

CÉLULAS DE ENERGIA MICROBIANA PARA O ENSINO DE BIOELETRICIDADE, TRANSFERÊNCIA DE ELÉTRONS E ATIVIDADE MICROBIANA

MICROBIAL FUEL CELLS FOR TEACHING BIOELECTRICITY, ELECTRON TRANSFER AND ACTIVITY MICROBIAL

Matheus Henrique Alcântara de Lima Cardozo **1**

Isabel Cristina Braga Rodrigues **2**

Demian Patrick Fabiano **3**

Edson Romano Nucci **4**

Resumo: Células de energia microbiana (CEM) são dispositivos que permitem promover o biotratamento de resíduos e a biogeração de energia elétrica de modo simultâneo por meio da atuação de microrganismos. Considerando a crise energética que tem ganhado força nas últimas décadas e a necessidade de abordar, na educação, formas alternativas de geração de energia – o que pode ser facilitado pela utilização de recursos didáticos –, propõe-se, nesse trabalho, a utilização das CEM para o ensino de bioeletricidade no âmbito da microbiologia. Por meio dessa abordagem, temas como ubiquidade microbiana, microbiologia do solo, respiração celular, geração de bioeletricidade e transferência de elétrons em microbiologia podem ser abordados e desenvolvidos. Assim, o trabalho elaborado permitiu concluir que experimentos práticos com CEM têm, de fato, potencial para ser empregados como um relevante recurso didático para o ensino e discussão da microbiologia.

Palavras-chave: Bioeletricidade. Célula Combustível Microbiana. Recurso Didático. Sustentabilidade.

Abstract: Microbial fuel cells (MFC) are devices that allow simultaneously the biotreatment of waste and the biogeneration of electrical energy through the action of microorganisms. Considering the current energy crisis and the need to address alternative forms of energy generation – which can be facilitated by the use of teaching resources –, this work proposes the use of MFC for teaching bioelectricity and microbiology. Through this approach, topics such as microbial ubiquity, soil microbiology, cellular respiration, bioelectricity generation and electron transfer in microbiology can be addressed and developed. Thus, the work allowed to conclude that practical experiments with MFC have potential to be used as a relevant didactic resource for teaching and discussion microbiology.

Keywords: Bioelectrochemistry. Sustainability. Teaching Resource.

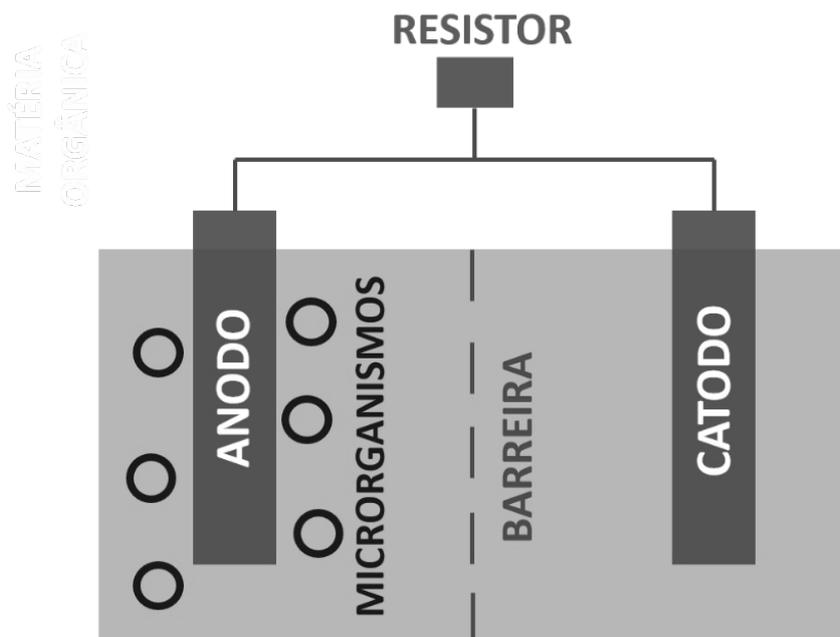
-
- 1** Graduado em Engenharia de Bioprocessos e Mestre em Engenharia Química (pela UFSJ). Atualmente é Doutorando em Engenharia Ambiental (pela UFOP). Lattes: <http://lattes.cnpq.br/7263514643443361>. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0833-7738>. E-mail: matheus,cardozo@ufop.aluno.edu.br
 - 2** Graduada em Farmácia, Farmácia-Bioquímica e Farmácia Industrial e Mestre e Doutora em Engenharia Ambiental (pela UFOP). É professora na Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ). Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4827178059487916>. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5474-6225>. E-mail: isabelbraga@ufsj.edu.br
 - 3** Graduado em Engenharia Química (pela UFU) e em Engenharia de Bioprocessos pela (UFSJ). Mestre em Engenharia Química (pela UFU) e Doutor em Engenharia Química pela (UFSCar). É professor na Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ). Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6746672472192131>. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4292-7715>. E-mail: demian@ufsj.edu.br
 - 4** Graduado em Matemática, Mestre em Engenharia Química e Doutor em Engenharia Química (pela UFSCAR). É professora na Universidade Federal de São João del-Rei (UFSJ). Lattes: <http://lattes.cnpq.br/4274582376583918>. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5904-4732>. E-mail: nucci@ufsj.edu.br

Introdução

Nos anos mais recentes, a tecnologia das células de energia microbiana (CEM) – que são também conhecidas como células combustíveis microbianas (CCM) – surgiu como uma alternativa de interesse, já que esses dispositivos permitem promover, simultaneamente, o biotratamento de resíduos e a biogeração de energia elétrica. Além disso, essa é uma tecnologia que possibilita reduzir o custo operacional de tratamentos de efluentes em comparação com sistemas tradicionais por reduzir o consumo de eletricidade no processo de operação, reforçando sua potencialidade como alternativa sustentável para o tratamento de efluentes (Gude, 2015).

As células de energia microbianas podem ser entendidas como dispositivos eletroquímicos capazes de converter energia química – presente em compostos metabolizáveis – em energia elétrica por meio da atuação de microrganismos que se desenvolvem sobre eletrodos em anaerobiose (Hidalgo *et al.*, 2014). Em geral, a estrutura geral de uma CEM é composta por dois compartimentos, sendo o primeiro deles anaeróbio e contendo um anodo, e o segundo deles aeróbio e contendo um catodo. Esses eletrodos são conectados externamente por um circuito elétrico, mas separados internamente por uma barreira que impede que o gás oxigênio da câmara catódica se difunda para a câmara anódica (Rahimnejad *et al.*, 2015). A Figura 1 apresenta a estrutura geral de uma CEM.

Figura 1. Estrutura geral de uma CEM



Fonte: Cardozo e Nucci (2022).

Pesquisando por estudos envolvendo materiais para a construção das CEM, observa-se que para que possa ser empregado como anodo, um material de interesse deve ser condutor, biocompatível e quimicamente estável. Apesar de alguns tipos de metais poderem ser utilizados como anodos (Tanisho; Kamiya; Wakao, 1989), o material anódico mais versátil é o carbono, se apresentando disponível em configurações diversas como placas, barras, tecido, papel e fibras, por exemplo. Já para ser empregado como catodo, um material deve apresentar alto potencial redox e facilidade em capturar prótons (Lehnen, 2014). Em geral, materiais empregados como anodos podem também ser utilizados como catodos – incluindo, dentre os materiais carbonáceos, haste e papel de carbono, e, dentre os materiais à base de metais, chapas de aço inoxidável, níquel, cobre, ouro e titânio (Zhou *et al.*, 2016; Baudler; Riedl; Schröder, 2014).

O circuito elétrico externo de uma CEM é composto, basicamente, por um fio condutor e uma resistência elétrica e é alocado externamente entre o anodo e o catodo para recuperar, na forma de eletricidade, os elétrons gerados no dispositivo. Ademais, esse elemento pode ser

conectado a um multímetro para medir a corrente elétrica ou a diferença de potencial geradas na CEM e, se esses dados forem armazenados no decorrer do tempo de operação do dispositivo, pode-se realizar uma análise da geração de energia elétrica na CEM (Fung, 2016).

A barreira trocadora de prótons é alocada internamente entre o anodo e o catodo das CEM para restringir a difusão de oxigênio da câmara catódica para a câmara anódica, ao passo que permite que prótons se movam do anodo para o catodo (Lovley, 2006). Teoricamente, qualquer tipo de material poroso e que tenha resistência, inércia química e longevidade suficientes pode ser empregado nessa função. Várias aplicações empregam membranas de troca catiônica para isso (Angioni *et al.*, 2016), porém, devido ao alto custo desses materiais, muitos trabalhos buscam alternativas, incluindo fibras de nylon e vidro, borracha natural, cerâmica e até sacolas biodegradáveis e luvas de laboratório (Ghasemi *et al.*, 2013; Winfield *et al.*, 2014).

Uma célula de energia microbiana pode ser construída sob diferentes configurações: com catodo submerso ou exposto ao ar e em dupla câmara ou câmara única, por exemplo – e essas arquiteturas podem ainda ser associadas com a finalidade de se alcançar desempenho superiores (Marcon, 2011). Além disso, as CEM podem ser operadas de modo contínuo ou em batelada, a depender das características de sua arquitetura e do substrato, dos microrganismos e do tipo de eletrodo empregados (Munoz-Cupa *et al.*, 2021). No caso da operação em batelada, favorece-se o acúmulo de biomassa e a produção de mediadores redox solúveis (Du; Li; Gu, 2007). Ademais, esse modo de operação, quando comparado ao funcionamento contínuo, apresenta a vantagem da maior remoção de demanda química de oxigênio e poluentes como N_2 , devido ao ciclo mais longo e aos tempos de retenção (Ahn; Logan, 2010). Já a operação de modo contínuo apresenta a vantagem do aumento do biofilme de microrganismos atuantes (Rabaey; Verstraete, 2005).

Considerando que as temáticas de sustentabilidade e crise energética têm ganhado destaque e coordenado reflexões econômicas, políticas e sociais nos últimos 50 anos, percebe-se a importância de se desenvolver formas alternativas de obtenção de energia, que incluem a geração de energia por meio de sistemas biológicos (Miranda, 2023). No âmbito dessa discussão, destaca-se a necessidade de, desde a educação básica – e até as etapas subsequentes do percurso educacional –, abordar os conceitos envolvidos nesse tema (Crepalde; Aguiar Junior, 2014). Para essa tarefa, recursos didáticos podem ser utilizados, pois são ferramentas capazes de auxiliar na elucidação do conteúdo ministrado e colaborar com o aumento do interesse dos alunos no tema abordado (Nicola; Paniz, 2017).

Metodologia

Durante o segundo semestre de 2023, buscou-se por informações específicas na bibliografia geral de publicações sobre CEM para realizar uma discussão a respeito da conceitualização e mecanismo de funcionamento desses dispositivos, bem como dos materiais de construção usados em sua construção, sua microbiologia, os processos de transferência de elétrons envolvidos em sua operação e suas aplicabilidades. As buscas foram realizadas, neste período, em bases eletrônicas de materiais científicos por meio dos termos de busca “células de energia microbiana”, “células combustíveis microbianas”, “microbial fuel cells” e “celdas de combustível microbianas”. Além disso, buscou-se informações a respeito de recursos didáticos e de sua importância na trajetória educacional. Por fim, desenvolveu-se uma discussão a respeito de como o funcionamento das CEM pode ser utilizado como um recurso didático – e da relevância dessa atividade – e propôs-se uma metodologia que permitisse aplicar essa tecnologia como ferramenta didática para o ensino dos conceitos envolvidos na geração de bioeletricidade no campo da microbiologia.

Desenvolvimento

A microbiologia é a área da ciência que estuda os microrganismos e suas relações ecológicas com os humanos e outros seres vivos, além das alterações físicas e químicas que podem provocar no meio ambiente. Desse modo, a microbiologia transcende as salas de aula, já que se relaciona

a questões do cotidiano como a saúde e a consciência ambiental. Essa área da ciência, bem como seu estudo, se mostra ainda mais relevante quando se considera que algumas reações bioquímicas fundamentais para a vida só são possíveis por meio da atuação dos microrganismos, que apresentam também grande importância na indústria em atividades como a fabricação de antibióticos, vacinas, alimentos, bebidas e substâncias recombinantes (Tortora; Case; Funke, 2012).

Outro ponto de interesse na microbiologia é o estudo da bioeletricidade, que – nesse ramo da ciência – pode ser entendida como a produção ou propagação de uma corrente elétrica em organismos vivos. Tecnologias eletroquímicas microbianas envolvidas nesse campo de pesquisa têm se mostrado de grande relevância, pois são capazes de utilizar microrganismos para catalisar diferentes reações eletroquímicas e gerar energia elétrica, compondo abordagens promissoras para capturar energia a partir de biomassa (Logan; Rabaey, 2012).

Apesar do estudo da microbiologia ser fundamental, esse é um campo da ciência que pode ser de difícil compreensão e, por isso, se faz de interesse o desenvolvimento de alternativas didáticas que auxiliem na tarefa de lecionar esse conteúdo (Santos *et al.*, 2013). Ademais, essas ferramentas podem aproximar os educandos dos temas que envolvem os microrganismos – que são seres microscópicos, o que pode levar à uma visão desconexa desses com a realidade –, cooperando com a interpretação e absorção dos conteúdos em microbiologia e possibilitando a esquematização de noções críticas acerca da temática em estudo (Cândido *et al.*, 2015).

No âmbito dessa discussão, se fazem relevantes os chamados recursos didáticos, que podem ser entendidos como toda ferramenta utilizada como auxílio para o ensino. Os tipos de recursos didáticos são variados, partindo do quadro de giz, passando por jogos e até visitas técnicas e pesquisas de campo. Dentre esses, estão também os experimentos práticos, que se justificam a partir de visões pedagógicas que encorajam a utilização de materiais “concretos” em sala de aula e que sejam capazes de envolver fisicamente os alunos em dinâmicas de aprendizagem ativa. Além disso, as discussões e resoluções de situações-problema que devem acompanhar os experimentos práticos contribuem com a formação de educandos mais reflexivos e críticos (Nicola; Paniz, 2017; Vieira; Correa, 2020).

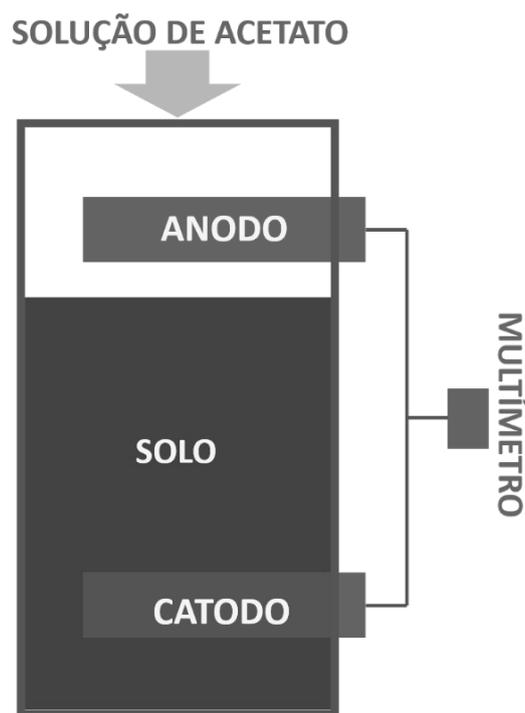
A partir da compreensão da necessidade de se desenvolver recursos didáticos em microbiologia, percebe-se então que as células de energia microbiana podem ser uma ferramenta de interesse para o ensino da presença e atividade microbianas e da geração de bioeletricidade por meio desses agentes biológicos, já que esses são dispositivos que empregam microrganismos para conduzir reações eletroquímicas e produzir energia elétrica. Assim, a montagem e a condução de experimentos em CEM podem ser utilizadas em salas de aula para expor, de forma dinâmica e prática, conteúdos relacionados ao metabolismo microbiano e à bioenergia (Logan; Rabaey, 2012).

Uma forma simples de construir uma CEM é optando pela estrutura soil-based, um modelo que segue os mesmos princípios básicos das demais células de energia microbiana, mas é mais simples e de menor custo, uma vez que utiliza solo como meio anódico rico em nutrientes, como inóculo – pois abriga vasta diversidade microbiológica – e também como barreira de troca de prótons – já que o gradiente no solo cria a diferença de potencial natural que é necessária para o fluxo de elétrons (He; Shao; Angenent, 2007). Uma CEM soil-based (S-CEM) pode ser construída por utilizar e adaptar a metodologia proposta por Simeon e colaboradores (2020), que sugere o desenvolvimento do dispositivo em plástico, que é um material de fácil acesso.

Para o início da elaboração da S-CEM, solo precisa ser coletado. Apesar de determinadas origens de solo poderem apresentar melhores resultados quando utilizados em CEM, nesse trabalho coloca-se a que origem do solo escolhida para a montagem pode seguir a disponibilidade de local de quem a constrói, já que é natural dos solos, em geral, apresentar boa diversidade de microrganismos (He; Shao; Angenent, 2007). Como recipiente plástico, podem ser utilizados canos de policloreto de vinil (PVC) nas dimensões que interessem os alunos. Sugere-se dimensões em que a altura do cano possua, pelo menos, o dobro do diâmetro – por exemplo, 10 cm de diâmetro e 30 cm de altura. Entretanto, essa não é uma regra e, inclusive, S-CEM de diferentes volumes e proporções podem ser construídas e seus desempenhos comparados a fim de discutir qual construção apresentou melhor performance e quais os motivos envolvidos – ou até mesmo propor que diferentes grupos de alunos preparem diferentes S-CEM e realizem um jogo em que o grupo com melhores resultados vence a dinâmica.

Para os dois eletrodos – anodo e catodo – materiais compostos por ferro ou carbono podem ser utilizados – como grafites ou pregos com cerca 2 cm de espessura, por exemplo – e devem ser alocados cerca de 1 cm das extremidades inferiores e superiores do recipiente para formar uma única câmara. Então, o solo pode ser despejado desde o fundo do recipiente, atentando-se ao fato de que o catodo (eletrodo superior) deve estar no topo, permitindo a interação com o oxigênio do ar. Após finalizar a montagem do dispositivo, deve-se alimentar a S-CEM, o que pode ser feito com uma solução de acetato 5 g/L, pois esse é um substrato comumente presente em águas residuais e a sua conversão em eletricidade tem sido extensivamente estudada (Pant *et al.*, 2010). A Figura 2 demonstra a estrutura da S-CEM proposta.

Figura 2. Estrutura geral da S-CEM (as proporções são apenas ilustrativas)



Fonte: Próprios autores (2023).

Com objetivo de monitorar a geração de bioeletricidade da S-CEM, um multímetro pode ser utilizado para medir, em intervalos previamente estipulados, a diferença de potencial (DDP) entre os eletrodos do dispositivo – por exemplo: se a S-CEM for operada por 6 horas, alimenta-se na hora 0 e, a cada 30 minutos, mede-se a DDP resultante. O experimento pode ser conduzido em ciclo único ou repetidos, em diferentes dias – nesse caso, sugere-se a retirada do resíduo da solução de acetato antes da realimentação. Para melhor acompanhamento do experimento, deve-se registrar e analisar os resultados das medições.

A partir da montagem e da condução dos experimentos com a S-CEM, alguns debates em microbiologia podem ser realizados, a depender do estágio educacional dos alunos em questão. Um primeiro ponto a ser abordado é a respeito da ubiquidade microbiana, que é a capacidade dos microrganismos de crescerem e sobreviverem nos mais diversos ambientes. Quanto à microbiologia do solo, é possível discutir como o solo é local de variadas populações microbianas, que têm funções ecológicas e atividades bióticas importantes, mediando um número vasto de transformações bioquímicas. Além disso, pode-se debater como, em muitas vezes, o papel do solo na vida e na conservação da biodiversidade não é reconhecido, utilizando essa ferramenta didática para incentivar a valorização dos princípios da sustentabilidade e para que os conceitos ligados ao solo possam ser revistos e reconstruídos (Vilas Boas; Moreira, 2012).

É possível também, a partir do trabalho didático com a S-CEM, abordar conteúdos relacionados ao processo de respiração celular, já que o mecanismo de funcionamento desses dispositivos se baseia nesse fenômeno biológico, de modo que os microrganismos que crescem

na S-CEM oxidam substratos e geram elétrons – além de íons H^+ e dióxido de carbono (CO_2) – a partir da respiração celular. Pode-se discutir, ainda, o fato de como os elétrons produzidos são apanhados por mediadores de elétrons, transportados para o exterior da célula dos microrganismos e conduzidos diretamente ao anodo e, finalmente, os elétrons são transferidos até o catodo por meio do circuito elétrico externo – o que promove no sistema a diferença de potencial elétrico, que pode ser convertida em corrente elétrica e recuperada na forma de energia elétrica (Hidalgo *et al.*, 2014; Fung, 2016).

Pode ser também de interesse discutir que para que o processo de geração de bioeletricidade possa ser realizado em uma CEM, é necessário que a oxidação dos substratos decorra na ausência de aceitadores de elétrons, já que o anodo deve ser o receptor final de elétrons, pois só assim haverá fluxo de elétrons, razão pela qual é preciso conter nesses dispositivos uma barreira que evita a difusão de O_2 do compartimento catódico, que é aeróbio, para o anodo, que deve permanecer em condições anaeróbicas – barreira que, no caso das S-CEM é dado pelo gradiente de solo (Logan *et al.*, 2008). Ademais, a partir da análise das medidas de tensão tomadas, pode-se discutir os fatores que influenciam o desempenho das S-CEM, especialmente se o experimento for conduzido até que a geração de bioeletricidade cesse, o que ocorre nesses dispositivos após um período de operação, uma vez que as S-CEM são caracterizados por uma queda contínua de tensão causada pelo esgotamento do conteúdo metabolizável disponível no solo (Simeon *et al.*, 2020).

É possível discutir, por fim, outros tópicos relacionados à produção e transferência de elétrons em microbiologia: a partir da consideração de que os eletrodos presentes nas CEM são sólidos que não podem penetrar em células de microrganismos, pode-se abordar como é necessário que a transferência de elétrons nesses dispositivos seja realizada de dentro para fora da membrana celular microbiana – ou seja, é necessário que os microrganismos atuantes apresentem a capacidade de externar elétrons – e que, comumente, esses microrganismos são nomeados como exoeletrogênicos, eletrígenos ou microrganismos eletroquimicamente ativos (In-Seop; Orianna; Kenneth, 2006; Lehnen, 2014).

Considerações finais

Atualmente, a ciência considera as células de energia microbiana como uma tecnologia em potencial, já que se enfrenta uma ameaça no setor de energia e esses dispositivos permitem a conversão da energia química contida em compostos metabolizáveis em energia elétrica. No âmbito dessa discussão, apesar de se saber que por meio da microbiologia pode-se trabalhar conceitos relacionados à geração de bioeletricidade, o estudo desse setor da ciência pode ser difícil para os educandos. Essa situação leva à reflexão de que o desenvolvimento de recursos didáticos nessa área pode ser de grande interesse e, por isso, o presente trabalho objetivou propor a construção e operação de células de energia microbiana como ferramenta didática para o ensino dos conceitos envolvidos na geração de bioeletricidade e discutir a relevância dessa atividade no campo da educação.

A partir da metodologia e discussões desenvolvidas, percebeu-se que a utilização das CEM no ensino de microbiologia pode ser de grande relevância, pois são capazes de cooperar com a abordagem de temas como ubiquidade microbiana, microbiologia do solo, respiração celular, geração de bioeletricidade e transferência de elétrons em microbiologia. A pertinência da utilização de uma célula de energia microbiana como recurso didático é ainda reforçada quando se considera que os conceitos apresentados por meio desse dispositivo ultrapassam os limites das salas de aula, tocando temas como sustentabilidade, recursos energéticos e consciência ambiental. Como sugestão para estudos futuros, propõe-se que resultados obtidos pela implementação da CEM como recurso didático sejam coletados e discutidos a fim de analisar como essa ferramenta impacta na trajetória educacional de alunos que participem de experimentos com esses dispositivos.

Referências

AHN, Youngho; LOGAN, Bruce. Effectiveness of domestic wastewater treatment using microbial fuel cells at ambient and mesophilic temperatures. **Bioresource technology**, v. 101, n. 2, p. 469-475, 2010. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=3bd3cb377f6ba730ae502386dbcb244ca0bcc425>. Acesso em: 07 dez. 2023.

ANGIONI, Simone *et al.* Improving the performances of Nafion™-based membranes for microbial fuel cells with silica-based, organically-functionalized mesostructured fillers. **Journal of Power Sources**, v. 334, p. 120-127, 2016. Disponível em: https://iris.unipv.it/bitstream/11571/1162694/4/Paper_quartarone_second%20revision.pdf. Acesso em: 04 dez. 2023.

BAUDLER, André; RIEDL, Sebastian; SCHRÖDER, Uwe. Long-term performance of primary and secondary electroactive biofilms using layered corrugated carbon electrodes. **Frontiers in Energy Research**, v. 2, p. 30, 2014. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2014.00030/full>. Acesso em: 04 dez. 2023.

CÂNDIDO, Mirilene dos Santos Casado *et al.* Microbiologia no Ensino Médio: Analisando a realidade e sugerindo alternativas de ensino numa Escola Estadual Paraibana. **Ensino, Saúde e ambiente**, v. 8, n. 1, 2015. Disponível em: <https://periodicos.uff.br/ensinosaudeambiente/article/download/21199/12671>. Acesso em: 04 dez. 2023.

CARDOZO, Matheus Henrique Alcântara de Lima; NUCCI, Edson Romano. Células de Energia Microbiana: Uma Tecnologia para Biotratamento de Efluente Aliado à Biogeração de Energia Elétrica. **Sustentabilidade – Conceito Articulador de Saberes e Práticas**, p. 306-320, 2022. Disponível em: https://www.reconectasolucoes.com.br/_files/ugd/db03c2_598fe830d0e84fbe9e06891b3f1fab a1.pdf. Acesso em: 04 dez. 2023.

CREPALDE, Rodrigo dos Santos; AGUIAR Júnior, Orlando Gomes. Abordagem intercultural na educação em ciências: da energia pensada à energia vivida. **Educação em Revista**, v. 30, p. 43-61, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/edur/a/VXpG6Tf9f4nd5GJNW6L6nGC/?lang=pt&format=html>. Acesso em: 04 dez. 2023.

DU, Zhuwei; LI, Haoran; GU, Tingyue. 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, 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Tingyue-Gu-3/publication/6254033_A_state_of_the_art_review_on_microbial_fuel_cells_A_promising_technology_for_wastewater_treatment_and_bioenergy/links/58933ca2aca27231daf5ecad/A-state-of-the-art-review-on-microbial-fuel-cells-A-promising-technology-for-wastewater-treatment-and-bioenergy.pdf. Acesso em: 07 dez. 2023.

FORESTI, Eugenio. Anaerobic treatment of domestic sewage: established technologies and perspectives. **Water Science and Technology**, v. 45, n. 10, p. 181-186, 2002. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=7e5b6459b4c6c1a5af61960da3ff3b2c172d729c>. Acesso em: 07 dez. 2023.

FUNG, Andrew Way Meng. **Otimização da geração de energia em célula a combustível microbiana com *Escherichia coli* utilizando eletrodo modificado por eletrodeposição de polipirrol**. 2006. 41 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Ambientais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Brasil, 2006.

GHASEMI, Mostafa *et al.* Effect of pre-treatment and biofouling of proton exchange membrane on microbial fuel cell performance. **International journal of hydrogen energy**, v. 38, n. 13, p. 5480-5484, 2013. Disponível em: https://www.academia.edu/download/47132499/Effect_of_pre

treatment_and_biofouling_o20160709-18348-1btmiir.pdf. Acesso em: 04 dez. 2023.

GUDE, Veera Gnaneswar. Energy and water autarky of wastewater treatment and power generation systems. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 45, p. 52-68, 2015. Disponível em: https://www.academia.edu/download/36489618/RSER_Energy_and_water_autarky_of_wastewater_treatment_and_power_generation_systems.pdf. Acesso em: 04 dez. 2023.

HE, Zhen; SHAO, Haibo; ANGENENT, Largus T. Increased power production from a sediment microbial fuel cell with a rotating cathode. **Biosensors and Bioelectronics**, v. 22, n. 12, p. 3252-3255, 2007.

HIDALGO, Diana *et al.* Streamlining of commercial Berl saddles: a new material to improve the performance of microbial fuel cells. **Energy**, v. 71, p. 615-623, 2014. Disponível em: <https://www.academia.edu/download/35701372/ENERGY.pdf>. Acesso em: 04 dez. 2023.

IN-SEOP, Chang; ORIANNA, Bretschger; KENNETH, Nealson. Electrochemically active bacteria (EAB) and mediator-less microbial fuel cells. **Journal of Microbiology and Biotechnology**, v. 16, n. 2, p. 163-177, 2006. Disponível em: <https://koreascience.kr/article/JAKO200617033428931.pdf>. Acesso em: 04 dez. 2023.

KUNTKE, P. *et al.* Ammonium recovery and energy production from urine by a microbial fuel cell. **Water research**, v. 46, n. 8, p. 2627-2636, 2012. Disponível em: <https://www.academia.edu/download/39257744/0c96051f0fe61a3217000000.pdf>. Acesso em: 04 dez. 2023.

LEHNEN, Débora Santos. **Desenvolvimento de células de combustível microbiana**. 2014. 40 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

LIU, Hong; RAMNARAYANAN, Ramanathan; LOGAN, Bruce. Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell. **Environmental science & technology**, v. 38, n. 7, p. 2281-2285, 2004. Disponível em: https://www.academia.edu/download/46124054/Production_of_Electricity_During_Wastewa20160601-4356-1cf8euh.pdf. Acesso em: 07 dez. 2023.

LOGAN, Bruce *et al.* Microbial electrolysis cells for high yield hydrogen gas production from organic matter. **Environmental Science & Technology**, v. 42, n. 23, p. 8630-8640, 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Abudukeremu-Kadier/post/What_is_the_favourable_voltage_for_conducting_Microbial_electrolysis_cell_MEC_experiment/attachment/59d61dd279197b807797a46c/AS%3A273596813905923%401442241971536/download/2008-Logan-et-al-ES%26T.pdf. Acesso em: 04 dez. 2023.

LOGAN, Bruce; RABAEY, Korneel. Conversion of wastes into bioelectricity and chemicals by using microbial electrochemical technologies. **Science**, v. 337, n. 6095, p. 686-690, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Korneel-Rabaey/publication/230643505_Conversion_of_Wastes_into_Bioelectricity_and_Chemicals_by_Using_Microbial_Electrochemical_Technologies/links/0deec5237f4de2466d000000/Conversion-of-Wastes-into-Bioelectricity-and-Chemicals-by-Using-Microbial-Electrochemical-Technologies.pdf. Acesso em: 04 dez. 2023.

MARCON, Lucas Ricardo Cardoso. **Potencialidade da célula combustível microbiana para geração de energia elétrica a partir de esgoto sanitário**. 2011. 57f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade de São Paulo, Brasil, 2011.

MIRANDA, Leila Mourão. Sobre história, sustentabilidade e crise energética. **Revista Brasileira de História**, v. 43, p. 15-28, 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbh/a/jyPGVj8MZychSjfY4XTBMcb/>. Acesso em: 05 dez. 2023.

MORAIS, Naassom Wagner Sales; SANTOS, André Bezerra dos. Análise dos padrões de lançamento de efluentes em corpos hídricos e de reúso de águas residuárias de diversos estados do Brasil. **Revista DAE**, n. 215, p. 40-55, 2019. Disponível em: https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/43168/1/2019_art_absantos.pdf. Acesso em: 07 dez. 2023.

MUNOZ-CUPA, Carlos *et al.* An overview of microbial fuel cell usage in wastewater treatment, resource recovery and energy production. **Science of the Total Environment**, v. 754, p. 142429, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720359581>. Acesso em: 07 dez. 2023.

NICOLA, Jéssica Anese; PANIZ, Catiane Mazocco. A importância da utilização de diferentes recursos didáticos no Ensino de Ciências e Biologia. **InFor**, v. 2, n. 1, p. 355-381, 2017. Disponível em: <https://ojs.ead.unesp.br/index.php/neaad/article/download/InFor2120167/98>. Acesso em: 05 dez. 2023.

PANT, Deepak *et al.* A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. **Bioresource technology**, v. 101, n. 6, p. 1533-1543, 2010. Disponível em: <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=4846e61d473e9066d60bd9d6a62a2ef3ef5787f0>. Acesso em: 07 dez. 2023.

PARK, Younghyun *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, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894717301626>. Acesso em: 07 dez. 2023.

RABAEY, Korneel; VERSTRAETE, Willy. Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation. **Trends in Biotechnology**, v. 23, n. 6, p. 291-298, 2005. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Korneel-Rabaey/publication/7819936_Microbial_Fuel_Cells_Novel_Biotechnology_for_Energy_Generation/links/5a546521a6fdccf3e2e2dae8/Microbial-Fuel-Cells-Novel-Biotechnology-for-Energy-Generation.pdf. Acesso em: 07 dez. 2023.

RAHIMNEJAD, Mostafa *et al.* Microbial fuel cell as new technology for bioelectricity generation: A review. **Alexandria Engineering Journal**, v. 54, n. 3, p. 745-756, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016815000484>. Acesso em: 05 dez. 2023.

SANTOS, Pollyana Myrella Capela *et al.* Microbiologia para o ensino médio e técnico: contribuição da extensão ao ensino e aplicação da ciência. **Revista Conexão UEPG**, v. 9, n. 2, p. 254-267, 2013. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/5141/514151730009.pdf>. Acesso em: 04 dez. 2023.

SIMEON, Meshack *et al.* Polarization and power density trends of a soil-based microbial fuel cell treated with human urine. **International Journal of Energy Research**, v. 44, n. 7, p. 5968-5976, 2020. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/er.5391>. Acesso em 05 dez. 2023.

TANISHO, Shigeharu; KAMIYA, Nobuyuki; WAKAO, Noriaki. Microbial fuel cell using *Enterobacter aerogenes*. **Journal of electroanalytical chemistry and interfacial electrochemistry**, v. 275, n. 1, p. 25-32, 1989. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/002207288987189X>. Acesso em: 05 dez. 2023.

TORTORA, Gerard; CASE, Christine; FUNKE, Berdell. **Microbiologia**. 12 ed. Porto Alegre: Artmed Editora, 2016.

TRAPERO, Juan *et al.* Is microbial fuel cell technology ready? An economic answer towards industrial commercialization. **Applied energy**, v. 185, p. 698-707, 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916315562>. Acesso em: 05 dez. 2023.

VIEIRA, Valdecir Junior; CORRÊA, Maria José Pinheiro. O uso de recursos didáticos como alternativa no ensino de Botânica. **Revista de Ensino de Biologia da SBEnBio**, p. 309-327, 2020. Disponível em: <https://renbio.org.br/index.php/sbenbio/article/download/290/116>. Acesso em: 05 dez. 2023.

VILAS BOAS, Rogério Custódio; MOREIRA, Fatima Maria de Souza. Microbiologia do solo no ensino médio de Lavras, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 295-306, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbcs/a/Trc7ZM7qYKvnwZRHhb9sC5h/>. Acesso em: 07 dez. 2023.

WINFIELD, Jonathan *et al.* Towards disposable microbial fuel cells: natural rubber glove membranes. **International journal of hydrogen energy**, v. 39, n. 36, p. 21803-21810, 2014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319914026305>. Acesso em: 07 dez. 2023.

ZHOU, Xingwang *et al.* Surface oxygen-rich titanium as anode for high performance microbial fuel cell. **Electrochimica Acta**, v. 209, p. 582-590, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013468616311690>. Acesso em: 07 dez. 2023.

Recebido em 21 de setembro de 2023.

Aceito em 30 de outubro de 2023.