

**GERAÇÃO DE BIOENERGIA A PARTIR DE CÉLULAS A COMBUSTÍVEL
MICROBIANO DE PLANTA (P-MFC)**

Maikon Lucian Lenz, Deonir Secco¹; Natasha Barchinski Galant Lenz¹, Vitória Fenilli Vidaletti¹, Pablo Chang¹, Fernando Luiz da Cruz Balena¹, Carlos Henrique Fornasari¹, Vitória Morello¹

¹Universidade do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Curso de Mestrado em Energia na Agricultura, Campus Cascavel, Rua Universitária, 2069, CEP 85819-110, Bairro Jardim Universitário, Cascavel, PR. Email: engenheiro.lenz@gmail.com; deonir.secco@unioeste.br; nah.bio@gmail.com; vitoria_fenilli@hotmail.com; pablo-sdw@hotmail.com; fernando.balena@unioeste.br; carlos_fornasari@hotmail.com; vi_morello@hotmail.com

RESUMO: Dispor de meios para armazenar ou transformar a energia na forma necessária para cada finalidade é um dos grandes desafios atuais. A energia elétrica tem se destacado perante as demais formas de energia, pela facilidade com que pode ser gerada, modulada e armazenada. A energia elétrica pode ser produzida de diferentes formas, e além da eficiência na geração, busca-se também por formas acessíveis e que minimizem o impacto ambiental. Esta revisão da literatura, objetiva demonstrar o uso de células a combustível microbiano de planta (p-mfc) para geração de bioeletricidade, a densidade de potência elétrica, os fatores que influenciam na geração e o impacto das células sobre o solo e a planta. São utilizados dois eletrodos, um próximo das raízes e outro mais distante, porém em contato com o solo. Os eletrodos reagem a diferença de pH do solo por conta dos prótons liberados durante a oxidação do material da rizodeposição pelos microrganismos próximos a rizosfera. Com uma resistência elétrica de valor conhecido, completa-se o circuito entre ânodo e cátodo, permitindo que a densidade de potência elétrica seja avaliada. Nestes trabalhos foram avaliadas diferentes espécies de plantas, condições de solo, tipos de membrana que separam o ânodo do cátodo e associações de duas ou mais células de combustível em série ou paralelo, para verificar a influência sobre a geração de bioeletricidade. Foram observadas alterações decorrentes de todos esses fatores em diferentes proporções, e, principalmente a influência do crescimento da planta e da colônia de microrganismos presentes na rizosfera para determinar a densidade de potência elétrica produzida. Não foram observados impactos negativos para planta ou solo. Apesar da baixa potência observada, as células podem ser aproveitadas paralelamente ao desenvolvimento da cultura e facilitar o acesso a energia elétrica em locais remotos.

PALAVRAS CHAVE: célula a combustível microbiano de planta (p-mfc); bioeletricidade; rizodeposição

BIOELECTRICITY GENERATION BY PLANT MICROBIAL FUEL CELLS (P-MFC)

ABSTRACT: A big challenge of today, is to find means of storing or transforming energy suitable for each purpose. Electrical energy has excelled for being easy to generate, modulate and transform, at least compared with other kinds of energy. Not only the ease and various ways of generating electricity are important, but accessibility and environment impact too. The objective of this literature review is to demonstrate the use of plant microbial fuel cell (p-mfc) in producing bioelectricity, electrical power density obtained, factors influencing it and the impact on soil and plant. Two electrodes are used, one close to the roots and another one further, but both in contact with soil. The protons released during oxidation of organic matter by

microorganism in rhizosphere cause a pH difference between the electrodes and consequently their reaction. Anode and cathode are coupled with a resistor, with a known electrical resistance, completing the electrical circuit and enabling the power electrical density to be evaluated. In these works, different plant species, soil conditions, membrane types which separate anode from cathode and parallel or series electrical p-mfc associations were evaluated to analyze the degree of influence on bioelectricity generation. All of these factors seems to influence the power density of the p-mfc, mainly the plant growth and size of rhizosphere microorganism colony. Negative impact in soil was not observed, neither at the plant. Despite the small power density obtained, p-mfc can be used simultaneously with the crop development and offers a very accessible source of electricity for remote locations.

KEYWORDS: plant microbial fuel cell (p-mfc); bioelectricity; rhizodeposition

INTRODUÇÃO

A energia é essencial para diversos setores da economia, podendo até mesmo ser considerada parte do que move esta e não apenas uma contribuinte (AYRES, et. al. 2012).

A busca por fontes renováveis de energia se justifica, entre outros motivos, pela demanda crescente da quantidade energia consumida (BRASIL, 2015), variação no fornecimento da matéria-prima e poluição resultante dos métodos convencionais (GOLDEMBERG et al, 2012).

Assim, qualquer tecnologia que consiga conciliar a preservação ou mesmo o reflorestamento com a geração de energia elétrica é capaz de produzir efeito positivo para as necessidades anteriormente abordadas. É neste contexto que estão inseridas as células de combustível microbiana de planta (*plant-microbial fuel cells, plant-mfc*), capazes de obter energia elétrica a partir da diferença de pH entre planta e solo, resultado da atividade de microrganismos que se alimentam dos restos orgânicos produzidos pelas plantas e armazenados no solo próximo a suas raízes (NITISORAVUT; REGMI, 2017).

Por se tratar de uma abordagem de exploração nova, boa parte do processo bem como as consequências para a planta ou solo ainda são desconhecidas. Pouco se sabe, por exemplo, se o desenvolvimento plantar é afetado pela utilização das cargas elétricas livres no solo, ou que tipo de bactérias possuem capacidade exoeletrogênica (transferir elétrons fora da célula).

Entretanto, a técnica é promissora uma vez que é fonte de energia renovável, pode produzir energia de forma constante sem grandes influências da sazonalidade, horário e clima.

Apesar da baixa potência de geração que se tem conseguido até o momento, muitas aplicações podem se beneficiar das características dos geradores das células de combustível microbiana de planta, ou p-mfc (*plant microbial fuel cell*), especialmente dispositivos armazenados em locais de difícil acesso que demandariam, em outros casos, uso de baterias ou algum meio de produção/transmissão de energia elétrica dedicada para este.

O estudo e desenvolvimento de células a combustível microbiano de plantas envolve múltiplas áreas do conhecimento, como: botânica, visando encontrar plantas favoráveis a geração de bioeletricidade de acordo com a morfologia e fisiologia desta; microbiologia cujo foco principal é a busca por cepas melhor adaptadas a rizosfera e que com boa atividade eletrogênica; engenharia química para a construção de eletrodos e membranas que amplifiquem a capacidade de geração; engenharia elétrica para melhorar o acoplamento e transferência de potência entre as células e carga; e engenharia ambiental, aproveitando efeitos secundários da interação da célula com o solo capazes de reduzir a produção de toxinas ou servir como sensores de qualidade tanto da planta quanto do solo (NITISORAVUT, et. al., 2017).

Deve-se compreender a célula a combustível microbiano de planta como um biosistema que envolve tanto elementos bióticos quanto abióticos no processo de produção de bioeletricidade (NITISORAVUT, et. al., 2017).

Em acordo com a multidisciplinariedade do tema, este trabalho tem por objetivo revisar estudos recentes que permitam compreender desde as motivações que levaram ao uso de células a combustível microbiano de planta até os processos químicos e elétricos desenvolvidos pela planta, solo e microrganismos durante a produção de bioeletricidade.

ENERGIAS ALTERNATIVAS

A base energética no século XX era baseada em carvão, petróleo e gás porém essas tecnologias criaram problemas com o quais enfrentamos hoje: problemas com as reservas, geopolíticos e poluição. As energias renováveis não geram esse tipo de adversidade por isso estão crescendo e representam 13% da energia, já que os combustíveis fósseis representam 80% da energia consumida e a nuclear 7% (GOLDEMBERG et al, 2012).

Ademais a qualidade de vida está ligada ao consumo de energia, o crescimento dessa demanda é em razão da melhoria nos padrões de vida nos países em desenvolvimento, trazendo então preocupações com aspectos essenciais para a política de planejamento energéticos, como a segurança no suprimento de energia necessária para o desenvolvimento e os custos ambientais

de atender a esse aumento de consumo de energia (GOLDEMBERG; VILLANUEVA, 2003; MARTINS; GUARNIERI; PEREIRA, 2008).

As fontes de energias renováveis são fundamentais no confronto frente as crises nas mudanças climáticas (FURTADO, 2010). Visto que a queima de combustíveis fósseis leva a geração de gases como o CO₂ e o SO₂ que são responsáveis pela chuva ácida e aumento o efeito estufa (SHAY, 1993; SAXENA; ADHIKARI; GOYAL, 2009; BORGES *et al.*, 2016).

Além de fatores políticos sociais como a elevação dos preços de mercados dos combustíveis nas principais regiões produtoras e fatores ambientais, como a ocorrência de longos períodos de seca que afetam drasticamente a produtividade da biomassa e a geração de energia hidroelétrica que também podem reduzir a segurança energética e comprometer a distribuição energética (FILGUEIRAS; SILVA, 2003).

Resumidamente a energia nuclear e os combustíveis fósseis não são considerados renováveis pois sua utilização é irreversível além do mais geram resíduos prejudiciais ao meio ambiente. O restante – como: hidroelétrica, solar, eólica e biomassa – são consideradas renováveis visto que não produzem resíduos prejudiciais, não geram grandes consequências para o meio ambiente e são consideradas inesgotáveis contornando assim o problema da matéria prima (GALDINO *et al*, 2019).

Então fica imprescindível não complementar a matriz energética brasileira. Para isso pode-se adotar fontes renováveis, devendo minimizar os impactos causados por crises internacionais que afetam o mercado de combustíveis fósseis (FILGUEIRAS; SILVA, 2003).

Uma solução para esse problema são os estudos com novas tecnologias que utilizem fontes de carbono renovável, sejam baratas e não causem danos ao meio ambiente (YAZDANI, GONZALES, 2007; SAXENA, ADHIKARI, GOYAL, 2009). Dentre as fontes de “energia não poluente” recentemente pesquisadores descobriram uma nova possibilidade: retirar energia das plantas sem a necessidade de corte ou interrupção do seu desenvolvimento, como por exemplo o estudo de FLEXER e MANO (2010), dando o nome a essa nova forma de energia de: bioeletrecidade ou bioenergia.

BIOENERGIA

A plantas utilizam energia solar para oxidar H_2O , liberando O_2 e reduzindo CO_2 , produzindo compostos orgânicos, primariamente açúcares, isso chama-se fotossíntese. E é através desse processo que é possível se obter energia.

As plantas se desenvolveram durante milhares de anos para absorver a energia proveniente do sol e utilizá-la na produção dos açúcares necessários à sua sobrevivência. Ou seja, enquanto uma planta é capaz de produzir um elétron livre para quase todo fóton que chega até ela, se aproximando de uma eficiência de 100%, as células fotovoltaicas ainda operam com uma taxa entre 14% e 18% (MATA-GONZÁLEZ et. al., 2017). Além disso a demanda de energia difere muito dos horários de maior irradiação solar (Figura 1) (HELDER, et. al., 2012).

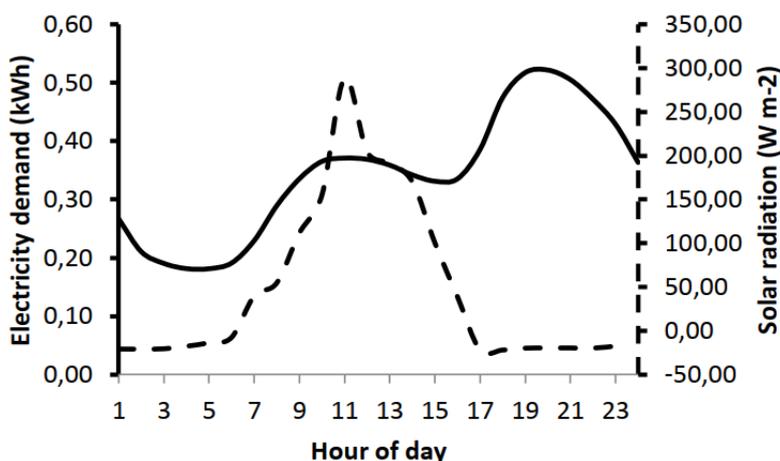


Figura 1. Comparativo entre a irradiação solar (pontilhado) e o consumo de energia elétrica (contínuo). **Fonte:** HELDER, et. al., 2012.

Pouco mais da metade da energia produzida pela planta estará envolvida na reação entre os microrganismos presentes nas raízes, já que a planta consome em torno de 40% da energia produzida a partir da fotossíntese (NITISORAVUT; REGMI, 2017).

De acordo com (NITISORAVUT; REGMI (2017) trata-se de um sistema de malha aberta, cujo modelo, separam em duas etapas: a produção de energia a partir de um sinal externo (luz solar) através do processo de fotossíntese; e a redução química proveniente dos microrganismos que reagem com os açúcares presentes nas raízes provenientes da primeira etapa.

Apesar dos elétrons liberados na planta serem utilizados na maioria das vezes para sua própria subsistência, parte dessa corrente elétrica pode ser aproveitada sem apresentar danos perceptíveis, até o momento, ao meio ambiente (MATA-GONZÁLEZ, et. al. 2017).

As plantas, algas e algumas espécies de bactérias realizam fotossíntese como forma de alimentação. O processo fotossintético consiste no aproveitamento da energia solar para sintetizar compostos carbonados, utilizando a energia luminosa para quebrar moléculas de dióxido de carbono e água. Durante a fotossíntese é produzido ainda grande quantidade de oxigênio.

A reação química ocorre no interior do cloroplasto mais especificamente na membrana do tilacoide em que estão dispostas moléculas de clorofila, que dá pigmento a membrana, de maneira a maximizar a exposição à luz solar, já que estas reagem com grande intensidade ao espectro visível de luz, absorvendo energia dos fótons. Os comprimentos de onda absorvidos dependem do tipo de pigmento presente (TAIZ, et. al., 2017).

As plantas são altamente especializadas para a absorção da energia luminosa, contam inclusive com células epidérmicas convexas que direcionam e concentram as ondas eletromagnéticas para os cloroplastos.

Apesar de altamente especializada para absorção de energia luminosa, durante o processo, em média apenas 5% da energia total recebida pela planta é definitivamente convertido em carboidratos por ela. Isto se deve a múltiplos fatores, dentre os quais se pode citar: 50% da energia se dá em comprimentos de onda não absorvidos; cerca de 15% da energia é refletida ou dissipada ao longo da transmissão entre as moléculas que participam do processo sintetizador; e 20% é consumido durante a metabolização dos carboidratos (TAIZ, et. al., 2017).

Como resultado da primeira etapa da fotossíntese, em que a luz está presente, são produzidas moléculas de ATP utilizadas pela maioria dos seres vivos no transporte de energia.

Durante o ciclo de Calvin-Benson, também conhecido como fase escura ou segunda etapa da fotossíntese, ocorre a absorção de dióxido de carbono da atmosfera. Aproveitando as moléculas de ATP da primeira etapa o CO₂ é utilizado para finalmente produzir os açúcares que serão consumidos pela planta (TAIZ, et. al., 2017).

Entretanto, ao longo deste processo, parte da matéria orgânica produzida durante a fotossíntese é excretada no solo pelas raízes (HELDER, et. al., 2012). Enquanto o carbono fixado na planta é aproveitado nos processos de obtenção de energia por biomassa, os resíduos excretados no solo são consumidos em sua maioria por bactérias ali presentes.

Algumas bactérias, ao consumir os resíduos da fotossíntese no solo, liberam elétrons para o meio permitindo que células de combustível sejam utilizadas na obtenção de energia elétrica (NITISORAVUT; REGMI, 2017).

Existem muitas variações na quantidade de energia elétrica produzida neste meio, que podem variar pelo tipo de planta, solo e até mesmo de bactéria presentes no meio, além é claro das condições físicas e químicas que cada um destes se encontram (algumas herbáceas, tropicais e subtropicais, são bastante eficientes na focalização da luz por viverem em ambientes de baixa luminosidade).

RELAÇÃO SOLO-PLANTA

As plantas absorvem nutrientes e água do solo através das raízes. Este processo pode ocorrer de três formas: difusão, fluxo de massa ou interceptação radicular (TAIZ, et. al., 2017).

No processo de difusão o soluto passa de um meio mais concentrado para um menos concentrado e envolve um processo mais lento já que o soluto tem que passar de célula para célula. Na interceptação radicular a raiz encontra o elemento durante o processo de crescimento e obviamente envolve um processo ainda mais lento que o primeiro. Já o processo de fluxo de massa contribui com a maior parte do material absorvido e depende da diferença de potencial hídrico. Este processo está diretamente vinculado a fotossíntese, já que grande parte da perda hídrica da planta ocorre durante esta, quando os estômatos se abrem para capturar o dióxido de carbono que será utilizado para a produção dos carboidratos (TAIZ, et. al., 2017).

No sentido inverso, a planta transporta parte dos fotossintatos (produto da fotossíntese) para o solo, processo denominado de rizodeposição, e que pode levar até 25% da matéria orgânica produzida pela fotossíntese. O material se desloca das folhas até as raízes através do floema. Além disso, após a morte e decomposição da planta, cerca de 70% da matéria orgânica produzida retornará para o solo. (HELDER, et. al., 2012).

O material excretado é rico em polissacarídeos, proteínas e fosfolipídios, mas também pode apresentar concentrações elevadas de outros nutrientes durante processos de exsudação decorrentes de algum dano a sua estrutura.

Todo este resíduo forma uma região rica em nutrientes e atrativa para diversos tipos de microrganismos. A rizodeposição é importante para a própria planta, já que ao fomentar a atividade biológica próximo as raízes, pode criar com determinadas bactérias uma relação de

mutualismo (PAMINTUAN, et. al., 2020) outros nutrientes importantes para o seu desenvolvimento como o nitrogênio fixado por bactérias como *Azotobacter* e o *Rhizobium*. Também é comum que hormônios como giberelina sejam obtidos no processo.

A depender da espécie de bactéria e do material depositado, podem ser liberados elétrons para o meio. Bactérias que exercem este tipo de função são denominadas de eletrogênicas (PAMINTUAN, et. al., 2020). Em geral a deposição é afetada pela temperatura e luminosidade que tem relação direta com a fotossíntese, mas também pela espécie de planta, idade, as condições de saúde e o tipo de solo.

Ainda assim, a maioria dos estudos não detectaram diferenças significativas de diferença de potencial elétrico em curtos intervalos de tempo, mesmo havendo alterações de temperatura e luminosidade ao longo do dia (PAMINTUAN, et. al., 2020).

CÉLULAS A COMBUSTÍVEL MICROBIANO DE PLANTA (P-MFC)

Para captar a corrente elétrica proveniente da reação entre os microrganismos que se alimentam dos resíduos presentes nas raízes, são utilizados pares de eletrodos dispostos entre as raízes e o solo. A raiz servirá de cátodo e o solo de anodo. Os microrganismos se alimentarão da matéria orgânica através de um processo de redução química que irá liberar elétrons (NITISORAVUT, et. al., 2017) para o meio conforme pode ser visto na Figura 2.

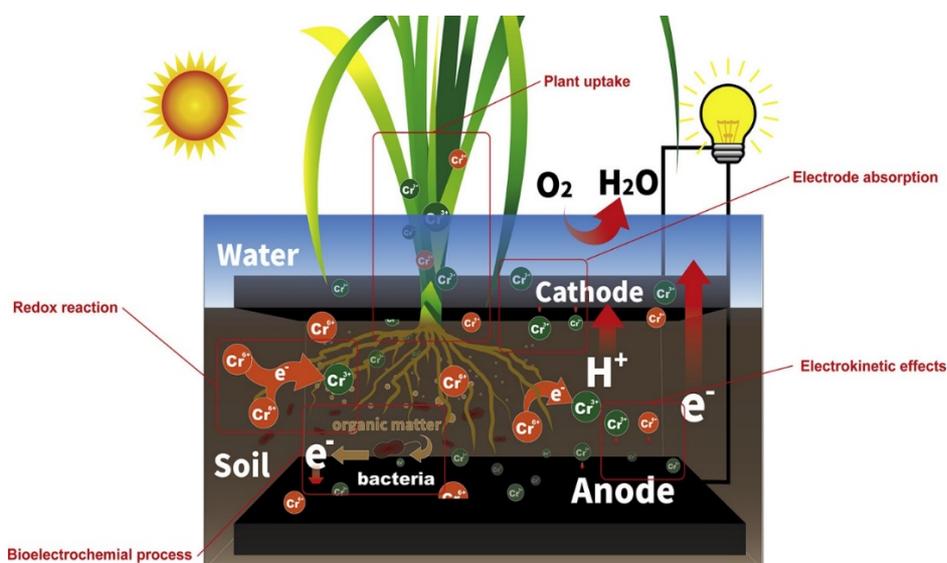


Figura 2. Demonstração do processo completo de geração de energia elétrica a partir do consumo de matéria orgânica fornecida pela planta em decorrência da fotossíntese aos microrganismos presentes no solo. **Fonte:** GUAN, et. al., 2019.

A maioria das células microbianas de combustível utiliza ainda uma membrana para isolar as reações químicas entre o anodo e o catodo maximizando a eficiência ao mesmo tempo em que possibilitam a troca de átomos de hidrogênio entre o anodo e catodo, como na Figura 3. A depender da eficiência da membrana poderá existir um gradiente de pH maior ou menor (STRIK, et. al., 2008).

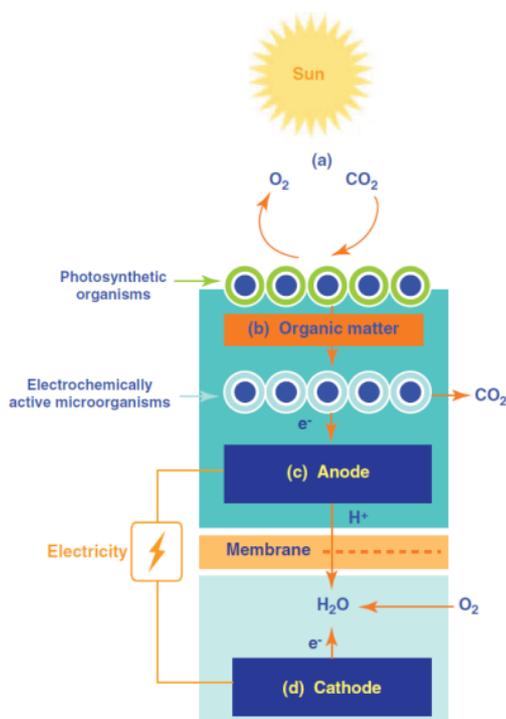
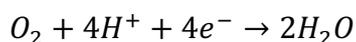


Figura 3. Exemplo de célula microbiana de combustível de planta com membrana entre o anodo e catodo. **Fonte:** HELDER, et. al., 2012, p. 4.

Deve-se atentar para o fato de que os eletrodos devem ser do mesmo material para evitar que a própria estrutura deles seja rapidamente deteriorada pela corrente elétrica resultante da redução química.

Diferentes materiais podem ser empregados nos eletrodos, no entanto, com frequência, tem-se utilizado eletrodos de grafite. O cátodo normalmente disposto na superfície do solo ou próximo dela reduz o oxigênio em moléculas de água (HELDER, et. al., 2012):



Os elétrons decorrentes da atividade biológica próximo as raízes são capturados pelo anodo e completam o circuito através da carga entre os eletrodos. Já os átomos de hidrogênio cedidos pelo anodo podem atravessar a membrana que separa ambos os eletrodos e servir de

matéria-prima para o completar o processo de redução do oxigênio em água descrito anteriormente (PAMINTUAN, et. al., 2020).

Apesar de eletrodos iguais, o meio e a reação a que cada um está vinculado resulta em diferentes capacidades de condução elétrica (HELDER, et. al., 2012).

De acordo com Laursen (2013) é possível destacar as vantagens deste método de geração de energia elétrica, como:

- A não necessidade de poda ou desmatamento para geração de energia;
- Não há necessidade de transporte de material uma vez que a energia é gerada e armazenada no local;
- A potência gerada pela planta é capaz de traduzir a saúde desta e a atividade microbiana do solo, podendo inclusive fornecer dados em tempo real das necessidades/situação em que se encontra o plantio;
- Também é possível utilizar a energia gerada no local pelas células combustíveis (*plant-mfc*) para alimentar, qualquer dispositivo de monitoramento remoto para as mais diversas aplicações;
- Pode ser utilizado em conjunto para monitorar as necessidades do solo para melhor especificação de adubação e, também, para detecção rápida de pragas e consequente melhor utilização de preventivos/pesticidas;
- Não importa o período do dia (dia ou noite), a estação do ano, chuva ou sol, a planta é capaz de gerar energia;
- A planta trabalha intensamente para manter seu pH constante independentemente do pH do solo em que está disposta;
- Apesar de ser baixo o nível de geração, a ininterruptibilidade de geração é uma grande vantagem perante outros recursos. Como quando comparado a energia solar que gera eletricidade apenas em parte do dia e depende de condições climáticas, a eólica com mudanças constantes e muitas vezes bruscas de força e direção dos ventos ou por exemplo a hidrelétrica com as variações no volume de água do reservatório em determinadas épocas do ano, todas influenciando diretamente a capacidade de geração elétrica.

E como qualquer outro método de geração de energia há também algumas desvantagens, das quais surgem oportunidades de estudos e melhorias como: o seu custo inicial ainda é muito

alto, principalmente quando comparado a energia solar e eólica; tetos cobertos, ou como são chamados telhados verdes somente são possíveis em locais com condições adequadas de chuva e baixa evaporação o que limita algumas situações de aplicação (LAURSEN, 2013).

Apesar da potência máxima teórica de $3,2\text{W}/\text{m}^2$, as células testadas até o momento estão longe de atingir essa capacidade de geração (PAMINTUAN, et. al., 2020).

Utilizando plantas da espécie *Spartina Anglica*, HELDER (2012) e colaboradores obtiveram um pico de densidade de potência de $222\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$, o que representa apenas 16% do máximo teórico. Já com a espécie *Arundinella anômala* o pico foi ainda menor: $22\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$, demonstrando que a espécie da planta tem grande impacto na capacidade de geração.

Já para TIMMERS (2010) e colaboradores, em estudos anteriores, o pico de densidade de potência fora de $90\text{mW}\cdot\text{m}^{-2}$ utilizando a espécie *Spartina Anglica*. Neste caso a diferença possivelmente decorre nas diferentes características construtivas da célula utilizada que possuía um anodo menor e grãos de grafite menores que diminuíam a superfície de contato com os microrganismos e conseqüentemente as reações.

Do ponto de vista elétrico, a célula de combustível se comporta como qualquer outro componente elétrico e atinge a maior eficiência na transferência de potência para a carga quando ambas possuem a mesma impedância elétrica (PAMINTUAN, et. al., 2020).

Devido a complexidade das estruturas envolvidas pode ser complexo de se determinar a resistência interna de cada elemento que compõem o p-mfc (Figura 4). No entanto, utilizando novamente o teorema da máxima transferência de potência, pode-se determinar a resistência equivalente do conjunto (HELDER, et. al., 2012).

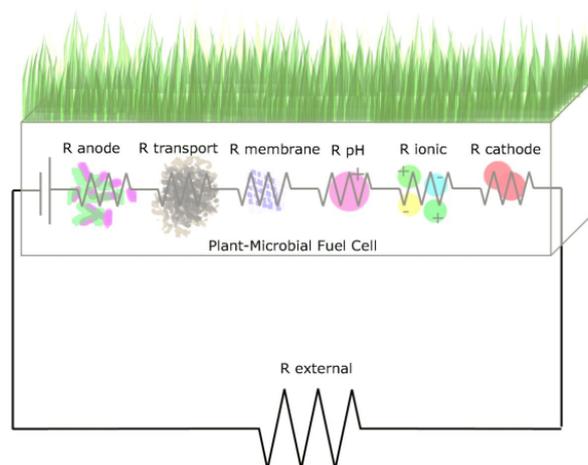


Figura 4. Esquema elétrico demonstrando a contribuição de resistência de cada elemento, onde “R external” representa uma carga qualquer utilizando a p-mfc. **Fonte:** HELDER, et. al., 2012.

Utilizando espécies de solos pantanosos (*Spartina anglica*, *Arundinella anomala* e *Arundo donax*), HELDER e colaboradores (2012) avaliaram a possibilidade de se gerar bioeletricidade simultaneamente a produção de biomassa. O trabalho avaliou o impacto das células a combustível microbiano de planta no desenvolvimento da planta, demonstrando que não houve impacto negativo. O trabalho pode ser visto na Figura 5.

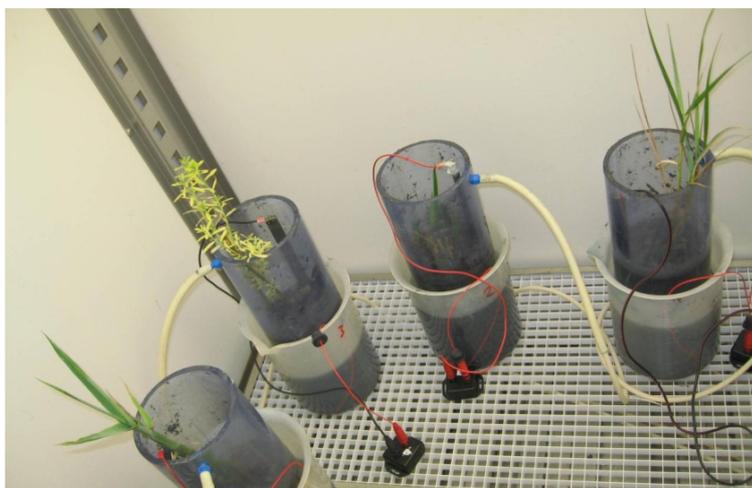


Figura 5. Experimento utilizando plantas individuais para alimentar dispositivos p-mfc de espécies pantanosas. **Fonte:** HELDER, et. al., 2012.

Fora observado que a produção de bioenergia cresceu juntamente com o desenvolvimento das plantas, além de diferença significativa de produtividade entre as espécies (Figura 6 e 7).

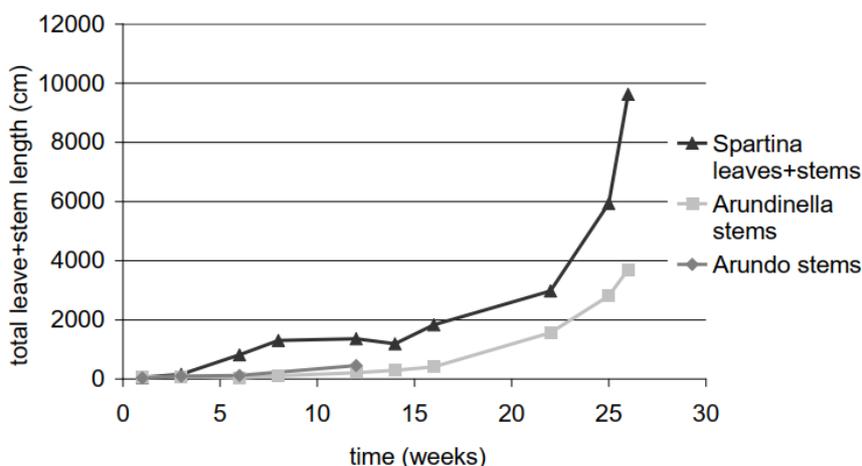


Figura 6. Comparativo de crescimento entre as espécies *Spartina anglica*, *Arundinella anomala* e *Arundo donax*. **Fonte:** HELDER, et. al., 2012.

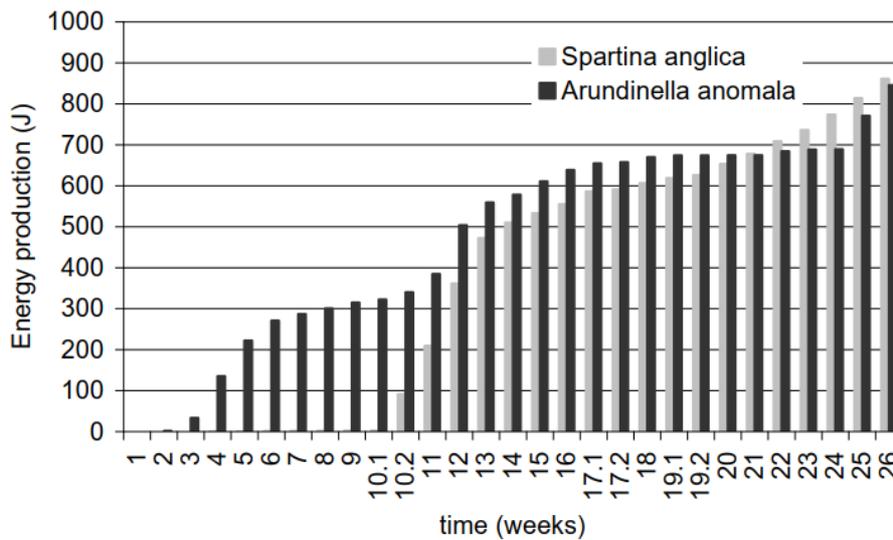


Figura 7. Comparativo de geração elétrica entre as espécies *Spartina anglica*, *Arundinella anomala* e *Arundo donax*. **Fonte:** HELDER, et. al., 2012.

HELDER e colaboradores (2012) destacaram ainda para a maior sensibilidade do catodo ao variar o tamanho da carga alimentada pela célula. A variação tinha o intuito de encontrar a máxima transferência de potência e avaliar as mudanças de resistência interna da célula ao longo do desenvolvimento plantar. No entanto, ficou evidenciado que grande parte da restrição a maior capacidade de potência se devia ao catodo como é possível observar na Figura 8.

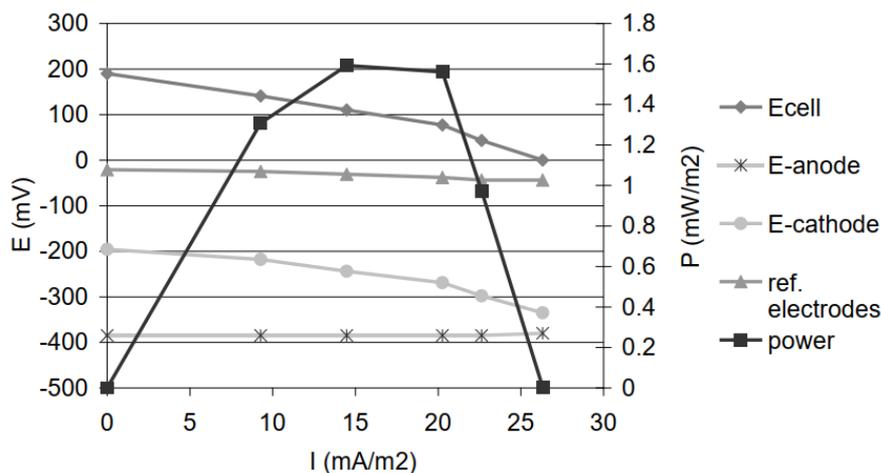


Figura 8. Diferença de potencial elétrico do: anodo (X); catodo (circunferência); célula inteira (losango); eletrodos de referência (triângulo); e densidade de potência da célula (quadrado). **Fonte:** HELDER, et. al., 2012.

Em outro trabalho foram comparadas plantas com tipos de raízes diferentes, esperando encontrar diferenças significativas na quantidade de material rizodepositado e atividade biológica na rizosfera e, por consequência, variações na densidade de potência elétrica resultante (SOPHIA, et. al., 2017).

No experimento de SOPHIA e colaboradores (2017) foram utilizadas as espécies *Brassica juncea*, *Trigonella foenum-graecum* e *Canna-Stuttgart*. A primeira uma mesófito adaptadas a áreas úmidas. A segunda, uma leguminosa da qual se esperava obter maior rizodeposição entre as espécies avaliadas. E, por fim, a *Canna Stuttgart* com raiz tuberosa. Além disso, foram utilizados eletrodos com formatos diferentes, sendo o catodo em forma de escova e com maior superfície de contato se comparado aos eletrodos convencionais. Situação similar com o anodo, que constitui todo o envoltório do solo em que a planta está inserida.

Devido ao alto custo das membranas normalmente utilizadas para a construção da célula, estudos tem buscado por materiais alternativos, como o uso de argila entre os eletrodos (Figura 9) (SOPHIA, et. al., 2017).

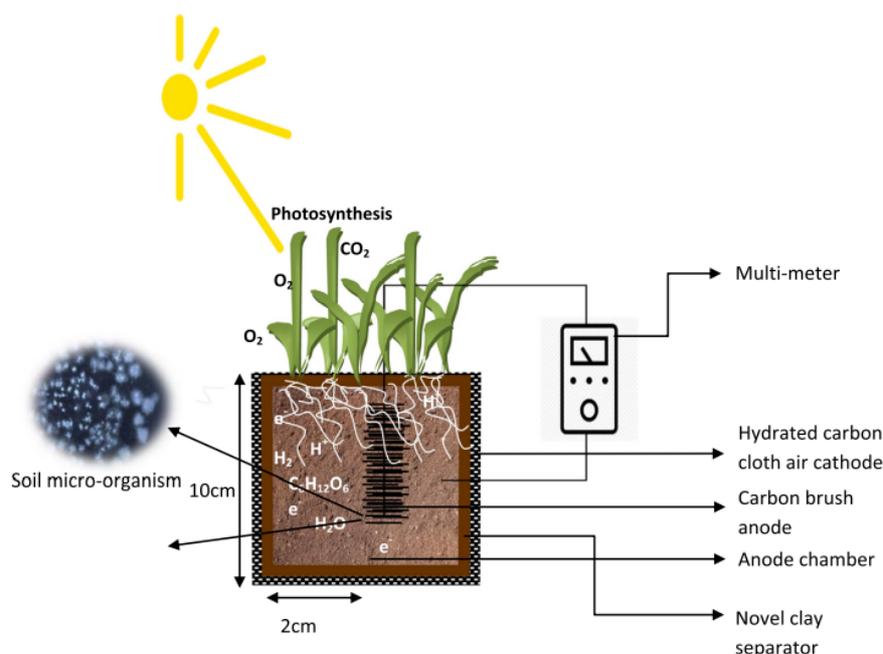


Figura 9. P-MFC com separador de argila e eletrodos com maior superfície de contato. O catodo é em forma de escova e o anodo envolve todo o solo. **Fonte:** SOPHIA, et. al., 2017.

As espécies com maior rizodeposição seguida de maior atividade biológica na rizosfera (Figura 10), coincidiram com a maior geração de bioeletricidade (Figura 11). E mais uma vez ficou demonstrado o impacto do crescimento na capacidade de geração elétrica que cresce ao longo do desenvolvimento plantar (SOPHIA, et. al., 2017).

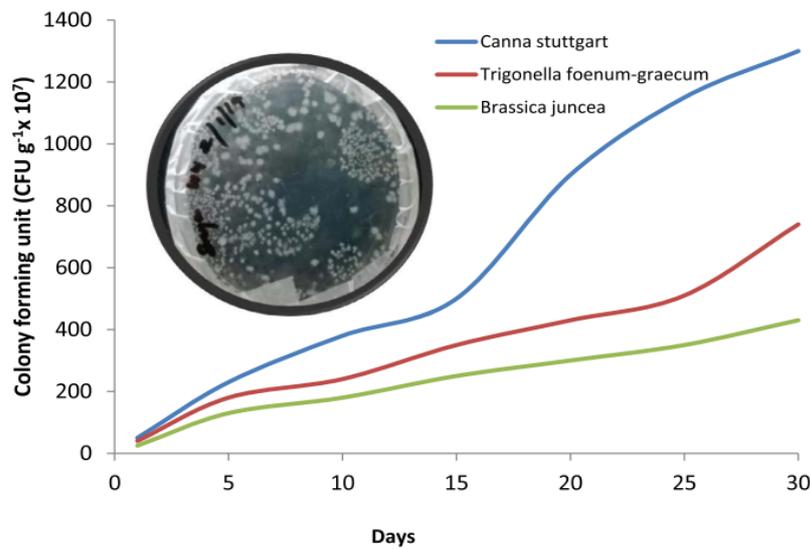


Figura 10. Comparação da quantidade de microrganismos no solo para cada uma das espécies avaliadas ao longo do crescimento. **Fonte:** SOPHIA, et. al., 2017.

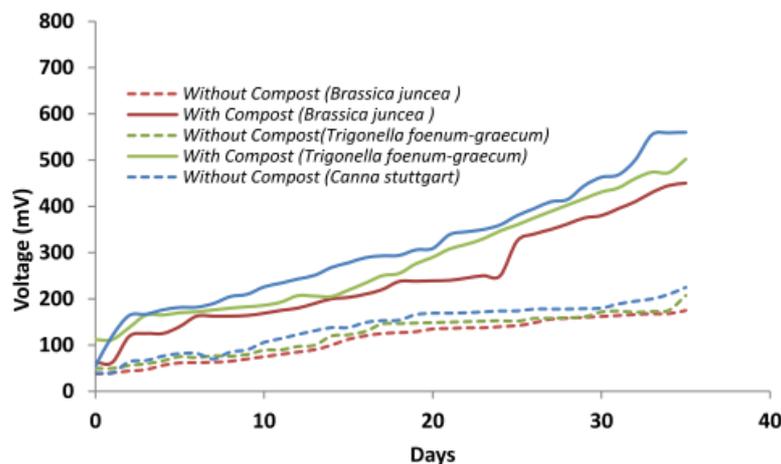


Fig. 3. Effect of compost addition on bio-energy production.

Figura 11. Comparação da diferença de potencial elétrica obtido entre as espécies, com e sem composto orgânico previamente adicionado. **Fonte:** SOPHIA, et. al., 2017.

Percebe-se ainda, pela Figura 11, que o uso de compostos orgânicos previamente ao experimento para preparar o solo, resultou em maior capacidade de geração elétrica. (SOPHIA, et. al., 2017).

Além disso, as plantas que apresentaram maior atividade biológica na rizosfera produziram níveis de tensão elétrica mais estáveis, mesmo se comparada a variabilidade diária influenciada pela irradiância solar em diferentes períodos do dia (Figura 12).

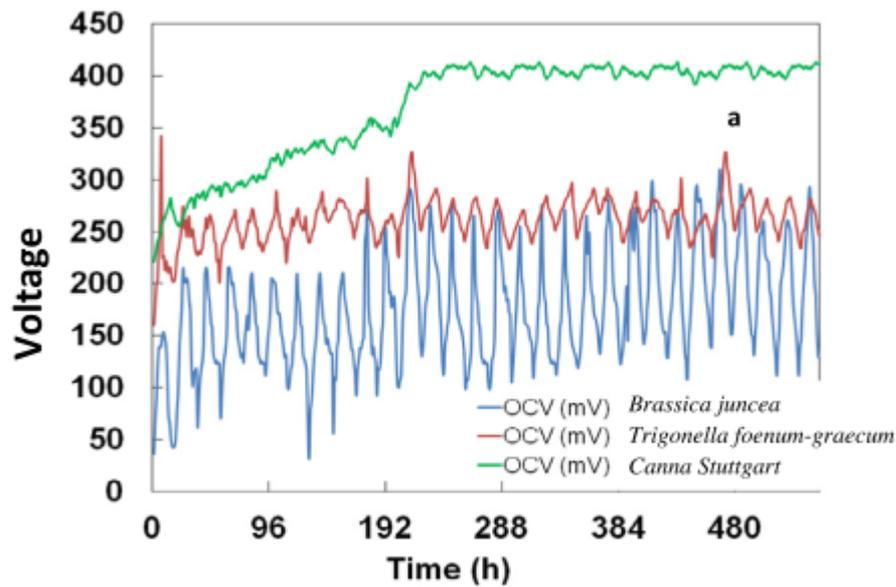


Figura 12. Variação na tensão elétrica produzida pelas espécies *Brassica juncea*, *Trigonella foenum-graecum* e *Canna Stuttgart* ao longo do tempo. **Fonte:** SOPHIA, et. al., 2017.

Os efeitos da associação de células em série ou paralelo também foi observado por PAMINTUAN e colaboradores (2020), em que se pode destacar a maior estabilidade na tensão obtida quando múltiplas células são conectadas em paralelo (Figura 13), bem como o acréscimo de tensão, porém, com oscilações de tensão elétrica expressivas quando associadas em série. Neste estudo foram comparadas as espécies de manjerição e orégano para cada associação de células de combustível.

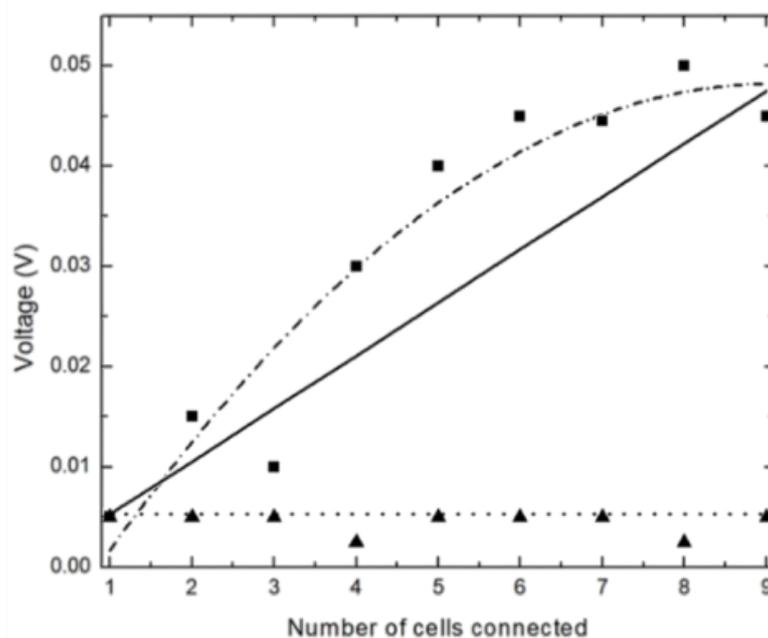


Figura 13. Comparação entre os níveis de tensão elétrica produzidos por diferentes quantidades de células de combustível associadas em série e paralelo. **Fonte:** PAMINTUAN, et. al., 2020.

Além das variações decorrentes da associação de células, fora observada também diferença significativa entre as espécies de manjeriço e orégano avaliadas (Figura 14) por PAMINTUAN e colaboradores (2020).

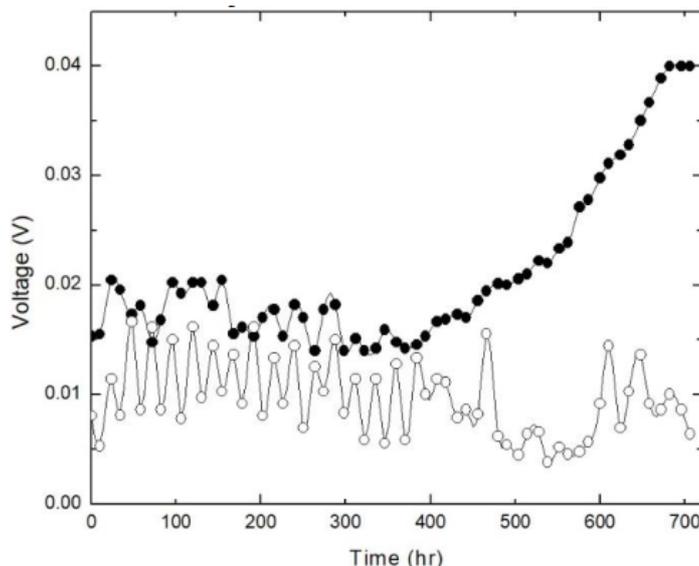


Figura 14: Tensão elétrica produzida pelas espécies de manjeriço (círculo escuro) e orégano (círculo claro) ao longo do desenvolvimento das plantas **Fonte:** PAMINTUAN, et. al., 2020.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Por se tratar de uma tecnologia bastante prematura, pouco se sabe ainda sobre o potencial de obtenção de energia elétrica a partir das células a combustível microbiano de planta (p-mfc).

Os estudos revisados, tem avaliaram principalmente espécies diferentes de plantas ou a associação elétrica de duas ou mais células de combustível como em SOPHIA e colaboradores (2017), a fim de determinar se é ampliar a diferença de potencial elétrico produzido e consequentemente atingir níveis de tensão elétrica que possam ser melhor aproveitados em situações práticas.

No entanto, alguns dos fatores determinantes para a geração elétrica a partir das p-mfc ainda são pouco conhecidos como os tipos de microrganismos que favorecem o sistema como destacado por HELDER e colaboradores (2012).

Ressalta-se ainda que, apesar da baixa potência teórica e da potência real obtida nos experimentos até o momento, nenhum impacto negativo (HELDER, et. al., 2012) fora

observado seja para o desenvolvimento da planta ou na qualidade do solo, o que torna a tecnologia de p-mfc atrativa, já que é possível de ser utilizada paralelamente a geração de biomassa ou demais finalidades da cultura utilizada.

REFERÊNCIAS

BORGES, P. C. A.; SILVA, S. M.; ALVES, T. C.; TORRES, A. E. ENERGIAS RENOVÁVEIS: UMA CONTEXTUALIZAÇÃO DA BIOMASSA COMO FONTE DE ENERGIA. **REDE – Revista Eletrônica do PRODEMA**. Fortaleza, Brasil, v. 10, n. 2, p. 23-36, jul./dez. 2016.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Balanço Energético Nacional – BEM. Brasília: MME, 2015.

FILGUEIRAS, A.; SILVA, T.M.V. Wind energy in Brazil — present and future. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, n.7, v.5, p. 439–451, 2003

FLEXER, V.; MANO, N. From Dynamic Measurements of Photosynthesis in a Living Plant to Sunlight Transformation into Electricity. **Analytical Chemistry**. V 82, n.4, p 1444-1449, 2010.

FURTADO, M. C. **Avaliação das oportunidades de comercialização de novas fontes de energias renováveis no Brasil**. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

GALDINO, M. A.; LIMA, J. H.; RIBEIRO, C. M.; SERRA, E. T. O Contexto das Energias Renováveis no Brasil. **Energias Renováveis**, p. 17-25. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/direng.pdf>. Acesso em: 20. Ago. 2020.

GOLDEMBERG, J. et al. Energias Renováveis. São Paulo: Blucher, 2012.

GOLDEMBERG, J.; L.D. VILLANUEVA. **Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento**. São Paulo: Edusp, 2003 ,2ªed.

GUAN, C.; HU, A.; YU, C. Stratified chemical and microbial characteristics between anode and cathode after long-term operation of plant microbial fuel cells for remediation of metal contaminated soils. **Science of The Total Environment**. v. 670, 2019, p. 585-594.

HELDER, M. **Design criteria for the Plant-Microbial Fuel Cell Electricity generation with living plants – from lab to application**. 148f. Tese (Doutorado em Tecnologia Ambiental). Universidade de Wageningen, Wageningen, Holanda, 2012.

LAURSEN, L. **Plugging in to plant roots**. IEE Spectrum, 29, jan., 2013. Disponível em: <https://spectrum.ieee.org/energy/environment/plugging-in-to-plant-roots>. Acesso em: 20. Ago. 2020.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. O aproveitamento de energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 30, n. 1, 2008.

MATA-GONZÁLEZ, M. G.; DIMAS-RESÉNDIZ, A.; MACHUCA-PULIDO, L. A.; MEDINA-JUÁREZ, M. S. Generación de Electricidad a Base de Fotosíntesis. **Revista de Ciencias Naturales y Agropecuarias**. v. 4, n.12, p. 5-11, 2017.

NITISORAVUT, R.; REGMI, R. Plant microbial fuel cells: A promising biosystems engineering. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. N. 76, p. 81-89., 2017.

PAMINTUAN, K. R. S.; ANCHETA, A. J. G.; ROBLES, S. M. T. Stacking efficiency of terrestrial Plant-Microbial Fuel Cells growing *Ocimum basilicum* and *Origanum vulgare*. E3S Web of Conferences 181, 01004 (2020).

SAXENA, R. C.; ADHIKARI, D. K.; GOYAL, H. B. Biomass-based energy fuel through biochemical routes: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, p. 167-178, 2009

SHAY, E. G. Diesel fuel from vegetable oils: status and opportunity. **Biomass and Bioenergy**, v. 4, n. 4, p. 227-242, 1993.

SOPHIA, A. C.; SREEJA, S. Green energy generation from plant microbial fuel cells (PMFC) using compost and a novel clay separator. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 21, 2017, p. 59–66.

STRIK, D. P. B. T. B.; TIMMERS, R. A.; HELDER, M.; STEINBUSCH, K. J. J.; HAMELERS, H. V. M.; BUISMAN, C. J. N. Microbial solar cells: applying photosynthetic and electrochemically active organisms. *Trends in Biotechnology* 29 (1), p. 41-49. 2008.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6. Ed. Porto Alegre: Artmed, 2017.

YAZDANI, S. S.; GONZALEZ, R. Anaerobic fermentation of glycerol: a path to economic viability for the biofuels industry. **Current Opinion in Biotechnology**, v. 18, p. 213-219, 2007.

ZALK, J. V.; BEHRENS, P. The spatial extent of renewable and non-renewable power generation: A review and meta-analysis of power densities and their application in the U.S. *Energy Policy*. Volume 123, 2018, p. 83-91.