohm, conforme apresenta a (Equação 3), e foi normalizada pela área de projeto do ânodo (Equação 4), em que I representa a corrente (mA), U tensão (mV), R a resistência externa (Ω), D_c densidade de corrente (mA/m²) e A área do eletrodo da CCM (m²). O cálculo de densidade também pode ser feito em função do volume da CCM e com a potência do sistema.

$$I = \frac{U}{R} \quad (3)$$

$$D_c = \frac{I}{A} \quad (4)$$

A potência gerada pela CCM foi calculada pela Equação 5. A densidade de potência foi normalizada com a área de projeto do ânodo (Equação 6), a fim de permitir a comparação de eficiência de outras CCM, em que P representa a potência (mW), U tensão (mV), I corrente (mA), D_p densidade de potência (mW/m²) e A área do eletrodo da CCM (m²).

$$P = U \cdot i \quad (5)$$

$$D_p = \frac{P}{A} \quad (6)$$

O cálculo de eficiência Coulômbica (EC), apresentado na Equação 7, representa a quantidade máxima de energia elétrica que pode ser produzida a partir da oxidação da matéria orgânica (DQO) (Logan *et al.*, 2006a), onde, M_s é a massa molecular do substrato (32 g/mol), t é o tempo de detenção hidráulica (s), I é a corrente média (mA), F é a constante de Faraday (96,485 C/mol), n mol de elétrons produzidos na degradação do substrato (4 mol e⁻/mol); vazão de abastecimento da CCM-U (L/s) e ΔC é a DQO diferença entre a DQO afluyente e efluente (g/L).

$$C_e = \frac{M_s \int_{t_0}^t i dt}{F.n.q.\Delta C} \quad (7)$$

As curvas de polarização e de potência, foram obtidas colocando a CCM em circuito aberto por pelo menos 30 min e reduzindo a resistência de 1000 a 10 Ω , em um intervalo de 10 min para cada resistor ou até estabilizar a tensão. Através deste ensaio, foi possível identificar o ponto de máxima potência (MPP). Este ensaio foi realizado na fase I deste projeto de pesquisa. Os dados adquiridos foram utilizados para a segunda fase de operação.

3.4.2 Monitoramento da qualidade do efluente

Para avaliar a eficiência da CCM em relação ao tratamento de efluente e melhora da qualidade d'água, foram feitas coletas no reservatório do efluente bruto e do efluente final. Os parâmetros foram analisados no reservatório de efluente bruto e efluente tratado para o monitoramento da eficiência da CCM são apresentados na Quadro 2. Além disso, o quadro apresenta a metodologia utilizada e a respectiva frequência de análise.

Quadro 2 - Parâmetros para o monitoramento da eficiência da CCM.

Parâmetro	Método de análise	Frequência
Demanda química de oxigênio (DQO)	Método colorimétrico - Kit Hach (método 8000). Leitura em espectrofotômetro Hach DR/5000	2 vezes por semana
Nitrogênio total – (N_{total})	Digestão com persulfato - Kit Hach (método 10072) Leitura em espectrofotômetro Hach DR/5000.	1 vez por semana
Nitrogênio amoniacal (NH₄⁺)	Método colorimétrico de Nessler com leitura em espectrofotômetro HACH modelo DR/5000	2 vezes por semana
Acetato; Nitrito (NO₂⁻); Nitrito (NO₃⁻); Sulfato; Cloretos	Cromatografia líquida de troca iônica (DIONEX ICS-5000)	2 vezes por semana
Ortofosfato (PO₄³⁻)	Método método molibdofosfórico com leitura em espectrofotômetro HACH modelo DR/5000	2 vezes por semana
Alcalinidade	Alteração do pH com adição de ácido sulfúrico 0,02N	2 vezes na semana
OD, temperatura, Condutividade e pH	Sonda multiparâmetros AKSO AK88	Diário

Para o cálculo da eficiência de remoção de remoção dos parâmetros físico-químico foi utilizada a Equação 8, Onde, C_i é a concentração inicial do parâmetro analisado e C_f concentração final do parâmetro analisado.

$$(\%) = \frac{C_i - C_f}{C_i} \times 100 \quad (8)$$

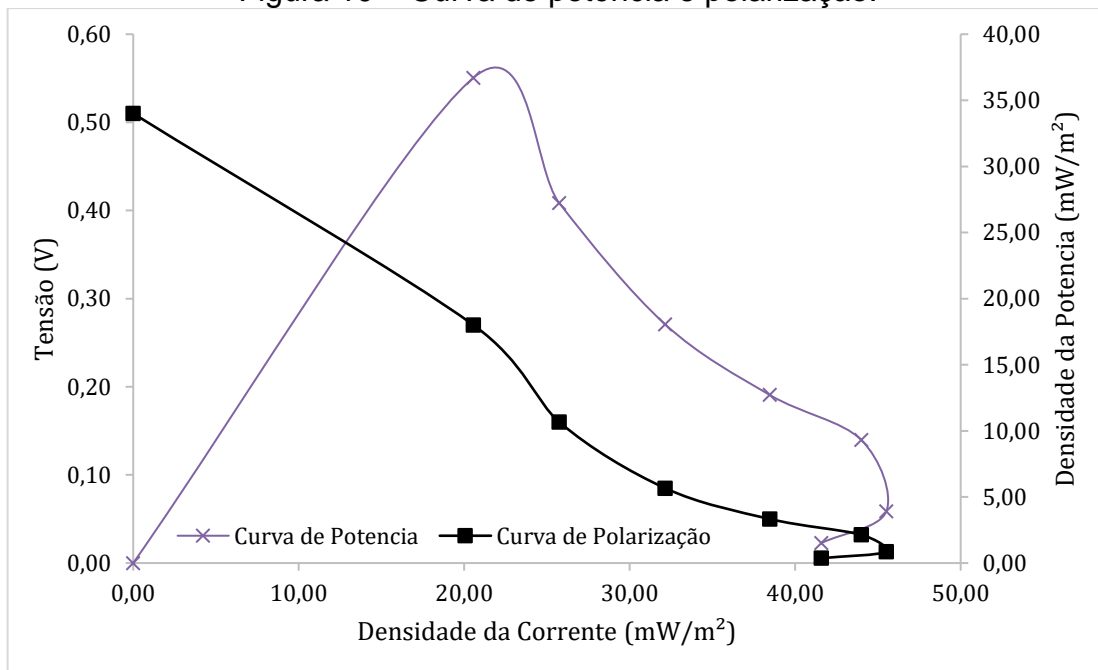
4 RESULTADOS

4.1 PARÂMETRO ELETROQUÍMICOS

A CCM operado com um resistor externo (CCM-R) foi um reator de controle para comparação com cenários de extração de energia. A tensão máxima obtida pelo CCM-R foi de 0,280 V, e a corrente máxima foi de 0,28 mA, correspondendo a uma densidade de corrente máxima de 135 mA/m³.

A potência máxima pode ser extraída no ponto máximo de potência. Neste ponto específico, uma maior taxa de transferência de elétrons e as maiores atividades eletroativas das bactérias são alcançadas (Lobo, Wang e Ren, 2017). A partir das curvas de polarização, o MPP ocorreu em tensão igual a 0,270 V (Figura 10). Portanto, ajustamos o circuito de coleta de energia para $V = 0,270$ V.

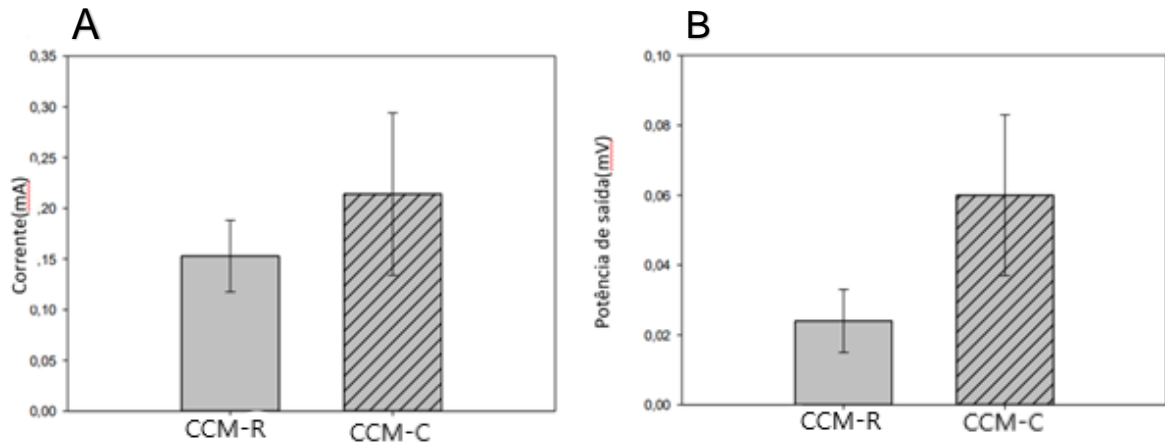
Figura 10 – Curva de potência e polarização.



Fonte: Acervo LARA

O melhor desempenho obtido com o cenário de extração ativa de energia pode ser observado na Figura 11, e pode ser explicado por vários motivos. O cenário de colheita controla a tensão do sistema para ser constante. Em comparação com cenários resistivos, gera um mecanismo para estabilizar os potenciais redox mais próximos do potencial anódico desejado (Lobo, Wang e Ren, 2017). Dessa forma, o biofilme eletroativo necessita entregar os elétrons necessários para manter a condição imposta pelo circuito elétrico.

Figura 11 - Corrente média (A) e potência média de saída (B) em CCM-R (CCM acoplada ao resistor) e CCM-C (CCM acoplada ao circuito elétrico).



Fonte: Acervo LARA.

Além disso, a CCM-C poderia armazenar a energia elétrica em baterias recarregáveis, enquanto nenhuma energia era armazenada nos reatores da CCM-R, pois era dissipada como calor no resistor externo. Um efeito direto do carregamento da bateria na CCM-C, é o aumento da tensão e corrente no sistema, isso se explica pelo fato do sistema usar a curva de polarização para trabalhar no MPP, obtendo o máximo de extração durante o funcionamento.

Somado a isso, com o carregamento de uma bateria com a energia extraída do sistema, se torna uma opção a reutilização dessa energia para o funcionamento do próprio sistema, garantindo um melhor balanço energético. Ademais, vale ressaltar que essas baterias se tornariam um produto passível de aplicação comercial, ou seja, é uma opção ter uma rentabilidade de um subproduto desse sistema de tratamento.

4.2 TRATAMENTO DE EFLUENTE

A CCM-R e a CCM-C obtiveram uma eficiência de remoção de 27,38% e 27,80% de remoção de DQO, respectivamente (Tabela 1). De acordo com a Resolução da CONSEMA Nº 182 publicada em 2021, do qual estabelece as diretrizes para os padrões de lançamento de esgotos domésticos de sistemas de tratamento públicos e privados, afirma que o parâmetro de lançamento de DQO contido em efluentes residuais para estuários, lagoas e lagunas, devem variar entre 150-210 mg/L, logo, para que o tratamento do efluente utilizado esteja dentro do parâmetro de lançamento, seria necessária uma eficiência de tratamento de DQO entre 77,21% e 68,1%.

Tabela 1 – Características do afluente e efluente.

Parâmetros	Unidade	Afluente	CCM-R	CCM-C
DQO	mg/L	658.40 ± 18.82	470.30 ± 11.30	477.40 ± 21.15
NH ₄ ⁺ -N	mg/L	47.18 ± 4.18	45.26 ± 2.81	46.03 ± 6.05
PO ₄ ³⁻ -P	mg/L	6.31 ± 0.43	6.70 ± 0.65	6.81 ± 0.40
TN	mg/L	51.73 ± 2.44	48.73 ± 2.02	46.04 ± 2.99
Alcalinidade	mg/L	396.83 ± 29.89	633.33 ± 47.14	595.56 ± 50.67
pH	-	7.42 ± 0.48	8.03 ± 0.38	7.89 ± 0.30
Condutividade	mS/cm	1.40 ± 0.03	1.37 ± 0.03	1.33 ± 0.04
DO	mg/L	4.27 ± 1.18	0.65 ± 0.26	0.65 ± 0.33
Temperatura	°C	25.10 ± 1.76	26.23 ± 0.59	27.24 ± 1.39

Com isso, o tratamento do efluente em ambos os casos é insuficiente para de localizar dentro da legislação vigente, visto que a CCM-R e a CCM-C obtiveram uma eficiência de 27,38% e 27,80% de remoção de DQO respectivamente. Logo, é necessário adicionar outras etapas de tratamento para remover o DQO remanescente e garantir a qualidade dos corpos hídricos.

Diversos trabalhos apontam a utilização de biofiltros, Wetlands, filtração por membrana, entre outros, para posterior tratamento do efluente e atingir elevado nível de tratamento, e simultâneo aproveitamento energético (Sorgato, 2023). Rossi *et al*, (2022) desenvolveram uma CCM acoplado a um sistema de filtragem com carvão ativado, promovendo uma remoção de cerca de 91% de DQO, 90% de produtos químicos e 99% de bactérias no sistema combinado. Somado a isso, Villaseñor *et al*. (2013) analisaram o tratamento de efluentes doméstico através de um Wetland atuando como uma CCM simultaneamente, alcançando um alto potencial de tratamento em efluentes com uma baixa taxa de carga orgânica no efluente final.

Os resultados indicam a ineficiência da remoção de nutrientes, como nitrogênio amoniacal e fósforo (Tabela 1). Para uma remoção eficiente de amônia, é necessário o contato com o ar para que ocorra a nitrificação e ambiente anaeróbio para desnitrificação. Sendo assim, a falta de remoção de nitrogênio amoniacal é explicada devido a CCM ser um sistema exclusivo de tratamento anaeróbio. Esse cenário também evidencia a necessidade de aplicação de um sistema complementar de tratamento. Para o fósforo, sua remoção também requer uma alternância de ambientes anaeróbio e aeróbio. Portanto, por ser um sistema anaeróbio como já citado não foi possível alcançar a remoção, necessitando de etapas adicionais.

Quanto a eficiência coulômbica, devido ao funcionamento da CCM-C se basear no ponto MPP, o modo de colheita ativa levou a uma eficiência coulômbica maior, aumentando aproximadamente 2,45 vezes, de 2,48 ± 0,66% em CCM-R para

6,07 ± 0,70% em CCM-C. Com o gerenciamento da taxa de transferência de elétrons do biofilme, o sistema de extração ativa poderia coletar mais elétrons (Lobo, Wang e Ren, 2017; Mei *et al.*, 2022). Esse controle é interessante, pois significa maior eficiência de conversão de substrato orgânico em energia e tratamento mais rápido de águas residuais (LU *et al.*, 2019), além de significar uma recuperação de uma parte da energia gasta para o tratamento.

5 CONCLUSÃO

O presente projeto de iniciação tecnológica avaliou a operação de uma CCM alimentada com efluente sintético acoplada a um sistema de coleta de energia e bateria, para aproveitamento energético da eletricidade gerada durante o tratamento de efluentes.

Como apresentado no tópico 4.2, em relação ao tratamento do efluente, não foi obtido um resultado satisfatório para adequar-se a norma vigente de lançamento. Entretanto, o sistema mostrou-se eficiente nas condições de pesquisa apresentadas em decorrência dos aspectos de funcionamento pré-determinados, visto que, não seria possível a remoção de certos compostos. Assim sendo, sugere-se a ação de etapas de tratamento posteriores a CCM.

Somado a isso, com a utilização do método de coleta ativa de energia, evidenciou-se um melhor aproveitamento e recuperação da energia produzida pelo sistema, uma vez que a CCM acoplada ao resistor somente dissipa energia. Além disso, o sistema proposto proporcionou um aumento da eficiência coulômbica de 2,45 vezes em relação a CCM-R, um aspecto satisfatório pois como já citado no tópico 4.2, representa uma maior conversão de substrato orgânico em energia.

Em relação à minha experiência como bolsista nesse projeto foi no mínimo gratificante, mesmo apesar dos problemas que aparecerem com o desenvolvimento de um projeto científico, contribuir diariamente para um inovador método de tratamento de efluente, e pude aprofundar meus conhecimentos acerca do desenvolvimento de uma CCM, abrangendo a importância de alguns parâmetros como a eficiência coulômbica, incrustação da membrana e análise da comunidade microbiana.

Somado a isso, tive a oportunidade de adentrar em diversos outros projetos, como reatores anaeróbios e CCM de câmara dupla, enriqueceu e contribuiu substancialmente para o meu desenvolvimento e progresso dentro da Engenharia

Sanitária e Ambiental. Foi através dos estudos e análises diárias que percebi o quanto as CCMs são importantes para modernizar o método de tratamento atual.

Além disso, aprendi na prática como é o desenvolvimento de um projeto científico, destacando que durante esse período, tive treinamento de escrita acerca de projetos científicos, abrangendo desde a pesquisa em banco de dados até o desenvolvimento de trabalhos. Além disso, trabalhei de forma direta com a realização de análises relacionado ao projeto, como DQO, amônia, turbidez, ortofosfato, OD, temperatura, pH, alcalinidade entre outros parâmetros.

REFERÊNCIAS

BIRD, H. *et al.* Pilot-scale Microbial Fuel Cells (MFCs): A meta-analysis study to inform full-scale design principles for optimum wastewater treatment. **Journal of Cleaner Production**, v. 346, p. 131227, 20 abr. 2022.

DEGRENE, N. *et al.* Electrical energy generation from a large number of microbial fuel cells operating at maximum power point electrical load. **Journal of Power Sources**, v. 205, p. 188–193, 1 maio 2012.

DO, M. H. *et al.* 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, 15 out. 2018.

DU, Z.; LI, H.; GU, T. A state of the art review on microbial fuel cells: A promising technology for wastewater treatment and bioenergy. **Biotechnology Advances**, v. 25, n. 5, p. 464–482, 1 set. 2007.

FLIMBAN, S. G. A. *et al.* Overview of recent advancements in the microbial fuel cell from fundamentals to applications: Design, major elements, and scalability. **Energies**, v. 12, n. 17, 3 set. 2019.

HE, Z. *et al.* An upflow microbial fuel cell with an interior cathode: Assessment of the internal resistance by impedance spectroscopy. **Environmental Science and Technology**, v. 40, n. 17, p. 5212–5217, 1 set. 2006.

IDRIS, S. A. *et al.* Electricity generation from the mud by using microbial fuel cell. **MATEC Web of Conferences**, v. 69, 2 ago. 2016.

KUMAR, S. S. *et al.* Microbial fuel cells (MFCs) for bioelectrochemical treatment of different wastewater streams. **Fuel**, v. 254, p. 115526, 15 out. 2019a.

_____. Microbial fuel cells (MFCs) for bioelectrochemical treatment of different wastewater streams. **Fuel**, v. 254, p. 115526, 15 out. 2019b.

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.

LOGAN, B. E. *et al.* Microbial fuel cells: Methodology and technology. **Environmental Science and Technology**, v. 40, n. 17, p. 5181–5192, 2006a.

_____. Microbial fuel cells: Methodology and technology. **Environmental Science and Technology**, v. 40, n. 17, p. 5181–5192, 1 set. 2006b.

LU, L. *et al.* Active harvesting enhances energy recovery and function of electroactive microbiomes in microbial fuel cells. **Applied Energy**, v. 247, p. 492–502, 1 ago. 2019.

MEI, X. *et al.* The interplay of active energy harvesting and wastewater organic loading regulates fermentation products and microbiomes in microbial fuel cells. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 183, 1 ago. 2022.

MEYLANI, V. *et al.* Biodiversity in microbial fuel cells: Review of a promising technology for wastewater treatment. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 11, n. 2, p. 109503, 1 abr. 2023.

NAN, S. *et al.* Does globalization change the renewable energy consumption and CO₂ emissions nexus for OECD countries? New evidence based on the nonlinear PSTR model. **Energy Strategy Reviews**, v. 44, p. 100995, 1 nov. 2022.

NGUYEN, H. D.; BABEL, S. Insights on microbial fuel cells for sustainable biological nitrogen removal from wastewater: A review. **Environmental Research**, v. 204, 1 mar. 2022.

NIMJE, V. R. *et al.* Microbial fuel cell of *Enterobacter cloacae*: Effect of anodic pH microenvironment on current, power density, internal resistance and electrochemical losses. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 36, n. 17, p. 11093–11101, 1 ago. 2011.

OBILEKE, K. C. *et al.* Microbial fuel cells, a renewable energy technology for bio-electricity generation: A mini-review. **Electrochemistry Communications**, v. 125, p. 107003, 1 abr. 2021.

PANNELL, T. C. *et al.* Effect of fed-batch vs. continuous mode of operation on microbial fuel cell performance treating biorefinery wastewater. **Biochemical Engineering Journal**, v. 116, p. 85–94, 15 dez. 2016.

PARK, Y. *et al.* Complete nitrogen removal by simultaneous nitrification and denitrification in flat-panel air-cathode microbial fuel cells treating domestic wastewater. **Chemical Engineering Journal**, v. 316, p. 673–679, 15 maio 2017.

PRATHIBA, S.; KUMAR, P. S.; VO, D. V. N. Recent advancements in microbial fuel cells: A review on its electron transfer mechanisms, microbial community, types of substrates and design for bio-electrochemical treatment. **Chemosphere**, v. 286, p. 131856, 1 jan. 2022a.

RABAEY, K. *et al.* Biofuel cells select for microbial consortia that self-mediate electron transfer. **Applied and Environmental Microbiology**, v. 70, n. 9, p. 5373–5382, set. 2004.

RABAEY, K.; VERSTRAETE, W. Microbial fuel cells: Novel biotechnology for energy generation. **Trends in Biotechnology**, v. 23, n. 6, p. 291–298, jun. 2005.

RADOUANI, F. *et al.* Evolution and interaction of microbial communities in mangrove microbial fuel cells and first description of *Shewanella fodinae* as electroactive bacterium. **Bioelectrochemistry**, v. 153, p. 108460, 1 out. 2023.

ROSSI, R. *et al.* Pilot scale microbial fuel cells using air cathodes for producing electricity while treating wastewater. **Water Research**, v. 215, p. 118208, 15 maio 2022.

SILVA FILHO, M. T. DA. **Fundamentos de Eletricidade**. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

SORGATO, Ana Carla. **CÉLULA A COMBUSTÍVEL MICROBIANA: OPERAÇÃO EM DIFERENTES TEMPOS DE DETENÇÃO HIDRÁULICA E EXTRAÇÃO DE ENERGIA ATIVA**. 2022. 1 v. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

SOUZA, E. *et al.* 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.

VILLASEÑOR, J. *et al.* Operation of a horizontal subsurface flow constructed wetland – Microbial fuel cell treating wastewater under different organic loading rates. **Water Research**, v. 47, n. 17, p. 6731–6738, 1 nov. 2013.

YAQOOB, A. A. *et al.* Outlook on the role of microbial fuel cells in remediation of environmental pollutants with electricity generation. **Catalysts**, v. 10, n. 8, 1 ago. 2020.

YONG, Y. C. *et al.* Increase of riboflavin biosynthesis underlies enhancement of extracellular electron transfer of *Shewanella* in alkaline microbial fuel cells. **Bioresource Technology**, v. 130, p. 763–768, 1 fev. 2013.

ZHANG, F. *et al.* Long-term performance of liter-scale microbial fuel cells treating primary effluent installed in a municipal wastewater treatment facility. **Environmental Science and Technology**, v. 47, n. 9, p. 4941–4948, 7 maio 2013.

ZHONG, Liuxiang *et al.* Power recovery coupled with sulfide and nitrate removal in separate chambers using a microbial fuel cell. *Biochemical Engineering Journal*, v. 124, p. 6-12, ago. 2017.

WWF - WWF Brasil. Disponível em: <<https://www.wwf.org.br/overshootday/>>.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES SOBRE O SANEAMENTO. Diagnóstico dos Serviços de água e Esgotos – 2016. Brasília: SNSA/MCIDADES, 2019.