



INVESTIGANDO O DESEMPENHO DE CURTO PRAZO DE *EQUISETUM HYEMALE* E *MISCANTHUS GIGANTEUS* EM CÉLULAS A COMBUSTÍVEL MICROBIANAS VEGETAIS (PLANT MICROBIAL FUEL CELLS)

PIETRO CICCALÈ; CARLO SANTULLI; FRANCESCO NOBILI

RESUMO

Este estudo destaca a possibilidade de replicar facilmente os sistemas de célula de combustível microbiana vegetal (PMFC) e a importância de obter fontes de energia mais limpas para um futuro sustentável. Três configurações foram construídas para este estudo: uma PMFC simples com *Equisetum hyemale*, uma PMFC simples com *Miscanthus giganteus* e duas PMFCs simples com duas plantas de *Miscanthus* conectadas em série. A tensão máxima de circuito aberto (OCV) obtida neste estudo é de 615 mV, enquanto a maior densidade de potência é de $4,8 \text{ mW/m}^2$ de área catódica. Por fim, as comparações entre as duas primeiras configurações mostram que uma única planta de *Miscanthus* pode ter maior produção de biomassa do que o *Equisetum*, resultando em maior tensão e maior geração de energia. Além disso, a terceira configuração registrou um aumento na tensão alguns dias após a aplicação do biochar, obtendo os maiores valores desse estudo.

Palavras-chave: Energia Verde; Geração de Bioenergia; Bioeletricidade; Sustentabilidade; Tensão de Circuito Aberto

1 INTRODUÇÃO

A célula de combustível microbiana vegetal (PMFC) é uma tecnologia emergente que funciona transformando a energia solar aproveitada por plantas vivas em energia elétrica, por meio da oxidação de rizo-depósitos por bactérias e interações bioquímicas. A aplicação da tecnologia de PMFC para a geração de pequenas quantidades de energia elétrica está bem consolidada como um processo tecnológico (Rosenbaum et al. 2010). Conforme testado por Nitisoravut e Regmi (2017), uma vantagem adicional das PMFCs é a possibilidade de gerar um fluxo contínuo e bastante constante de energia e ser operada em qualquer local. Além disso, suas vantagens inerentes, como a utilização de recursos renováveis, a neutralidade de carbono e a capacidade de tratamento de resíduos, tornam as PMFCs uma solução atraente para enfrentar os desafios energéticos e, ao mesmo tempo, minimizar o impacto ambiental (Ahirwar et al. 2023). Outra aplicação notável dessa tecnologia vem de Kuleshova et al. (2022) e Maddalwar et al. (2023), que mostraram que as PMFCs podem gerar eletricidade a partir de resíduos ou subprodutos agrícolas, promovendo a agricultura sustentável e reduzindo a dependência de fontes externas de energia, podendo contribuir prospectivamente para as necessidades energéticas de estufas, fazendas e instalações de processamento de alimentos.

Esta pesquisa se concentra em duas espécies de plantas: *Equisetum hyemale* (Carolus Linnaeus, 1753) e *Miscanthus giganteus* (Greef e Deuter ex Hodkinson e Renvoize, 2002). O *E. hyemale* foi escolhido principalmente por causa de seu alto caráter espontâneo, adaptabilidade e alta taxa reprodutiva, que também são mostrados nesta pesquisa. Alguns estudos (Nisa, 2018; Stolzenberg Colares et al. 2021) mediram a voltagem da PMFC envolvendo *E. hyemale* associada à fitorremediação. Por outro lado, embora *Spartina anglica*,

Oryza sativa e *Glyceria maxima* sejam as espécies de plantas mais usadas em sistemas PMFC (Tetteh Kabutey et al. 2019), a *M. giganteus* foi escolhida, em primeiro lugar, porque não foi encontrada na literatura científica sobre PMFC. Em segundo lugar, essa espécie específica de *Miscanthus* foi escolhida porque despertou grande interesse nos últimos dois anos: neste estudo, *M. giganteus* demonstrou grande resistência à seca e alta taxa de reprodução. Além disso, sua capacidade de crescer em terras marginais, sua eficiência hídrica, baixa necessidade de fertilizantes, sequestro significativo de carbono e alto rendimento (Whitaker et al. 2018) levaram alguns a sugerir que ela pode ter propriedades "ideais" de cultura energética (Lewandowski et al. 2000; Anderson et al. 2011; Kowalczyk-Juśko et al. 2022).

Este estudo tem dois objetivos principais: (i) destacar a importância de soluções mais verdes e sustentáveis para uma geração de energia mais limpa; (ii) gerar bioeletricidade a partir de plantas vivas e com materiais de acesso relativamente fácil e de baixo custo, como recipientes plásticos recicláveis, feltro de carbono; (iii) aplicar biomateriais como o biochar, ou carvão vegetal, para aumentar a fertilidade do solo e, ao mesmo tempo, incrementar a produtividade de bioenergia.

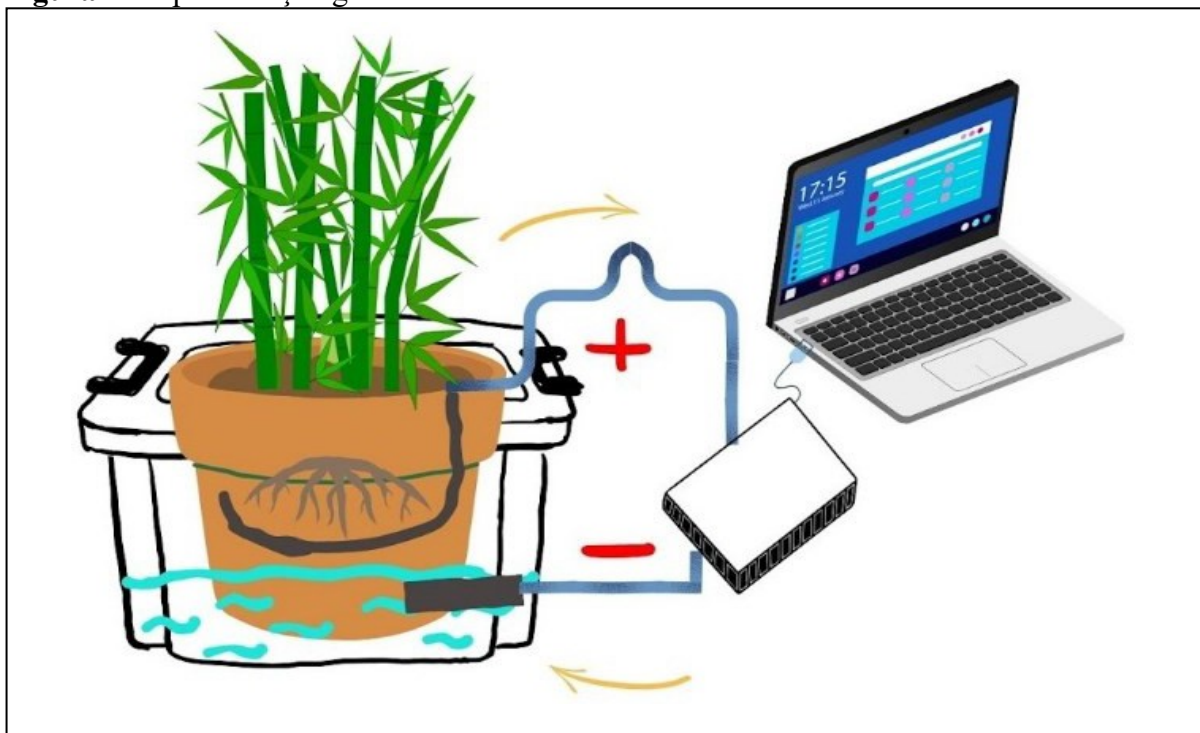
2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Configuração do sistema

Três plantas foram compradas na loja do site www.vivaibambustore.com: dois indivíduos de *M. giganteus* e um indivíduo de *E. hyemale*, já crescidos e enviados para o Departamento de Geologia (UNICAM) de Camerino (MC), via Gentile III da Varano 7. O *Equisetum* cresceu em um vaso plástico comum (25x17x17 cm) e tinha de 90 a 100 cm de altura no momento do envio, enquanto os dois *Miscanthus* cresceram na terra e foram enviados por meio de torrões com 15 a 20 cm de solo e ambos tinham entre 20 e 30 cm de altura. O processo de preparação foi o mesmo para todas as três células: a planta foi colocada em um segundo momento em um vaso de plástico (50x35x35 cm) e foi adicionado solo orgânico comum (COMPO SANA® Terriccio Universale di Qualit , Ravenna, Itália). O pote   então colocado em uma caixa plástica (25x36x42 cm, 25 L) para a formação e conexão das duas câmaras de eletrodos diferentes. Após as primeiras etapas, foi inserida água no espaço entre o pote e a caixa até formar uma camada de aproximadamente 15 cm.

Um par de feltros de carbono foi usado como eletrodos para cada célula. O ânodo (0,1x20x20 cm, área de superfície de 0,04 m²), colocado abaixo da superfície do solo em contato com as raízes, adquiriu um formato de cone para envolver os sistemas radiculares de cada planta. O cátodo (0,1x15x5 cm, área de superfície de 0,0075 m²), enriquecido com 0,5 mg/cm² de p  de platina, usado como catalisador para acelerar a reação de redução de oxig nio, é colocado no filme de água dentro do espaço entre a caixa plástica externa e o vaso plástico interno. As três configurações são: (1) um indivíduo de *Equisetum*, (2) um indivíduo de *Miscanthus* e (3) dois indivíduos de *Miscanthus* conectados em série. A Figura 1 apresenta uma representação gráfica de todo o sistema usado para este estudo.

Figura 1: Representação gráfica dos sistemas utilizados. Fonte: Pietro Cicalè.



2.2 Medições de potencial elétrico

Todas as plantas foram armazenadas à temperatura ambiente (15-24 °C), durante todo o período do estudo, no CHemistry Interdisciplinary Project (CHIP), Centro de Pesquisa (Camerino), com uma entrada de água de 0,5 L a cada dois dias por um período de três meses, de 15/11/2022 a 15/02/2023, sem rega durante as férias de Natal (de 23/12/2022 a 09/01/2023). A água tinha duas funções principais: preencher o espaço entre a caixa externa e o vaso interno e ser absorvida pelas raízes das plantas. Apesar de não terem sido regadas durante as férias de Natal, as plantas não apresentaram nenhum sinal de seca e puderam continuar funcionando na PMFC.

Neste estudo, a tensão de circuito aberto (OCV), a intensidade da corrente (I) e a potência (P) de cada PMFC foram medidas usando um galvanostato potenciostato (Modelo SP-150, BioLogic, França) conectado a um computador que tinha instalado o software Ec-Lab para a coleta e análise de dados brutos. A curva de potência, a curva de polarização e o gráfico OCV-tempo foram construídos para cada célula instalada.

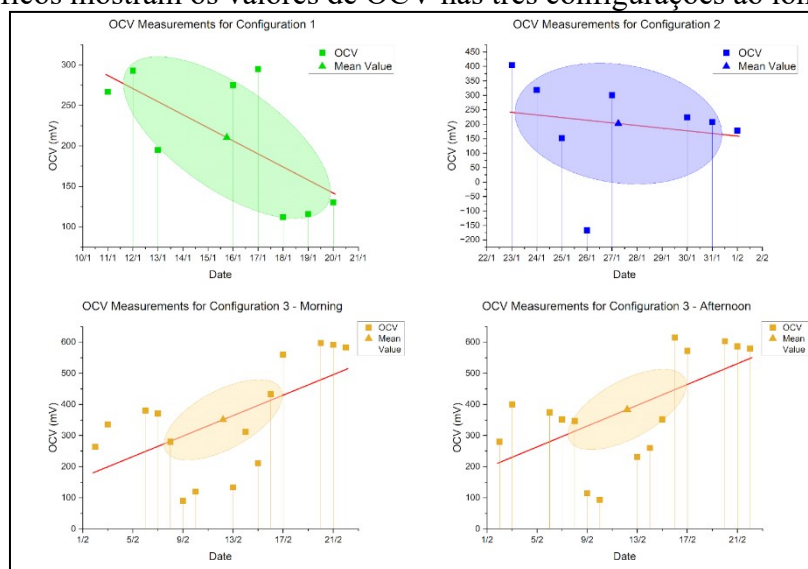
As medições foram feitas uma vez por dia, às 10h30, de acordo com o horário italiano, de 11/01 a 20/01 para a PMFC com o Equisetum e de 23/01 a 01/02 para a segunda configuração, enquanto para a terceira configuração foram feitas duas vezes por dia, de 02/02 a 22/02, às 10h30 e às 16h30, respectivamente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este estudo relata a maior potência de saída na segunda configuração, com um valor de $4,8 \text{ mW/m}^2$ de área catódica. O valor mais baixo, em contraste, foi encontrado na primeira configuração, com um valor de $0,4 \text{ mW/m}^2$. No entanto, a potência sobre a área da superfície é muito baixa quando comparada a outras: por exemplo, Timmers et al. (2010) registraram até 100 mW/m^2 de área geométrica do ânodo.

Os gráficos que relatam o desempenho da PMFC são mostrados nos gráficos da Figura 2.

Figura 2: Os gráficos mostram os valores de OCV nas três configurações ao longo do tempo.



Fonte: Pietro Cicalà.

O primeiro gráfico, em alto à esquerda, representa a PMFC com *E. hyemale* que mostra valores de OCV relativamente mais baixos em comparação com as demais, variando de 112 mV a 293 mV, com um valor médio de tensão de aproximadamente 210 mV. O segundo gráfico, em alto à direita, representa a PMFC com *M. giganteus* e exibe valores mais altos, variando de -167 mV a 405 mV, com uma média de 223 mV. O valor negativo se deve ao afundamento do cátodo na água, o que causa a inversão dos processos eletroquímicos, e é considerado inválido. As medições de potencial elétrico na terceira configuração demonstram padrões distintos ao longo do tempo: as medições da manhã mostram um potencial elétrico que varia de 90 mV a 597 mV, com um valor médio de aproximadamente 350 mV, enquanto durante a tarde o potencial elétrico varia de 93 mV a 615 mV, com um valor médio de 430 mV. É mais provável que essa mudança de valores baixos para altos se deva à adição de 2,5 L de biochar ao solo dos dois vasos, em 02/08/2023. Seus efeitos sobre a atividade microbiana da rizosfera (Feng et al., 2012) são visíveis nas últimas medições, quase 7 dias após sua aplicação, nos dois gráficos de manhã e de tarde.

Resumindo, na PMFC única o Equisetum apresentou uma saída relativamente baixa, com um valor máximo de OCV de 293 mV, enquanto o Miscanthus apresentou melhores resultados, com um pico de 405 mV. Em segundo lugar, a conexão de duas PMFCs conectadas em série afetou positivamente a tensão de saída. É interessante notar que, após 7 dias da aplicação do biochar, foi atingido um valor máximo de OCV de 615 mV, que se estabilizou em torno de 590 mV nas últimas 8 medições, enquanto que antes da adição do biochar ele estava oscilando entre 300 mV e 350 mV.

4 CONCLUSÃO

Os resultados da pesquisa permitiram comparar o potencial elétrico nos diferentes sistemas de PMFC. Em primeiro lugar, as medições de potencial elétrico da PMFC de *E. hyemale* e da PMFC de *M. giganteus* apresentam flutuações na OCV ao longo do tempo, sugerindo a ocorrência de processos dinâmicos nos sistemas, como a alteração do teor de água e da distância entre os eletrodos.

As espécies de plantas selecionadas para este estudo apresentaram resultados eletroquímicos significativos em uma configuração muito simples, embora a potência de saída por unidade de área seja muito baixa. Outras investigações precisam considerar os aprimoramentos do sistema e os materiais escolhidos: quanto maior o número de plantas

conectadas em série, maior a produção de voltagem. Por fim, a importância da geração de bioeletricidade e a aplicação de materiais ecologicamente corretos podem melhorar a sustentabilidade geral e o desempenho de projetos futuros com aplicações em escala industrial.

REFERÊNCIAS

AHIRWAR, A.; DAS, S.; YANG, Y. H.; BHATIA, S. K.; VINAYAK, V.; GHANGREKAR, M. M. Photosynthetic microbial fuel cell for bioenergy and valuable production: A review of circular bio-economy approach. *AlgalRes*, 102973, 2023.
<https://doi.org/10.1016/j.algal.2023.102973>.

ANDERSON, E.; ARUNDALE, R.; MAUGHAN, M.; OLADEINDE, A.; WYCISLO, A.; VOIGT, T. Growth and agronomy of *Miscanthus x giganteus* for biomass production. *Biofuels*, 2(1), 71-87, 2011.

FENG, Y.; XU, Y.; YU, Y.; XIE, Z.; LIN, X. Mechanisms of biochar decreasing methane emission from Chinese paddy soils. In: *Soil Biology and Biochemistry*, 46, 80-88, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.11.016>.

GREEF, J. M.; DEUTER, M. Syntaxonomy of *Miscanthus x giganteus* Greef et Deu. *Angewandte Botanik*, 67, 87-90, 1993.

KOWALCZYK-JUŚKO, A.; MAZUR, A.; POCHWATKA, P.; JANCZAK, D.; DACH, J. Evaluation of the Effects of Using the Giant *Miscanthus (Miscanthus x giganteus)* Biomass in Various Energy Conversion Processes. *Energies*, 15(10), 3486, 2022.

KULESHOVA, T.; RAO, A.; BHADRA, S.; GARLAPATI, V. K.; SHARMA, S.; KAUSHIK, A.; GOSWAMI, P.; SREEKIRSHNAN, T. R.; SEVDA, S. Plant microbial fuel cells as an innovative, versatile agro-technology for green energy generation combined with wastewater treatment and food production. *Biomass and Bioenergy*, 167, 106629, 2022.
<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2022.106629>.

LEWANDOWSKI, I.; CLIFTON-BROWN, J. C.; SCURLOCK, J. M. O.; HUISMAN, W. *Miscanthus*: European experience with a novel energy crop. *Biomass and Bioenergy*, 19(4), 209-227, 2000.

MADDALWAR, S.; KUMAR NAYAK, K.; SINGH, L. Evaluation of power generation in plant microbial fuel cell using vegetable plants. *Bioresource Technology Reports*, 22, 101447, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101447>.

NITISORAVUT, R.; REGMI, R. Plant microbial fuel cells: A promising biosystems engineering. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 76, 81-89, 2017.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.064>.

NISA, Khoirun. Pengolahan Air Limbah dan Produksi Biolistrik pada Lahan Basah dengan Metode Plant Microbial Fuel Cell (PMFC) pada Berbagai Tanaman. 2018. Sarjana thesis - Universitas Brawijaya, 2018.

ROSENBAUM, M.; HE, Z.; ANGENENT, L. T. Light Energy to Bioelectricity: Photosynthetic Microbial Fuel Cells. *Current Opinion in Biotechnology*, 21(3), 259-264, 2010.

<https://doi.org/10.1016/j.copbio.2010.03.010>.

STOLZENBERG COLARES, G.; DELL'OSBEL, N.; BARBOSA, C. V.; LUTTERBECK, C.; OLIVEIRA, G. A.; RODRIGUES, L. R.; BERGMANN, C. P.; RODRIGUEZ LOPEZ, D.; LAWISCH RODRIGUEZ, A.; VYMAZAL, J.; MACHADO, E. L. Floating treatment wetlands integrated with microbial fuel cell for the treatment of urban wastewaters and bioenergy generation. *Science of The Total Environment*, Volume 766, 142474, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142474>.

TETTEH KABUTEY, F.; ZHAO, Q.; WEI, L.; DING, J.; ANTWI, P.; QUASHIE, F. K.; WANG, W. An Overview of Plant Microbial Fuel Cells (PMFCs): Configurations and Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 110, 402-414, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.05.016>.

TIMMERS, R. A.; STRIK, D. P. B. T. B.; HAMELERS, H. V. M. et al. Long-term Performance of a Plant Microbial Fuel Cell with *Spartina anglica*. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 86, 973–981, 2010. <https://doi.org/10.1007/s00253-010-2440-7>.

WHITAKER, J.; FIELD, J. L.; BERNACCHI, C. J.; CERRI, C. E. P.; CEULEMANS, R.; DAVIES, C. A.; DE LUCIA, E. H.; DONNISON, I. S.; MCCALMONT, J. P.; PAUSTIAN, K.; ROWE, R. L.; SMITH, P.; THORNLEY, P.; MCNAMARA, N. P. Consensus, Uncertainties and Challenges for Perennial Bioenergy Crops and Land Use. *GCB Bioenergy*, 10, 150–164, 2018. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12488>.