

AVALIAÇÃO DO EFEITO DA LUMINOSIDADE EM BIOCELULAS COMBUSTÍVEIS MICROBIANAS DE CERÂMICA COM MUSGOS SPHAGNUM UTILIZANDO UM CÁTODO DE BAIXO CUSTO A BASE DE HIDROGEL DE FE-N-C

Maria Isabela Alves Antunes

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Avaré – São Paulo

Gustavo Pio Marchesi Krall Ciniciato

Prof. Dr.

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Avaré – São Paulo

RESUMO

O texto discute a crescente demanda por energia elétrica e a necessidade de fontes sustentáveis. A utilização de combustíveis fósseis tem gerado impactos ambientais significativos, como a emissão de gases de efeito estufa. As células a combustível surgem como uma solução eficiente e limpa, mas enfrentam desafios como custos elevados e sensibilidade a contaminantes. As biocélulas a combustível, usando catalisadores biológicos, apresentam uma alternativa mais sustentável e econômica. Apesar de seus benefícios, as biocélulas ainda enfrentam limitações quanto à eficiência e durabilidade.

Palavras-chave: Células a combustível. Biocélulas a combustível.

1 INTRODUÇÃO

A energia é um dos pilares fundamentais para o desenvolvimento social. A crescente interconexão global e a diversidade de dispositivos eletrônicos têm impulsionado uma demanda cada vez maior por energia elétrica. No Brasil, o consumo nacional de energia elétrica atingiu 46.314 GWh em fevereiro de 2024, registrando uma alta de 8,0% em comparação ao mesmo mês de 2023. Esse valor representa o quarto maior consumo mensal de toda a série histórica, iniciada em 2004. Nesse contexto, as tecnologias emergentes voltadas para a produção de energia renovável e limpa tornam-se cada vez mais relevantes.

As usinas tradicionais têm utilizado predominantemente combustíveis fósseis para a geração de energia elétrica ao longo de décadas. A queima desses combustíveis em larga escala resulta em impactos ambientais significativos, como a emissão de grandes quantidades de gases de efeito estufa (GEE), a degradação da camada de ozônio, o agravamento do aquecimento global, o derretimento acelerado das calotas polares e o aumento do nível dos oceanos (SANTOS et al., 2023). Esses efeitos destacam a urgência de transição para fontes de energia mais sustentáveis.

Diante desses desafios, a busca por fontes alternativas de energia tem se intensificado, com o objetivo de diversificar a matriz energética global, sobretudo, minimizar os impactos ambientais associado a produção de energia. A agenda 2030 da ONU, por meio do Objetivos de Desenvolvimento Social

Sustentável (ODS) 7, destaca como plano de ação garantir o acesso confiável, sustentável moderno e a preço acessível à energia para todos (ONU, 2015).

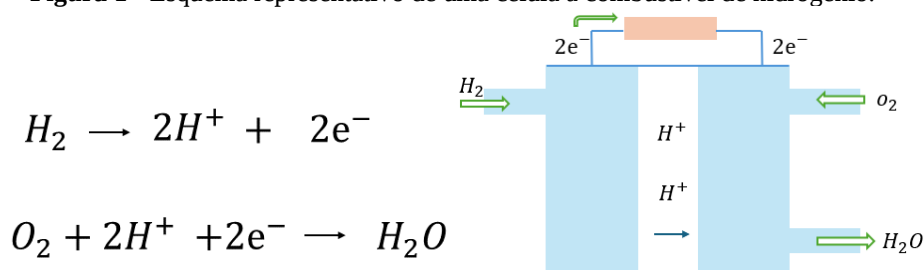
Embora as fontes de energia renovável, como eólica, solar, geotérmica e maremotriz, desempenhem um papel cada vez mais importante no fornecimento de energia sustentável para residências, elas enfrentam limitações em aplicações que demandam mobilidade ou operação em locais fora da rede elétrica. Essas tecnologias, embora eficazes para grandes instalações, nem sempre são viáveis para dispositivos portáteis ou sistemas isolados. Nesse cenário, as células a combustível emergem como uma solução inovadora e prática, capazes de converter reações químicas em eletricidade de maneira eficiente e sustentável, superando algumas das barreiras das fontes renováveis tradicionais.

2 CÉLULAS COMBUSTÍVEIS

As células a combustível podem ajudar a reduzir nossa dependência de combustíveis fósseis e diminuir as emissões prejudiciais a atmosfera, uma vez que as células de combustível teoricamente têm maiores eficiências elétricas em comparação com os motores de calor. Esta tecnologia consiste na conversão de energia química em energia elétrica, operando de maneira semelhante às pilhas e baterias presente no cotidiano da sociedade, ou seja, um par de reações de oxirredução produzindo corrente elétrica com energia elétrica suficiente para abastecer equipamentos eletrônicos portáteis. No entanto, há uma diferença, já que, enquanto na pilha ou bateria o combustível e oxidante são armazenados dentro do sistema, nas células a combustíveis (CaC) os reagentes podem ser adicionados externamente (Carrette et al., 2001).

Células a combustíveis são um sistema de conversão de energia que tem como princípio de funcionamento a combustão eletroquímica de um combustível e a redução eletroquímica de um oxidante. Na sua configuração básica, uma célula a combustível consta de dois eletrodos, cuja composição depende do tipo de célula, separado por um eletrólito que possibilita condução iônica e conectado por meio de um circuito externo, que possibilita condição elétrica. Os eletrodos são expostos a um fluxo de gás ou líquido para suprir os reagentes, sendo o combustível e o oxidante (Wendt et al., 2000). Um esquema de uma célula a combustível de hidrogênio é representado na Figura 1.

Figura 1 - Esquema representativo de uma célula a combustível de hidrogênio.



Fonte: Autoria própria, 2025.

As células a combustível são classificadas adotando-se o eletrólito como critério de referência. Assim, destacam-se as células de ácido fosfórico, alcalinas de eletrólito polimérico sólido, de carbono fundidos, e de óxidos sólidos (Ticianelli e Gonzalez, 1988).

As primeiras aplicações das CaCs consistiram no programa espacial norte-americano no qual os veículos espaciais utilizavam como combustível o hidrogênio puro. As aplicações terrestres desse sistema começaram a acontecer pelo advento da crise do petróleo em 1973 (Gonzalez, 2000).

Quando é usado o hidrogênio como combustível os subprodutos da reação são o calor e a água pura, o que significa que a célula a combustível pode ser vista como tendo uma tecnologia de zero emissões. A conversão direta da energia e a inexistência de movimento mecânico no interior da pilha pode conduzir a sistemas altamente seguros e de longa duração. Entretanto, o que dificulta o uso das células a combustível atualmente é o elevado custo dos materiais nobres que constituem o catalizador. Além disso, a produção de hidrogênio que recorre ao uso intensivo de energia e deriva muitas vezes de combustíveis fósseis (Santos, 2004). Ademais, é necessário que esteja livre de certos contaminantes nitrogenados e sulfurosos, geralmente presentes quando o hidrogênio é produzido pela reforma de biogás. Esses contaminantes, ao entrarem em contato com o catalisador de uma célula que contém platina em sua composição, acabam envenenando a superfície desse metal nobre, fazendo com que ele deixe de funcionar.

Nesse contexto, as células a combustível oferecem diversas vantagens, como a geração limpa de energia e a eficiência em aplicações específicas. No entanto, sua implementação ainda se mostra inviável devido aos altos custos e à sensibilidade a contaminantes, que podem comprometer o desempenho dos catalisadores. Diante dessas limitações, as biocélulas a combustível surgem como uma alternativa promissora, aproveitando processos biológicos que já ocorrem naturalmente para produzir energia de maneira mais sustentável e econômica.

3 BIOCÉLULAS COMBUSTÍVEIS DE SOLO

Devido aos desafios enfrentados pelas células a combustível convencionais, as células a combustível biológicas têm despertado um interesse crescente e recebido mais atenção. Diferente das células a combustível, as biocélulas a combustível são um dispositivo que pode empregar tantas enzimas mobilizadas, denominada célula de biocombustível enzimática (BCE) quanto microrganismos, conhecida como célula de biocombustível microbiana (BCM) como catalisador em vez dos tradicionais catalisadores de metais nobres (Neto e Andrade, 2013).

Os catalisadores biológicos para as biocélulas a combustível não apresentam as limitações econômicas e a disponibilidade dos materiais nobres como o caso da platina, uma vez que descoberto um microrganismo ou enzima capaz de oxidar os substratos e transferir elétrons para os eletrodos com alta eficiência sua demanda é capaz de suprir toda necessidade e dependência dos metais nobres (Gomes, 2011).

Outra vantagem ao uso desses catalizadores é vasta gama de combustíveis que podem ser utilizados e baixa purificação exigida (Shukla, 2004).

Há grandes diferenças no uso de biocélulas combustíveis enzimáticas (BCE) e microbianas (BCM), principalmente em termos de aplicação, eficiência e durabilidade. Biocélulas a combustível enzimáticas demonstraram ter maiores densidades de corrente e potência, mas são limitadas pela oxidação incompleta do combustível, além disso as enzimas apresentam menor período de atividade 7-10 dias, consequentemente tendo que ser repostas (Cooney, 2008), enzimas são sensíveis a mudanças no pH e temperatura (Hanson, 2021). Por outro lado, o BCM oferece maior estabilidade e resistência às mudanças ambientais, tornando-se uma alternativa mais durável (Cooney, 2008). Muitos microrganismos podem oxidar completamente seu combustível (tipicamente, lactato e glicose), mas algumas biocélulas a combustível microbianas empregam resíduos animais como combustível, enquanto outras ainda coletam carboidratos de solos arenosos. Contudo, as BCM ainda são limitadas por baixas densidades de corrente e potência. Nessas células, um biofilme microbiano sobre o eletrodo pode produzir corrente elétrica de forma contínua, desde que sejam mantidas condições mínimas para a sobrevivência dos microrganismos, permitindo a regeneração natural do sistema.

Dando destaque as BCM, o funcionamento de um bioeletrodo em uma BCM acontece devido a transferência de elétrons envolvidos no metabolismo do microrganismo em contato com o eletrodo. Na evolução os organismos vivos se utilizaram do processo anaeróbico ao longo de milhões de anos, fazendo uso de vários métodos para reduzir compostos para seu metabolismo celular. Tais bactérias eram provavelmente capazes de usar diferentes tipos de aceptores de elétrons (Mesquita, 2016). Entre elas, existiam aquelas que eram capazes de transferir elétrons para fora da célula, diretamente para o meio externo, chamadas de bactérias exoeletrogênicas (Logan, 2008), o que permite o seu uso em células microbiológicas de combustível, pois é possível se estabelecer o contato eletroquímico com o eletrodo (Logan e Regan, 2006). A troca de elétrons entre a bactéria e o eletrodo se dá através de três mecanismos: transferência direta, transferência mediada e nanofios ou pili (Schröder, 2007).

A transferência direta de elétrons (TED) ocorre através de um contato físico da membrana celular bacteriana ou de uma organela de membrana com o ânodo da célula de combustível, sem envolver o uso de espécies redox difusionais na transferência de elétrons da célula para o eletrodo (Schröder, 2007).

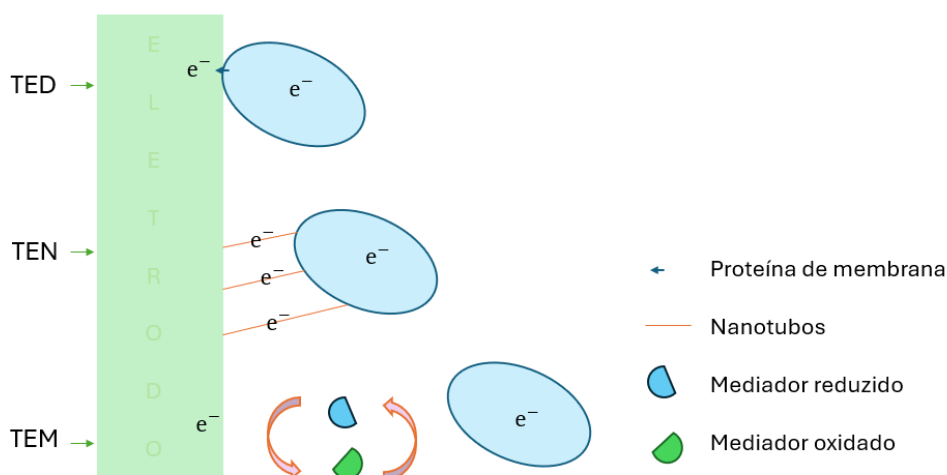
Alguns microrganismos têm a capacidade de desenvolver extensões de sua parede celular (nanofios), esta extensão tem capacidade de comunicar eletroquimicamente com o meio externo a célula, consequentemente aumentando a área superficial de contato com o eletrodo e a transferência de elétrons, além disso tem a função de aderência a superfícies. Nanofios são estruturas que fazem parte do microrganismo. Foram identificadas em cepas de *Geobacter sulfurreducens* e *Shewanella oneidensis*, que faziam

conexão entre a bactéria e o eletrodo por (Gorby, 2006). Esse mecanismo possibilita uma transferência de elétrons de uma bactéria para o eletrodo sem haver a necessidade de mediadores (Schröder, 2007).

Para aqueles microrganismos que não possuem capacidade TED ou TEN, há a possibilidade de haver a transferência eletrônica mediada (TEM), que utiliza de mediadores para transportar elétrons. Mediadores são compostos químicos que, quando adicionados ao sistema, promovem reações reversíveis de oxirredução, tornando possível a troca de elétrons entre a bactéria e o eletrodo. O composto é absorvido pela bactéria na sua forma oxidada e passa no interior da mesma para a forma reduzida, captando os elétrons e transportando-os para o exterior da célula até o encontro com o eletrodo, onde volta à sua forma oxidada, realizando esse procedimento de maneira cíclica até o consumo total do substrato existente pelo micro-organismo (Teleken, 2013).

Um esquema dos mecanismos de transferência eletrônica em BCM pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 - Mecanismos de transferência eletrônica numa biocélula a combustível microbiana. De cima para baixo: Transferência eletrônica direta TED, transferência eletrônica por nanofios TEN e transferência eletrônica mediada TEM.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Compreender esses mecanismos de transferência eletrônica das células bacterianas para os eletrodos é de extrema relevância para o desenvolvimento de materiais anódicos que tornem a transferência o mais eficiente possível (Park e Zeikus, 2003).

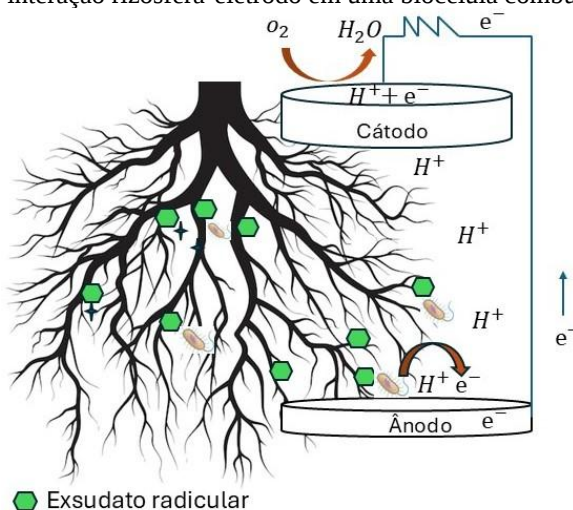
Existem uma diversidade de trabalhos envolvendo BCMs registradas na literatura. Destacando-se a utilização de culturas mistas de microrganismos exoeletrogênicos, encontrados em vários ambientes anaeróbicos que permitem a troca de elétrons com o meio externo, essa cultura mista popularmente usa-se lodo de estação de tratamento de água (Gul, 2021), sedimento do fundo do mar (Moraes, 2016) e microrganismos de solo (Oliveira, 2019).

A rizosfera refere-se à região do solo influenciada pelas raízes, com máxima atividade microbiana. O crescimento das plantas é controlado substancialmente pelo solo na região radicular, um ambiente que a

própria planta ajuda a criar e qual a atividade microbiana associada exerce diversas atividades benéficas. Em termos de diversidade genética, o solo é o local de inúmeras e variadas populações de todos os tipos de microrganismos (Zilli et al., 2003). Todas essas características fazem com que a parte radicular da planta deva conter uma população considerável de microrganismos anaeróbios e exoeletrogênicos, o que faz dele um ambiente promissor para construção de BCM.

Biocélulas a combustível envolvendo a rizosfera tem sido estudada a pouco tempo. Seu funcionamento consiste em um anodo inserido dentro de um substrato próximo a rizosfera, e de um cátodo em contato com o oxigênio atmosférico como mostra a Figura 3.

Figura 3 - Esquema representativo interação rizosfera-eletródo em uma biocélula combustível com microrganismos de solo.



Fonte: Autoria Própria, 2024.

Microrganismos exoeletrogênicos presente na rizosfera podem converter a matéria orgânica de exsudatos radicular por exemplo, em elétrons e prótons e CO_2 . Estudos envolvendo BCM com a rizosfera de briófitas é de conhecimento da literatura, ou também conhecido como Célula Combustível Fotossintética, uma vez que na realidade a força motriz de todo o processo é a luz solar (Shlosberg, 2023). A utilização de BCM envolvendo microrganismos do solo em contato com musgos é interessante, pois, além de serem plantas pioneiras, os musgos podem prosperar em ambientes úmidos e com alta concentração salina, o que é ideal para uma biocélula a combustível microbiana, apesar de não ter raiz definida, os musgos apresentam estruturas semelhantes com as mesmas funções, denominada rizoide. Um estudo recente provou que uma BCM de musgo *Physcomitrella*, foi capaz de gerar $2,5 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$, potência suficiente para funcionar pequenos dispositivos (Bombelli, 2016).

Recentemente, um estudo realizado por nosso grupo demonstrou que a rizosfera de musgos *Sphagnum* produziu compostos eletroquimicamente ativos em um protótipo de biocélula a combustível de cerâmica, utilizando um eletrólito ideal de KCl 100 mL (Filho, 2023). Inicialmente, os experimentos

investigaram a influência do tempo de iluminação sobre as BCMs e os resultados comprovaram que sim, o tempo de iluminação é a força motriz do sistema já que é essencial para que ocorra a fotossíntese. Agora, o foco está no desenvolvimento de um catalisador à base de hidrogel Fe-N-C incorporado ao cátodo, visando aprimorar o desempenho eletroquímico dessa tecnologia. Assim, torna-se essencial a realização de novos experimentos para avaliar o impacto desse catalisador na eficiência da biocélula.

4 CÁTODOS FORMADOS POR HIDROGEL DE FE-N-C

As biocélulas de combustível representam uma evolução tecnológica baseada nos princípios das células de combustível convencionais. Com isso, muitas das técnicas amplamente utilizadas em células a combustível acabam sendo adaptadas para biocélulas. No entanto, a aplicação de metais nobres, como a platina, enfrenta desafios críticos, incluindo seu alto custo e a vulnerabilidade à inativação por compostos nitrogenados e sulfurosos muitas vezes presentes em substratos complexos utilizados em biocélulas microbianas.

Uma alternativa amplamente estudada para substituir a platina em biocélulas a combustível é o uso de materiais carbonáceos ativados e grafite como cátodo. Esses materiais, além de apresentarem baixo custo, possuem uma área superficial específica elevada, proporcionando um maior número de sítios ativos para a Reação de Redução de Oxigênio (RRO). No entanto, o mecanismo de redução do oxigênio nesses materiais geralmente segue uma via de transferência de 2 elétrons, o que pode resultar em uma interação energética fraca com a superfície do carbono (Deng et al., 2010). Essa característica leva a uma alta polarização por ativação, reduzindo significativamente o desempenho da biocélula a combustível microbiana (BCM).

Atualmente, os eletrocatalisadores mais promissores para RRO são baseados em catalisadores de carbono “co-dopado” de nitrogênio e metal de transição inseridos em uma matriz de carbono que será descrito como M-N-C (Oliveira, 2018). Diante disso, as operações baseadas em carbono dopado com metais de transição e nitrogênio (M-N-C) surgem como uma alternativa altamente promissora. Esses materiais combinam as propriedades condutoras do carbono com a atividade catalítica de metais como Mn, Co, Ni, Cu e Fe, sendo este último o elemento metálico mais eficiente na coordenação para reações de redução de oxigênio (RRO). Isso ocorre devido ao seu efeito sinérgico, que combina uma alta concentração de sítios ativos com uma estrutura porosa, facilitando o transporte de massa e melhorando o desempenho catalítico (Mineva et al., 2019). Além disso, estudos recentes corroboram que o Fe apresenta uma configuração eletrônica favorável para a adsorção e ativação de moléculas de O₂, o que é crucial para a eficiência da RRO (Lefèvre et al., 2020).

Segundo Genesan e colaboradores, os átomos de ferro tem um papel importante na constituição de sítios ativos, produzindo alta atividade para RRO quando comparado aos eletrocatalisadores preparados sem a adição de Fe como metal de transição.

Apesar da variedade de metais (M) que podem ser utilizados como catalisadores, os materiais do tipo Fe-N-C destacam-se por sua combinação de baixo custo e alta funcionalidade. Yang e colaboradores (2019) demonstraram um procedimento acessível para sintetizar esses catalisadores, utilizando géis de quitosana como fonte de nitrogênio (N) e cloreto férrico (FeCl_3) como fonte de íons Fe. Os resultados mostraram um aumento de 33% na geração de energia elétrica em comparação com sistemas que não utilizavam o catalisador. Inspirados por esses avanços, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver cátodos contendo catalisadores de hidrogéis Fe-N-C e incorporá-los a uma célula eletroquímica e realizar experimentos eletroquímicos.

5 OBJETIVOS DO TRABALHO

Os objetivos da etapa deste projeto consistem em realizar estudos eletroquímicos em biocélulas a combustível microbianas utilizando musgos *Sphagnum* e o efeito da inserção do catalisador de hidrogel Fe-N-C na camada difusora de gás. Para isto, cátodos contendo catalisadores de hidrogéis Fe-N-C foram desenvolvidos e incorporados à célula eletroquímica

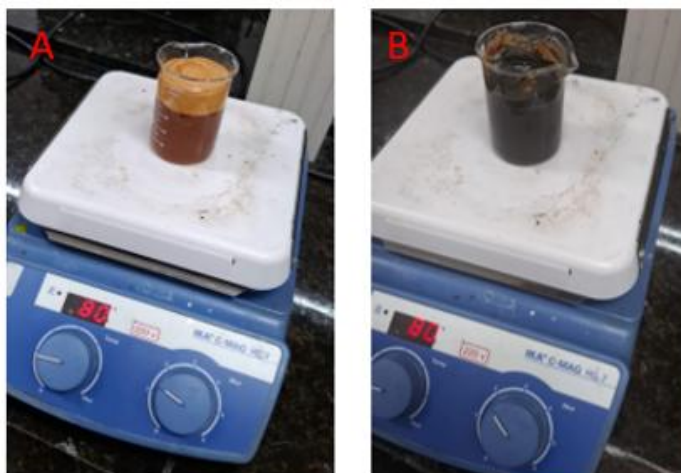
Experimentos de voltametria cíclica foram realizados em meia célula, com a finalidade de se obter informações sobre processos superficiais nos eletrodos por meio de análises dos intervalos de potenciais nos quais ocorrem os processos de redução e oxidação, tanto de do ânodo em contato com o solo, quanto do cátodo contendo a camada difusora de gás

6 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

6.1 SÍNTESE DO CATALISADOR HIDROGEL FE-N-C

Para a síntese do catalisador de Fe-N-C foi seguido a metodologia de Yang e colaboradores (2019), por pirólise direta em atmosfera inerte. Inicialmente, 1g de FeCl_3 anidro foi dissolvido e agitado por 10 minutos em 75 mL de água deionizada. Em seguida, 2 g de quitosana foram adicionados gradualmente à solução de FeCl_3 sob agitação constante, mantendo a temperatura a 80°C por 4 horas. Após finalizada a mistura de quitosana com FeCl_3 , 6 g de carbono *black* foram adicionados à esta, que continuou sob agitação a 80°C por mais 4 horas, conforme mostrado na Figura 4.

Figura 4 - Mistura de quitosana na solução de FeCl_3 a 80°C sob agitação (A) e com carbono black adicionado ao hidrogel de quitosana-Fe (III) (B).



Fonte: Autoria própria, 2025.

A mistura foi então transferida para a estufa de secagem a vácuo, no qual foi mantido a 60°C e pressão de 300 torr por um período de 12 horas (Figura 5).

Figura 5 - Hidrogel de quitosana-Fe (III) e carbono em estufa de secagem a vácuo a 300



Fonte: Autoria própria, 2025.

Após a secagem, o material foi submetido a um tratamento térmico em um forno de atmosfera inerte a 800°C por 15 minutos, sob atmosfera de gás nitrogênio, utilizando rampa de aquecimento de 10°C.s^{-1} . A estufa foi purgada com argônio por 30 minutos antes do início do procedimento e seguiu com argônio sendo adicionado durante todo aquecimento (Figura 6).

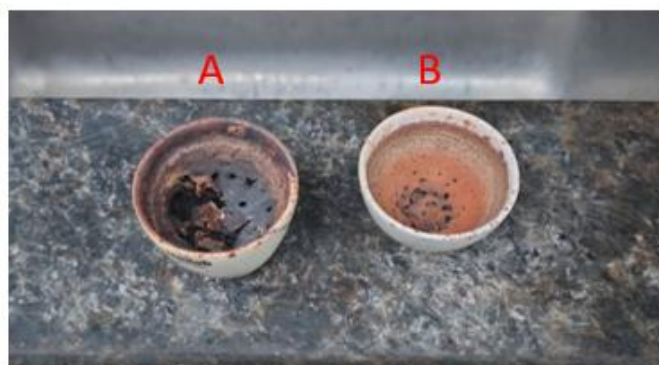
Figura 6 - Aquecimento da mistura forno de atmosfera inerte.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Com o pó resultante foi dissolvido em uma solução de HCl 0,01 M por um período de 1 hora, a fim de remover possíveis impurezas. Em seguida, o material foi lavado por 5 vezes com água deionizada para remover completamente resíduos. Por fim, o material obtido foi secado novamente em uma estufa de secagem a vácuo a 60° C e 300 torr por um período de 6 horas. Esse produto denominado catalizador de hidrogel Fe-N-C (figura, 7) foi utilizado para tratamento do tecido de carbono utilizado como cátodo.

Figura 7 - Catalizador hidrogel de Fe-N-C após tratamento térmico em atmosfera inerte (A) contendo carbono black e (B) sem carbono black.



Fonte: Autoria própria, 2025.

6.2 PREPARAÇÃO DOS CÁTODOS CONTENDO CAMADA DIFUSORA DE GÁS

Para preparar a camada difusora de gás foi utilizado tecido de fibra de carbono UC 225 IM (e-composites), cortado em formato de retângulo com uma área de aproximadamente 180 cm², com intuito de revestir as faces do copo de cerâmica de aproximadamente 200 mL. Para isso, foi seguido o procedimento de Santoro e colaboradores (2011). Nesse viés, foi preparado uma mistura de 0,7 g de partículas de carbono black (Vulcan XC-72R), 9,1 mL de água destilada e 21,5 mL de Triton X100 (Sigma -Aldrich), e misturado por 1 hora. Logo após, foi adicionado 1 g de PTFE (60% de emulsão, Sigma-Adrich), e misturado por mais

30 minutos, com isso foi adicionado no banho de ultrassom por 15 minutos, seguido de mistura por agitação por mais 5 minutos, repetindo 2 vezes tanto o banho de ultrassom quanto a agitação. Em seguida, mais 2,75g de carbono *black* foi adicionado e misturado por mais 1 hora. Com isso, a mistura foi adicionada em uma das faces do tecido de fibra de carbono que foi aquecido entre duas placas por 30 minutos na temperatura de 280 C e depois 343 C por 2,5 horas. Após o resfriamento, esses tecidos de carbono foram trançados com fio de níquel cromo AWG 26, a face tratada foi adicionada na cerâmica de modo que ficasse em contato com o ar atmosférico enquanto a face não tratada ficasse em contato com a cerâmica, esses fios de níquel foram trançados para auxiliar no contato do tecido com a cerâmica e para realizar as medidas com o multímetro.

Para os cátodos contendo hidrogel de Fe-N-C, o mesmo procedimento foi realizado, substituindo o carbono black com o pó obtido segundo procedimento descrito no subcapítulo 6.1.

6.3 CONSTRUÇÃO DA BIOCÉLULA A COMBUSTÍVEL MICROBIANA

As biocélulas foram construídas utilizando copos de cerâmica de aproximadamente 200 mL, sendo essas cerâmicas revestidas tanto internamente quanto externamente por tecido de fibra de carbono UC 225 IM (e-composities). O tecido de fibra de carbono interno, em contato com o solo funcionará como o ânodo e o tecido de carbono tratado com camada difusora de gás com ou sem o hidrogel Fe-N-C como cátodo

No construtivo ambos os revestimentos tratados ficaram em contato com o oxigênio atmosférico como mostra a Figura 8, este tratamento com diferentes componentes (camada difusora de gás e hidrogel Fe-N-C incorporado a camada difusora de gás) foi a variável modificada no experimento. Para ambos os revestimentos interno e externo, foi traçado fio de níquel cromo a fim de dar estabilidade para o tecido na cerâmica e permitir as conexões elétricas para realização as medidas eletroquímicas.

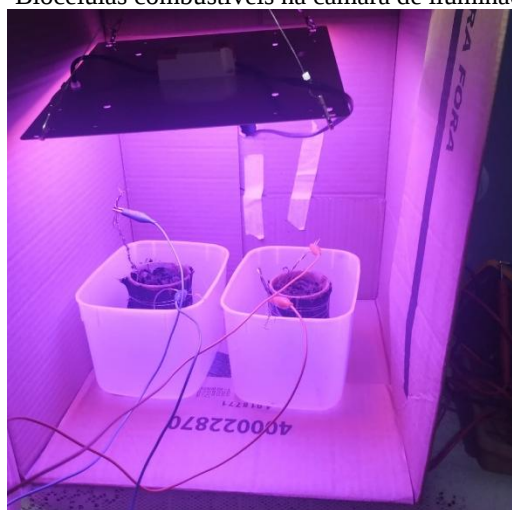
Figura 8 - Cátodo já inserido nas BCMs, da esquerda para direita: camada difusora de gás e catalizador de hidrogel Fe-N-C incorporado a camada difusora de gás.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Nesse viés, foi adicionado em cada cerâmica 240 g de solo argiloso não cultivado anteriormente, com as seguintes características: matéria orgânica, MO 6 g/dm³; pH, em CaCl₂ - 4,2; Presina – 5 mg/dm³; Potássio – 0,4; Cálcio-3; Magnésio-1; CRC-26%, Hidrogênio+Alumínio – 22; v%- 16 (FCA- UNESP, 2024), coletado no Instituto Federal de São Paulo - Avaré, nas seguintes coordenadas -23.078095,-48.927018. Logo após foi inserido 15 g de musgo *Sphagnum* em cada biocélula, estes musgos já estavam desenvolvidos, portanto já apresentavam coloração verde. Em seguida, foi adicionado 100 mL de solução de KCl 100 mM como eletrólito e levada para a câmara de iluminação parcial, como mostra a Figura 9.

Figura 9 - Biocélulas combustíveis na câmara de iluminação parcial.



Fonte: Autoria própria, 2025.

6.4 EXPERIMENTOS ELETROQUÍMICOS

Para construção das curvas de polarização que é um dos principais parâmetro para medir a eficiência da biocélula, foi efetuado continuamente medições de potencial com o instrumento multímetro, variando 15 diferentes resistores com resistências (R) de 1 MΩ, 560 KΩ, 470 KΩ, 220 KΩ, 100 KΩ, 56 KΩ, 10 KΩ, 1KΩ, 560 Ω, 330 Ω, 100 Ω, 56 Ω, 47 Ω, 10 Ω e 1 Ω, sempre medindo e esperando a estabilização por 2 minutos para obter a diferença de potencial (V) entre o cátodo e o ânodo. Posteriormente, pela lei OHM (equação 1) foi obtido o valor de corrente (i) e com o auxílio do Excel foi possível esboçar os gráficos, consequentemente visualizando as curvas polarização, além disso foi plotado a máxima potência (P) (equação 2).

$$V = R \cdot i \quad (\text{Equação 1})$$

$$P = V \cdot i \quad (\text{Equação 2})$$

Os experimentos de meia célula foram realizados utilizando um potenciostato AUTOLAB PGSTAT302. Para isto, o eletrodo de trabalho (conexão vermelha) foi conectado diretamente ao ânodo

dentro da célula de cerâmica, uma placa de platina foi adicionada ao solo (conexão preta) e um eletrodo de referência de Ag/AgCl foi adicionado ao solo (conexão azul) próximo ao ânodo (Figura 10). O eletrólito foi solução de KCl 0,1M. Todas as conexões foram avaliadas com multímetro para certificar que não estava havendo contato entre os eletrodos para evitar curto-circuitos e *overload* de potencial.

Figura 10 – Experimentos em meia célula para célula eletroquímica desenvolvida. O ânodo como eletrodo de trabalho, uma placa de platina como contra eletrodo e um eletrodo de referência de Ag/AgCl foi utilizado para as medidas de potencial.



Fonte: Autoria própria, 2025.

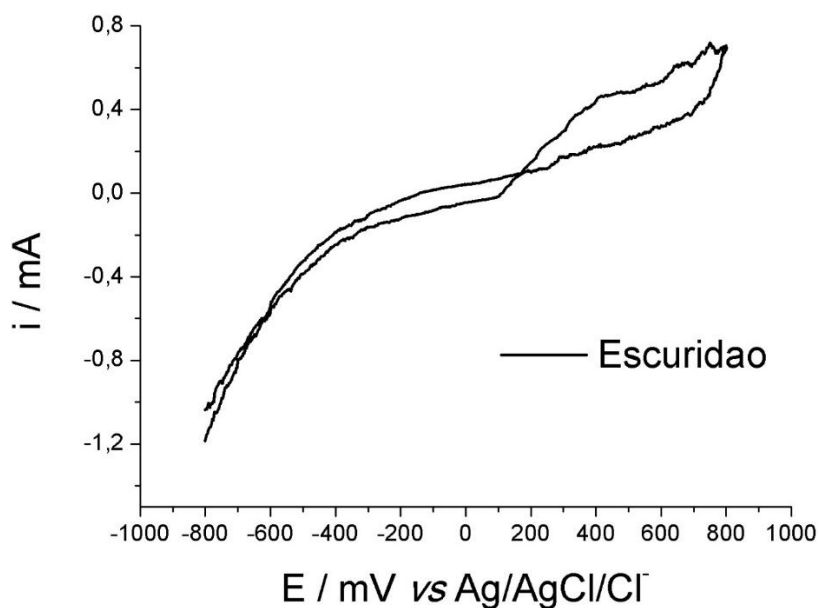
Foram conduzidos experimentos de voltametria cíclica na faixa de potencial de 800 a -800 mV vs Ag/AgCl, iniciando-se a partir do potencial de circuito aberto e sob velocidade de varredura a 10 mV/s. Os ciclos de varredura foram repetidos até que se atingisse o estado pseudoestacionário, caracterizado pela ausência de alterações significativas no voltamograma.

7 RESULTADOS E DISCUSSÕES

7.1 EXPERIMENTOS DE MEIA CÉLULA COM BIOÂNODO SOB ILUMINAÇÃO E ESCURIDÃO

De forma a começar a investigar os processos faradâicos ocorrendo na superfície dos eletrodos em estudos, foram realizados experimentos de meia célula com a célula eletroquímica desenvolvida na etapa parcial. Para isto, o tecido de carbono adicionado na região interna da célula eletroquímica foi conectado como eletrodo de trabalho a um potenciostato. Experimentos de voltametria cíclica foram realizados com a célula eletroquímica em iluminação parcial e em completa escuridão utilizando uma folha de platina como contra eletrodo e os potenciais foram medidos com relação a um eletrodo de referência de Ag/AgCl. A Figura 11 apresenta os experimentos realizados sob escuridão total.

Figura 11 – Voltamograma cíclico do ânodo na célula eletroquímica em cerâmica. Experimentos realizados no solo contendo musgos *Sphagnum* com solução de 100 mM de KCl a 10 mV/s sob escuridão. O 10º ciclo é apresentado.

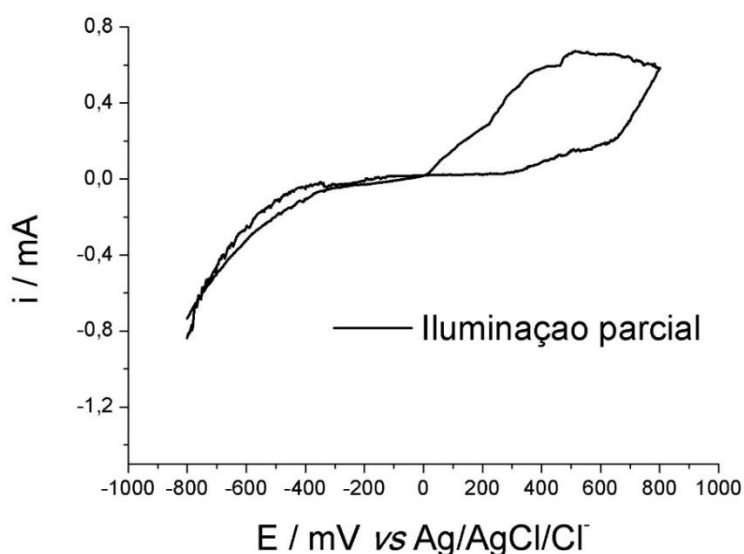


Fonte: Autoria própria, 2025.

Os experimentos de voltametria cíclica com a célula eletroquímica de cerâmica contendo solo e musgos *Sphagnum* e solução de KCl em ambiente de escuridão apresenta um voltamograma com considerável resistividade, observada pela inclinação de todo o voltamograma. Um pico de oxidação iniciando em torno de 100 mV vs Ag/AgCl é observado, porém sem um pico bem definido, como é esperado por um processo contendo todo consumo do reagente na superfície do eletrodo.

A mesma célula eletroquímica foi deixada sob condição de iluminação por 1 hora e os experimentos eletroquímicos de voltametria cíclica foram novamente realizados (Figura 12).

Figura 12 – Voltamograma cíclico do ânodo na célula eletroquímica em cerâmica. Experimentos realizados no solo contendo musgos *Sphagnum* com solução de 100 mM de KCl a 10 mV/s sob iluminação. O 10º ciclo é apresentado.



Fonte: Autoria própria, 2025.

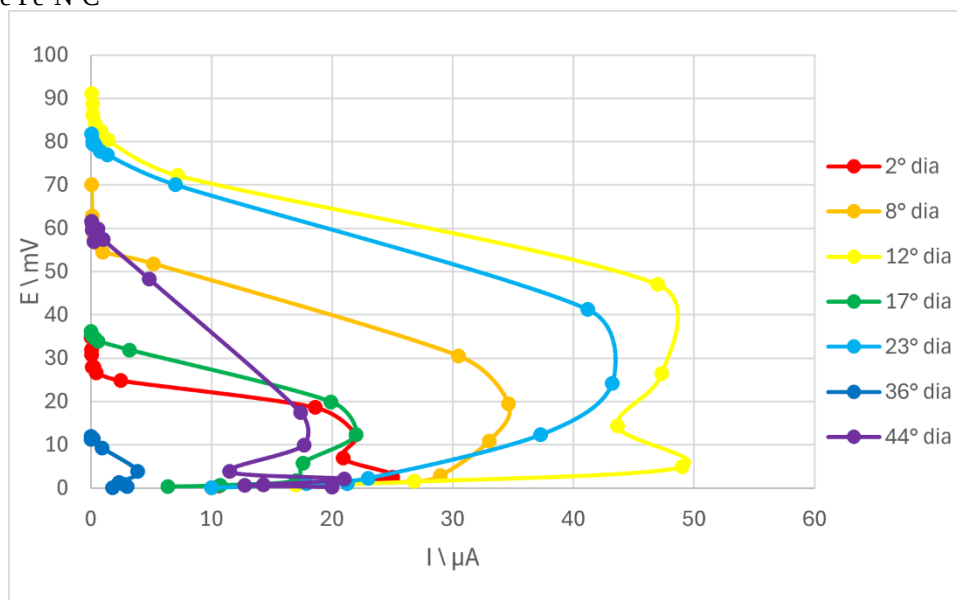
Observando o voltamograma apresentado na Figura 12, com a célula eletroquímica sob iluminação, é possível observar o início do pico de oxidação iniciando próximo de 0 mV vs Ag/AgCl. Diferente do observado na Figura 11 com o experimento sob iluminação, o voltamograma da Figura 12 sob iluminação indica um processo faradáico envolvendo uma quantidade de carga muito maior, visto que a área sob a curva é consideravelmente maior. Além disso, é observado um leve desvio do início do processo de oxidação em 50 mV.

Os experimentos de voltametria cíclica sugerem que há produção de compostos eletroativos que estão oxidando na superfície do eletrodo. A iluminação oferece um efeito positivo nestes compostos, que são produzidos em maior quantidade do que o mesmo em condição de escuridão, convergindo com os resultados obtidos na etapa parcial deste projeto.

7.2 EXPERIMENTOS ELETROQUÍMICOS CÁTODO TRATADO COM CATALISADOR HIDROGEL FE-N-C

As curvas de polarização referente ao experimento eletroquímico da biocélulas combustíveis microbianas de cerâmica com musgos *Sphagnum* utilizando cátodo de baixo custo a base de hidrogel de Fe-N-C pode ser visualizado na Figura 13.

Figura 13 - curvas de polarização biocélulas combustíveis microbianas de cerâmica com musgos *Sphagnum* utilizando cátodo a base de hidrogel de Fe-N-C



Fonte: Autoria própria, 2025.

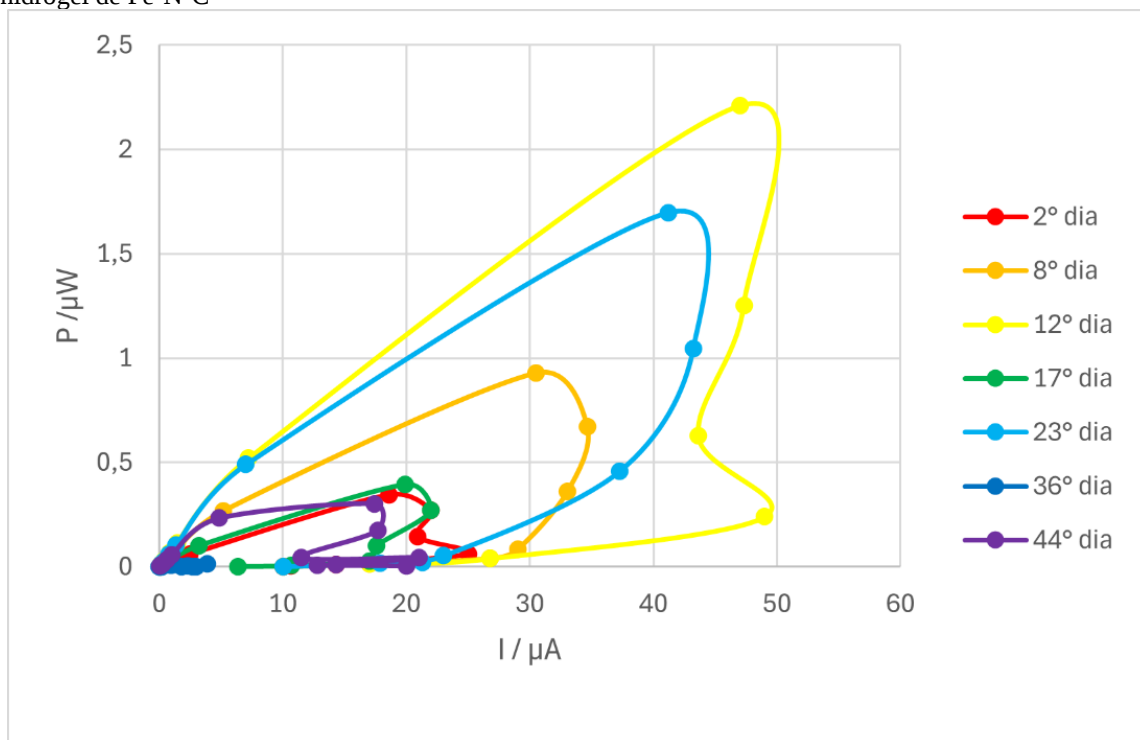
Cada curva de polarização representado acima tem uma cor correspondente a um dia específico da medição, conforme indicado na legenda à direita. No 2º dia (vermelho), os valores de potencial de circuito aberto foram de 30,7 mV, com a corrente máxima de 25 μA . No 8º dia (laranja), a curva se expande

significativamente em relação ao 2º dia, atingindo um potencial de circuito aberto máximo de 70 mV e corrente máxima de cerca de 34,6 μA . Na medição do 12º dia (amarelo-claro), foi o dia que a biocélula registrou o maior desempenho, com potencial chegando a 91,1 mV, enquanto a corrente elétrica atingiu 49 μA . Decorridos 17 dias (verde), a curva decaiu ficando parecida com o início do experimento, os valores de potencial de circuito aberto atingiram 36,1 mV, com a corrente alcançando cerca de 21,9 μA . No 23º dia (azul-claro), foi o dia que foi registrado o segundo maior desempenho no período mensurado, com potencial chegando a 81,7 mV e corrente próximo de 43 μA . No 36º dia (azul-escuro), foi o dia em que o dispositivo registrou o menor desempenho, com potencial máximo de 11,3 mV e corrente de 3,9 μA .

Por fim, no 44º dia (roxo), a curva apresenta uma elevação significativa se comparado ao 36º dia apresentando valores semelhantes ao 8º dia, com o potencial máximo sendo de 61,6 mV, e corrente de 21 μA .

Com esses dados, foram realizados os cálculos para determinar a máxima potência gerada em cada dia, conforme mostrado na Figura 14.

Figura 14 - Curvas de potência, biocélulas combustíveis microbianas de cerâmica com musgos *Sphagnum* utilizando um cátodo a base de hidrogel de Fe-N-C



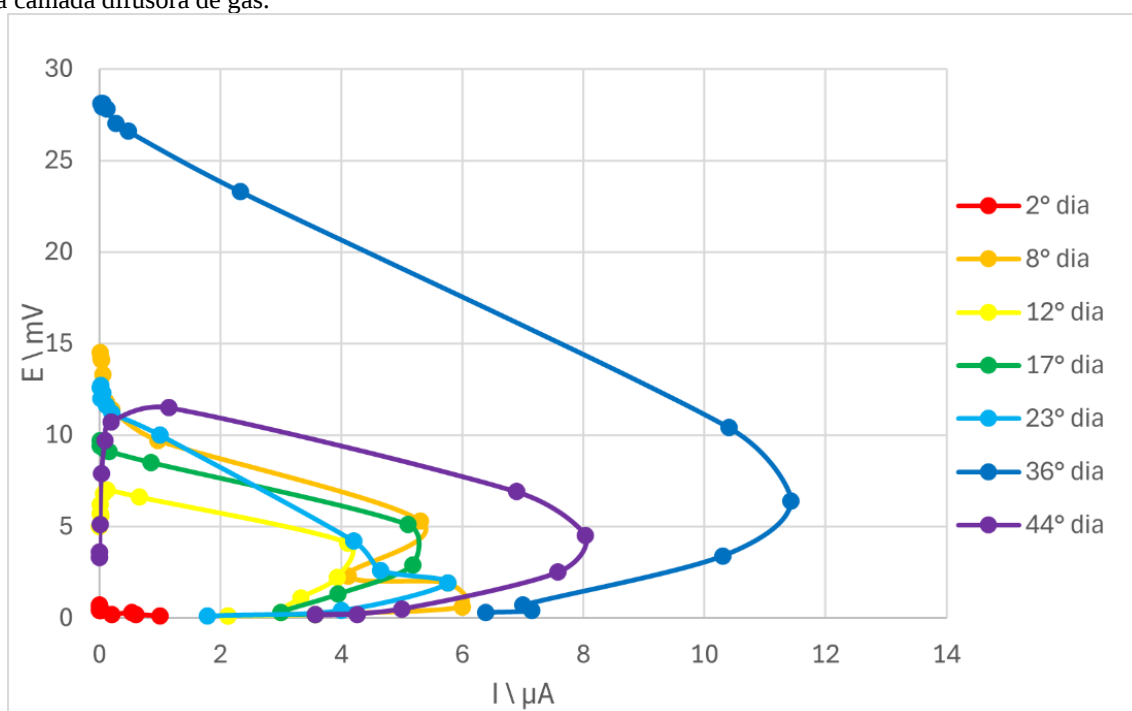
Fonte: Autoria própria, 2025.

Como pode ser observado na imagem acima, o maior potencial registrado ocorreu com 12 dias de experimento, atingindo 2,209 mW, seguido do 23º dia, com uma potência máxima de 1,69 mW. Esses foram os dois dias em que a biocélula a combustível microbiana de musgo *Sphagnum*, com cátodo contendo hidrogel Fe-N-C, apresentou seu melhor desempenho.

7.3 EXPERIMENTOS ELETROQUÍMICOS CÁTODO COM CAMADA DIFUSORA DE GÁS

As curvas de polarização referente ao experimento eletroquímico da biocélulas combustíveis microbianas de cerâmica com musgos *Sphagnum* com cátodo contendo a camada difusora de gás pode ser observado na Figura 15.

Figura 15 – Curvas de polarização da biocélulas combustíveis microbianas de cerâmica com musgos *Sphagnum* com cátodo contendo a camada difusora de gás.



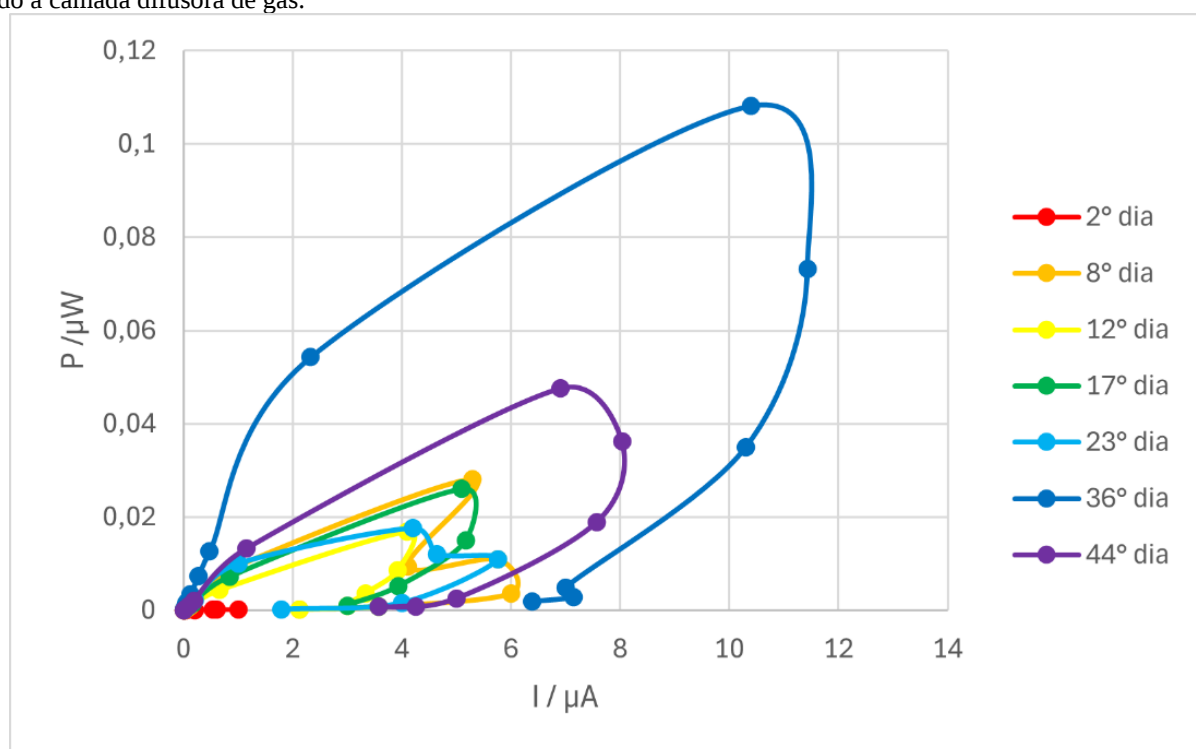
Fonte: Autoria própria, 2025.

Cada curva de polarização representada acima possui uma cor correspondente a um dia específico da medição, conforme indicado na legenda à direita. No 2º dia (vermelho), os valores de potencial de circuito aberto variaram entre 0,1 mV e 0,7 mV, com uma corrente máxima de 0,6 μA , sendo esse os valores mais baixos registrados durante o período experimental. No 8º dia (laranja), a curva apresentou uma expansão significativa em relação ao 2º dia, atingindo um potencial de circuito aberto máximo de 14,5 mV e uma corrente máxima de cerca de 6 μA . Na medição do 12º dia (amarelo-claro), registou um declínio se comparado com 8º dia, com o potencial chegando a 6,6 mV e a corrente elétrica atingindo 4,1 μA . Após 17 dias de experimento (verde), houve uma pequena elevação no desempenho se comparado com a medida anterior, com a curva retornando a um padrão de medidas semelhante ao 8º dia, o potencial de circuito aberto atingiu 9,7 mV, enquanto a corrente alcançou cerca de 5,2 μA . No 23º dia (azul-claro), as medidas se mantiveram próximas as medidas anteriores. Já no 36º dia (azul-escuro), o dispositivo apresentou seu melhor desempenho, com um potencial máximo de 28,1 mV e uma corrente de 11,4 μA . Por fim, no 44º dia

(roxo), houve uma queda significativa em relação ao 36° dia, com o potencial máximo registrado de 11,5 mV, com uma corrente de 8 μ A.

Com base nos dados obtidos, os cálculos para determinar a potência máxima gerada em cada dia foram realizados (produto entre tensão e corrente), cujos resultados estão apresentados na Figura 16.

Figura 16 - Curvas de potência da biocélulas combustíveis microbianas de cerâmica com musgos *Sphagnum* com cátodo contendo a camada difusora de gás.



Fonte: Autoria própria, 2025.

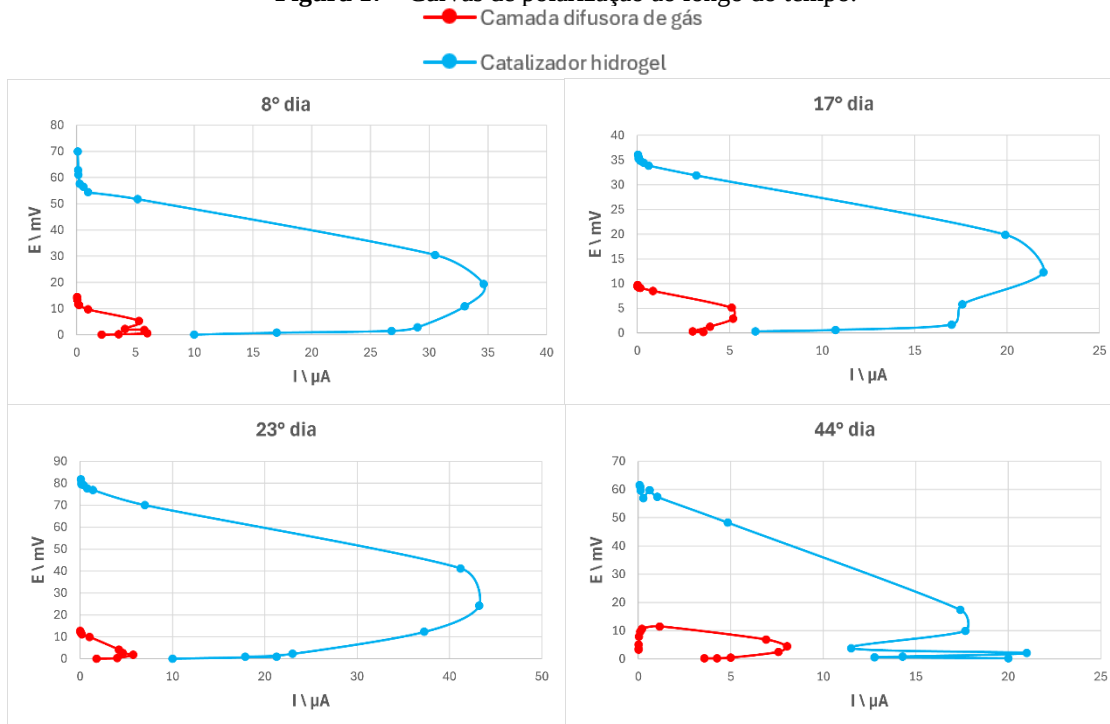
Observando os dados plotados no gráfico acima (figura 16), os dias que apresentaram maior potência é proporcional aos dias dos melhores desempenhos em relação aos valores das curvas de polarização. Logo, a maior potência registrada foi ao 36° dia com 0,10816 mW, seguido do 44° dia com 0,04761 mW.

7.4 EVOLUÇÃO TEMPORAL DE CORRENTE MÁXIMA, POTENCIAL DE CIRCUITO ABERTO E POTÊNCIA MÁXIMA

As curvas de polarização desempenham um papel fundamental na avaliação do desempenho eletroquímico de uma biocélula microbiana (BCM), uma vez que ilustram a relação entre a densidade de corrente e o potencial gerado pela célula. Estas curvas fornecem informações valiosas sobre a eficiência energética, as perdas associadas a fenômenos como resistência ôhmica, limitações de transferência de massa ou ativação, e o comportamento dinâmico da célula frente a variações nas condições operacionais. Ao analisar essas curvas, é possível identificar pontos críticos de degradação, otimizar parâmetros de operação e compreender o sistema como um todo.

A seguir, é apresentada a evolução temporal das curvas de polarização das biocélulas a combustível desenvolvidas. A Figura 17 ilustra as variações dessas curvas ao longo do tempo, comparando os cátodos, somente com a camada difusora de gás e com a camada difusora de gás contendo o catalizador a base de hidrogel de Fe-N-C.

Figura 17 - Curvas de polarização ao longo do tempo.



Fonte: Autoria própria, 2025.

Como é possível observar na Figura 17, as curvas de polarização exibiram comportamentos distintos em relação aos valores de potencial de circuito aberto e densidade de corrente ao longo do tempo, além de evidenciarem diferenças significativas entre os tratamentos aplicados aos cátodos. Essas diferenças persistiram durante todo o experimento, destacando-se a BCM de musgo *Sphagnum* com tratamento adicional de hidrogel de Fe-N-C, que apresentou vantagem significativa em comparação à BCM de musgo *Sphagnum* com camada difusora de gás convencional.

A análise das curvas de polarização comprovou diferenças significativas nos valores de potencial de circuito aberto e densidade de corrente entre os tratamentos aplicados aos cátodos. Essas diferenças se mantiveram ao longo do experimento, destacando-se a biocélula microbiana (BCM) de musgo *Sphagnum* com a adição do hidrogel de Fe-N-C, que apresentou um desempenho superior em relação à BCM com camada difusora de gás convencional. Cada região da curva de polarização fornece informações importantes sobre o funcionamento do sistema, essas regiões se dividem em três a primeira a baixos valores de corrente elétrica, também conhecida como perda por ativação que diz respeito aos maiores valores de potencial em

relação a corrente indicando o quão bem o biocatalizador opera, a segunda região, de valores de corrente intermediários, diz respeito ao metabolismo dos microrganismos, caracterizada por corrente elétrica intermediária e decaimento constante de potencial, e a terceira região de altas correntes, considerada como zona de perda por transporte de massa é causada por limitações construtivas, de forma que falta reagente na superfície eletródica (Gonçalves, 2021).

Em termos gerais, é notório que a inserção do hidrogel de Fe-N-C no cátodo, exerceu um impacto significativo nas curvas de polarização. Isso se deve ao fato que a inserção dessa variável contribuiu positivamente para a reação e redução do oxigênio (RRO), etapa determinante para uma biocélula a combustível, principalmente para mensuração da eficiência do cátodo e do sistema como um todo. Apesar da RRO ser uma reação favorável, sua energia de ativação é alta, por esse motivo a inserção de um catalizador é de extrema importância, que faz com que a RRO seja mais rápida, uma vez que o catalizador auxilia na diminuição dessa energia de ativação, consequentemente o desempenho da BCM com o melhor catalizador é mais vantajoso, como evidencia os resultados.

A base teórica científica existente alinha-se com os resultados obtidos, validando as tendências registradas no sistema eletroquímico. De acordo com Singh et al. (2014), os autores comprovaram a importância do Fe na alta atividade eletrocatalítica quando compararam em testes de célula a atividade e estabilidade dos materiais Fe-N-C e C-N_x, neste trabalho foi comprovado a importância do metal ligante que apresentou atividade superior ao eletrocatalizador de C-N_x. Segundo Ganesan et al. (2014), em seu estudo indicou que o ferro é um componente de sítio ativo, consequentemente aumenta atividade de RRO. Analogamente, Ganesan e Singh observaram o papel fundamental do Fe retido na estrutura como constituinte de sítios ativos e promovem atividade de RRO vantajosa se comparado sem a presença do metal. Logo, é promissor utilizar o ferro como metal de transição- M, além de ser abundante na natureza e de baixo custo.

De acordo com os estudos de WU, Gang et al. (2011), o desempenho dos catalizadores de M-N-C (M- metal de transição, N- nitrogênio e C- carbono) está diretamente relacionado com a estrutura química que é determinada por diversos fatores como condições de síntese, suporte de carbono e estrutura da atmosfera referente ao tratamento térmico. Nessa óptica, alguns estudos sugerem que uma simples síntese por pirólise, devido ao tratamento térmico é produzido nanopartículas de ferro encapsulados com carbono dopado de nitrogênio que segundo Varnell et al. (2016) os sítios protegidos adjacentes às nanopartículas de ferro são responsáveis pela atividade e estabilidade observadas do catalisador.

A metodologia empregada neste trabalho também encontra respaldo teórico nos estudos de Yang et al. (2019), comprovou que a pré-formação do hidrogel de Fe (III)-quitosana produziu uma estrutura relativamente uniforme e porosa, além disso, comprovou-se uma distribuição uniforme de Fe na superfície do catalisador Fe-N-C, sem aglomeração significativa o que pode potencialmente tornar mais sítios

catalíticos acessíveis para a reação de redução do oxigênio (RRO), melhorando assim o desempenho catalítico geral.

Ao comparar a biocélula contendo hidrogel de Fe-N-C com a biocélula controle, que possui apenas a camada difusora de gás convencional, observa-se uma vantagem significativa nas curvas de polarização. Visualmente, ao final do experimento, as BCMs apresentaram diferenças na aparência dos musgos *Sphagnum*. Estudos anteriores deste grupo já demonstraram que o desenvolvimento do musgo está diretamente relacionado ao desempenho eletroquímico, refletindo-se nas curvas de polarização. No caso específico deste experimento, a BCM com hidrogel de Fe-N-C apresentou um acúmulo de solo sobre os musgos como mostra a Figura 18, possivelmente interferindo na absorção de luz e, consequentemente, na fotossíntese.

Figura 17 - BCMs da esquerda para direita, camada difusora de gás convencional, camada difusora de gás com catalizador de hidrogel Fe-N-C



Fonte: Autoria própria, 2025.

No entanto, mesmo com essa adversidade, o desempenho eletroquímico da BCM com hidrogel de Fe-N-C ainda foi superior ao da BCM controle, evidenciando a eficiência do catalisador. A biocélula modificada apresentou maior densidade de potência e eficiência na conversão energética, evidenciando que a introdução do catalisador foi determinante para superar as limitações da RRO. Enquanto a biocélula controle demonstrou restrições na taxa de reação e maior resistência interna, a presença do Fe-N-C garantiu um ambiente catalítico mais ativo e eficiente, tornando essa abordagem altamente vantajosa para aplicações bioeletroquímicas.

8 CONCLUSÕES

Os experimentos de voltametria cíclica nos bioânodos desenvolvidos na etapa parcial indicaram um pico de oxidação sobre a superfície do carbono, que depende da luminosidade sobre a célula. Em escuridão o pico de oxidação é pouco definido e se inicia próximo de 100 mV vs Ag/AgCl. Com a iluminação pode-se observar um pico maior e mais bem definido, com início próximo de 50 mV vs Ag/AgCl, provavelmente resultante dos compostos bioativos produzidos pelo musgo no solo com resultado da mudança de iluminação.

As montagens da BCMs concluem-se que foram bem construídas, uma vez que as curvas de polarização são características das BCMs encontradas na literatura, com as regiões característica.

A BCM com musgo *Sphagnum* incorporada ao catalisador de hidrogel Fe-N-C apresentou desempenho superior, alcançando o maior potencial de circuito aberto de 91,1 mV e uma corrente elétrica de 49 μ A. Em contraste, a BCM com musgo *Sphagnum* e camada difusora de gás obteve valores significativamente inferiores, com um potencial máximo de 28,1 mV e uma corrente de 11,4 μ A. Além disso, ao final do experimento, a BCM com catalisador incorporado foi parcialmente coberta por solo, o que possivelmente afetou a fotossíntese e reduziu seu desempenho. Ainda assim, essa configuração manteve um desempenho superior, evidenciando a eficiência do catalisador de hidrogel Fe-N-C.

REFERÊNCIAS

- BOAS FILHO, M.V. Desempenho bioeletroquímico de microorganismos eficientes e musgos *Sphagnum* em bioânodos de biocélulas combustíveis microbianas para geração de energia limpa. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Biosistemas) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia, campus Avaré, Avaré, 2023.
- BOMBELLI, P.; DENNIS, R.J.; FELDER, F.; COOPER, M.B.; LYER, D.M.R.; ROYLES, J.; HARRISON, S.T.L.; SMITH, A.G.; HARRISON, C.J.; HOWE, C.J. Electrical output of bryophyte microbial fuel cell systems is sufficient to power a radio or an environmental sensor. *Royal Society Open Science*, v. 3, p. 160249, 2016.
- CARRETTE, L.; FRIEDRICH, K.A.; STIMMING, U. Fuel Cells – Fundamentals and Applications. *Fuel Cells*. Disponível em: <[https://doi.org/10.1002/1615-6854\(200105\)1:1<5::AID-FUCE5>3.0.CO;2-G](https://doi.org/10.1002/1615-6854(200105)1:1<5::AID-FUCE5>3.0.CO;2-G)>. Acesso em: 04 ago. 2024.
- COONEY, M.J.; SVOBODA, V.; LAU, C.; MARTIN, G.; MINTEER, S.D. Enzyme catalysed biofuel cells. *Energy & Environmental Science*, v. 1, n. 3, p. 320-337, 2008.
- DENG, Q.; LI, X.; ZOU, K.; LING, A.; LOGAN, B.E. Power generation using an activated carbon fiber felt cathode in an upflow microbial fuel cell. *Journal of Power Sources*, v. 195, n. 4, p. 1130, 2010.
- EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA). Consumo de energia elétrica no Brasil. Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 25 out. 2023.
- GANESAN, Selvarani; LEONARD, Nathaniel; BARTON, Scott Calabrese. Impact of transition metal on nitrogen retention and activity of iron–nitrogen–carbon oxygen reduction catalysts. *Physical Chemistry Chemical Physics*, v. 16, n. 10, p. 4576-4585, 2014.
- GOMES, A.S.O. Desenvolvimento de uma célula a combustível microbiana com culturas puras de *Pseudomonas aeruginosa* em meio de cultura de glicerol. 2011. Dissertação (Mestrado em Físico-química) – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.
- GONÇALVES, M.P. Caracterização da Cac PEM 500 W do Labmater (UFPR-Setor Palotina) Alimentada à H₂: Obtenção da Curva de Polarização. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia de Energia) – Universidade Federal do Paraná, Palotina, 2021.
- GONZALEZ, E.R. Eletrocatalise e Poluição Ambiental. *Química Nova*, v. 23, p. 262, 2000.
- GORBY, Y.A.; YANINA, S.; MCLEAN, J.S.; FREDRICKSON, J.K. Electrically conductive bacterial nanowires produced by *Shewanella oneidensis* strain MR-1 and other microorganisms. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 103, n. 30, p. 11358-11363, 2006.
- GULA, H.; RAZA, W.; LEE, J.; AZAM, M.; ASHRAF, M.; KIM, K. Progress in microbial fuel cell technology for wastewater treatment and energy harvesting. *Chemosphere*, v. 281, p. 130828, 2021.
- HANSON, A.D.; MCCARTY, D.R.; HENRY, C.S.; XIAN, X.; JOSHI, J.; PATTERSON, J.A.; GARCÍA-GARCÍA, J.D.; FLEISCHMANN, S.D.; TIVENDALE, N.D.; MILLAR, A.H. The number of catalytic cycles in an enzyme's lifetime and why it matters to metabolic engineering. *Proceedings of the National Academy of Science*, v. 118, n. 13, p. 1, 2021.

LEFÈVRE, Michel; PROIETTI, Eric; JAOUEN, Frédéric; DODELET, Jean-Pol. Iron-Based Catalysts with Improved Oxygen Reduction Activity in Polymer Electrolyte Fuel Cells. *Science*, v. 324, n. 5923, p. 71-74, 2009. DOI: 10.1126/science.1170051.

LOGAN, B.E.; REGAN, J.M. Electricity-producing bacterial communities in microbial fuel cells. *Trends in Microbiology*, v. 14, n. 12, p. 512-518, 2006.

LOGAN, B.E. *Microbial Fuel Cells*. New Jersey: Wiley & Sons, 2008.

MESQUITA, D.V. Produção de energia elétrica em célula combustível microbiológica com sedimento de dragagem do Porto do Rio Grande. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola de Química e Alimentos, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2016.

MINEVA, T.; MATANOVIC, I.; ATANASSOV, P.; SOUGRATI, M.-T.; STIEVANO, L.; CLÉMANCEY, M.; KOCHER, A.; LATOUR, J.-M.; JAOUEN, F. Understanding active sites in pyrolyzed Fe-N-C catalysts for fuel cell cathodes by bridging density functional theory calculations and ⁵⁷Fe Mössbauer spectroscopy. *ACS Catalysis*, v. 9, p. 9359, 2019.

MORAES, P.S. Produção de energia em célula combustível microbiana de leito fluidizado. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Escola de Química e Alimentos, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande, 2016.

NETO, S.A.; ANDRADE, A.R. New energy sources: the enzymatic biofuel cell. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 24, p. 1891-1912, 2013.

OLIVEIRA, Francisca Elenice Rodrigues de. Síntese e Investigação da Atividade de Eletrocatalisadores Formados por Elementos Abundantes do Tipo MNC para a Reação Redução de Oxigênio. 2018. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

OLIVEIRA, R.L.S. Prospecção de bactérias na microbiota de solos com capacidade de produção de energia. 2019. Monografia (Bacharel em Ciências Ambientais) – Instituto de Ciências do Mar, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 7: Energia limpa e acessível. Disponível em: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/energy/>. Acesso em: 3 ago. 2024.

PARK, D.H.; ZEIKUS, J.G. Improved fuel cell and electrode designs for producing electricity from microbial degradation. *Biotechnology and Bioengineering*, v. 81, n. 3, p. 348-355, 2003.

SANTORO, C.; LEI, Y.; LI, B.; CRISTIANI, P. Power generation from wastewater using single chamber microbial fuel cells (MFCs) with platinum-free cathodes and pre-colonized anodes. *Biochemical Engineering Journal*, v. 62, p. 8-16, 2011.

SANTOS, F.A.C.M.; SANTOS, F.M.S.M. Células de combustível. *Millenium*, n. 29, p. 146-156, 2004.

SANTOS, R.M.; OLIVEIRA, L.P.; COSTA, A.F. Impactos ambientais da geração de energia a partir de combustíveis fósseis. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 12, n. 3, p. 45-60, 2023. Disponível em: <https://www.revistaenergiasrenovaveis.com.br>. Acesso em: 25 out. 2023.

SCHRÖDER, U. Mecanismos de transferência de elétrons anódicos em células de combustível microbianas e sua eficiência energética. *Physical Chemistry Chemical Physics*, v. 9, n. 21, p. 2619-2629, 2007.

SHLOSBERG, Y.; SCHUSTER, G.; ADIR, N. Photosynthetic Fuel Cells: Just an Interesting Concept or a Promise for Future Technology? *Bioelectricity*, v. 5, n. 2, p. 132-138, 2023.

SHUKLA, A.K.; SURESH, P.; BERCHMANS, S.; RAJENDRAN, A. Biological fuel cells and their applications. *Current Science*, v. 87, n. 4, p. 455-468, 2004.

SINGH, Deepika et al. A comparison of N-containing carbon nanostructures (CNx) and N-coordinated iron-carbon catalysts (FeNC) for the oxygen reduction reaction in acidic media. *Journal of Catalysis*, v. 317, p. 30-43, 2014.

TELEKEN, J.T.; SILVA, J.S.; FRAGA, M.F.; OGRODOWSKI, C.S.; SANTANA, F.B.; CARCIOFI, B.A.M. Mathematical modeling of the electric current generation in a microbial fuel cell inoculated with marine sediment. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 34, n. 1, p. 211-225, 2017.

TICIANELLI, E.A.; GONZALEZ, E.R. Células a Combustível: Uma alternativa promissora para a geração de eletricidade. *Química Nova*, v. 12, n. 3, p. 269-270, 1989.

VARNELL, Jason A. et al. Identificação de nanopartículas de ferro encapsuladas em carbono como espécies ativas em catalisadores de redução de oxigênio de metais não preciosos. *Nature Communications*, v. 7, n. 1, p. 12582, 2016.

WENDT, Hartmut; GÖTZ, Michael; LINARDI, Marcelo. Tecnologia de células a combustível. *Química Nova*, v. 23, p. 538-546, 2000.

WU, Gang et al. Carbon nanocomposite catalysts for oxygen reduction and evolution reactions: From nitrogen doping to transition-metal addition. *Nano Energy*, v. 29, p. 83-110, 2016.

WU, Gang et al. Synthesis of nitrogen-doped onion-like carbon and its use in carbon-based CoFe binary non-precious-metal catalysts for oxygen-reduction. *Carbon*, v. 49, n. 12, p. 3972-3982, 2011.

YANG, W.; WANG, X.; ROSSI, R.; LOGAN, B.E. Low-cost Fe-N-C catalyst derived from Fe(III)-chitosan hydrogel to enhance power production in microbial fuel cells. *Chemical Engineering Journal*, v. 380, p. 122522, 2019.

ZILLI, Jerri Édson et al. Diversidade microbiana como indicador de qualidade do solo. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, v. 20, n. 3, p. 391-411, 2003.