



MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA: TECNOLOGIAS COMPLEMENTARES¹

Jennifer Salgado da Fonseca², Ricardo Lima Serudo³, Maria Cristina dos Santos⁴

Submetido 28/09/2016 – Aceito 04/10/2017 – Publicado on-line 04/01/2018

Resumo

A matriz energética do Brasil se apoia, principalmente, em usinas hidrelétricas e termelétricas, porém as limitações geográficas e de insumos tornam a implementação dessas usinas onerosas. Células a combustível, em especial a célula a combustível microbiano (CCM), tem atraído à comunidade científica pela versatilidade na geração de energia, na qual insumos diversos podem ser utilizados. Além de outras aplicações, tais como: tratamento de efluentes, biorremediação, produção de hidrogênio, biossensor, etc. CCM são dispositivos eletroquímicos que exploram a habilidade de algumas espécies de micro-organismos utilizarem eletrodos como aceptores finais de elétrons em seu metabolismo. Dentro do contexto brasileiro, esta tecnologia se torna atrativa não só para uso em larga escala como também em comunidades mais afastadas das áreas urbanas, onde o abastecimento de energia é precário e oneroso.

Palavras-Chaves: efluentes, energia, CCM, comunidades, micro-organismos.

Brazilian energy matrix: complementary technologies. Brazil's energy matrix relies mainly on hydroelectric and thermoelectric plants, but geographical and input constraints make the implementation of these plants onerous. Fuel cells, especially the microbial fuel cell (MFC), have attracted the scientific community for its versatility in power generation, in which diverse inputs can be used. In addition to other applications, such as: effluent treatment, bioremediation, hydrogen production, biosensor, etc. MFCs are electrochemical devices that exploit the ability of some species of microorganisms to use electrodes as final acceptors of electrons in their metabolism. Within the Brazilian context, this technology becomes attractive not only for large scale use but also in communities further away from urban areas, where energy supply is precarious and costly.

Key-words: wastewater, energy, MFC, communities, microorganisms.

¹Parte da Revisão de Dissertação de Mestrado do primeiro autor em Biotecnologia na Universidade Federal do Amazonas - UFAM, Manaus, AM, Brasil.

²Pesquisadora no HUB – Tecnologia e Inovação, Universidade do Estado do Amazonas – UEA, Manaus – AM, Brasil. E-mail: jennifer_fonseca@hotmail.com.

³Professor Adjunto de Química, da Escola Superior de Tecnologia (EST), da Universidade do Estado do Amazonas – UEA, Manaus - AM, Brasil.

⁴Professora Titular de Imunologia, Laboratório de Imunoquímica, do Departamento de Parasitologia, da Universidade Federal do Amazonas - UFAM, Manaus, AM, Brasil.

1. Introdução

O uso de combustíveis fósseis, especialmente o petróleo e o gás, vem se acelerando e isso desencadeou uma crise energética global, além de aumentar a emissão de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera. A bioenergia renovável é vista como uma das formas de aliviar a atual crise do aquecimento global, além de uma alternativa sustentável para produção de energia (DU; LI; GU, 2007).

A matriz energética do Brasil, ainda depende muito de combustíveis fósseis, apesar de amplo uso de eletricidade advinda de usinas hidrelétricas. Neste contexto, contudo o Brasil faz uso de termelétricas para geração de eletricidade, principalmente na região Amazônica, onde cerca de 93% da eletricidade gerada é proveniente desse modal. Não obstante, o país tem um pujante potencial no que tange a utilização de energias alternativas como a eólica e a solar, apesar das limitações geográficas e altos custos de implementação (BRONZATTI; NETO, 2008; ROSA, 2007; MME, 2016; SANTOS et al., 1999).

Porém, as alternativas ao combustível fóssil não passam apenas pela energia hidrelétrica, eólica ou solar. Em 2002, o Ministério de Ciência e Tecnologia criou o Programa Brasileiro de Hidrogênio e Sistemas Células a Combustível, em parceria com Universidades e Centros de pesquisa, com o objetivo de promover ações integradas e cooperadas, que viabilizassem o desenvolvimento nacional da tecnologia de hidrogênio e de sistemas Célula a Combustível, além de dar suporte ao desenvolvimento e ao estabelecimento de indústrias nacionais especializadas em Células a

Combustível. Esse Ministério previu que Células de Hidrogênio estariam incorporadas na matriz energética até 2020, (LINARDI, 2011), contudo pouco se fez até então no país. No contexto internacional os progressos foram mais vistosos e, atualmente, já existem projetos pilotos e apostas para utilização comercial num futuro próximo, principalmente como insumo energético para transporte (ALAVI et al, 2017; WILBERFORCE et al, 2017).

Células a Combustível são dispositivos capazes de converter energia química (proveniente de muitas fontes) em energia elétrica de forma contínua e direta, produzindo água como subproduto. A maioria destas células conta com ao menos dois eletrodos: catodo (positivo) e o anodo (negativo), separados por eletrólitos e conectados por um circuito externo. As reações para a geração de energia ocorrem nesses eletrodos (CALIMAN, 2013; KIRUBAKARAN et al., 2009; ZEN, 2008).

Dentre os tipos de Células a Combustível, há a Célula a Combustível Microbiano (CCM) em que são usadas bactérias eletroativas (Figura 1), isto é, capazes de realizar a transferência de elétrons para o meio extracelular, naturalmente, durante a metabolização de compostos orgânicos (glicose, ácidos graxos, lactato, etc.) e de metais no ambiente ao oxidarem uma grande variedade de ácidos carboxílicos de cadeia curta e longa, a fim de criar equivalentes de redução, que podem ser externalizados pelas cascatas de citocromo de membrana externa para receptores de elétrons solúveis e insolúveis (FITZGERALD et al., 2012; PEIXOTO, 2012; RACHINSKI et al, 2010).

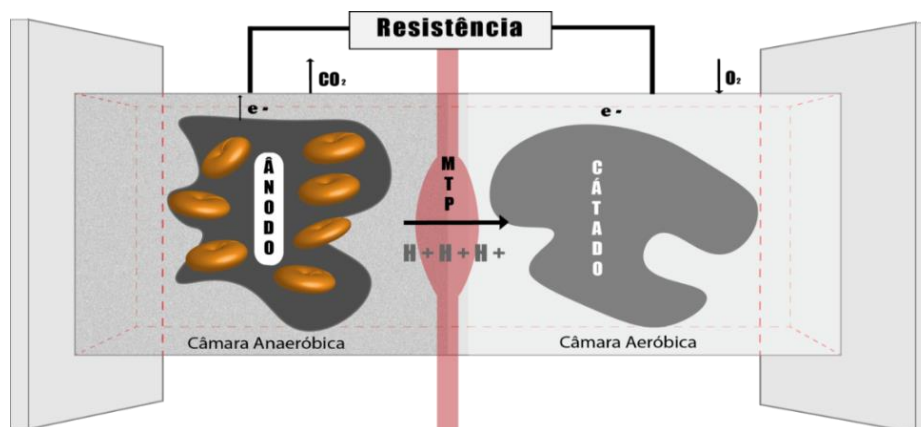


Figura 1: Esquema representativo de uma Célula a Combustível Microbiano, onde na câmara anaeróbica contém o anodo, a cultura microbiológica e o composto orgânico a ser degradado, gerando elétrons (e^-) e prótons (H^+). Os prótons transpassam a membrana de troca de próton (MTP) para a câmara aeróbica contendo catodo.

Os gêneros de bactérias mais comuns utilizados em CCM são: *Shewanella*, *Geobacter* e *Rhodoferrax*, os quais são, normalmente, encontradas em sedimento marinho ou fluvial, além de esgotos (RACHINSKI et al., 2010; TENDER, 2002).

Com o intuito de reduzir custos e melhorar a eficiência, há estudos com diversos eletrodos (platina, grafite, alumínio, ouro, etc.), membranas (Nafion e nafion modificado por uma zeólita Y, polipropileno) e materiais para a construção do protótipo (PET, acrílico, poliacetal, vidro, etc.), porém a combinação de matérias também precisam levar em consideração a bactéria, o ambiente em que vai ser implementado e o composto orgânico utilizado como substrato (OH; LOGAN, 2005; LOGAN et al., 2007; LOUREIRO, 2005; SPIEGEL, 2007; TELEKEN, 2013; ZEN, 2008).

2. Material e Método

A pesquisa bibliográfica que subsidiou a presente revisão foi baseada na consulta de trabalhos publicados nos últimos 20 anos (1997 a 2017), obtidos nas seguintes bases de dados Científicos: *Scopus*, *Science Direct*, *Pubmed* e *SciELO*. Além destes, também foram consultados o banco de dados do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada), CDEAM (Centro de Desenvolvimento Energético Amazônico) e Ministério de Minas e Energia.

Como termos de busca foi utilizado “*Microbial FuelCell*”, “*Alternativas energéticas*”, “*Célula a combustível microbiano*” e “*Energy efficiency*”.

3. Panorama Energético no Brasil

A demanda energética de um país está fortemente correlacionada com sua atividade econômica, ou seja, o Produto Interno Bruto (PIB). A medida desta correlação é dada pela intensidade energética do país, isto é, o quanto de energia é consumida em média no país em um dado período (LIMA et al., 2014).

No Brasil, na década de 90, apesar do pouco crescimento em relação ao PIB, a taxa de consumo e oferta de energia foi alta, o que poderia representar um entrave futuramente para a retomada rápida da trajetória de crescimento econômico sustentável, uma vez que o país não teria como investir no desenvolvimento da infraestrutura e tecnologia se não tivesse um

crescimento econômico significativo (BRONZATTI; NETO, 2008; PIRES et al., 2001).

Quinze anos foram necessários para que a economia no Brasil se estabilizasse (1995 – 2010), havendo oscilações no crescimento do PIB. Apesar de o cenário aparentar não propício, houve investimentos nas fontes de energia renováveis como a eólica e, em menor escala, a solar (IBGE, 2010).

O Brasil está passando por uma crise político-financeira histórica desde meados de 2015, que só no primeiro trimestre de 2017 começou a demonstrar sinais de melhora, graças aos setores agropecuário e industrial (IPEA, 2017).

Segundo Lucon e Goldemberg (2009) em seus relatos sobre a crise financeira que assolava outros países, uma das estratégias para superá-la está no setor energético, ao criar oportunidades para fontes renováveis e a descentralização da produção de energia, o que representa uma oportunidade de investimentos em Células a Combustível.

O Brasil faz parte do grupo de países em que a produção de eletricidade é proveniente, em sua maior parte, de usinas hidroelétricas. Correspondendo a 62% da capacidade instalada em 2014, geraram 82.789MW, mais do que o requerido pelo Sistema Interligado Nacional–SIN, proporcionando autossuficiência na geração de energia elétrica a baixos custos (TOLMASQUIM, 2016).

Em 2015, as usinas hidrelétricas continuaram sendo o carro-forte de geração de energia do país (Figura 2), ficando em segundo lugar as usinas termoeletricas. Estas atuam, principalmente, como uma fonte auxiliar de abastecimento, ficando inoperantes em uma fração significativa do ano na maioria das regiões brasileiras, fornecendo energia, basicamente, a pedido do ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) (MME, 2016; SIQUEIRA, 2012).

Essas usinas, de um modo geral são pouco usadas pelo fato de suas turbinas possuírem poucos fabricantes (nenhum brasileiro), o preço do gás natural é relativamente alto e atrelado ao dólar, que tem alcançado valores cada vez mais altos, e a emissão de gases, que podem aumentar 7% ao ano até 2030, caso a utilização das termelétricas cresça (SIQUEIRA, 2012; TOLMASQUIM et al., 2007; TOLMASQUIM, 2016). Contudo no Amazonas, esse é o principal modal de geração de energia

elétrica, sendo assim a energia elétrica uma das mais caras do país.

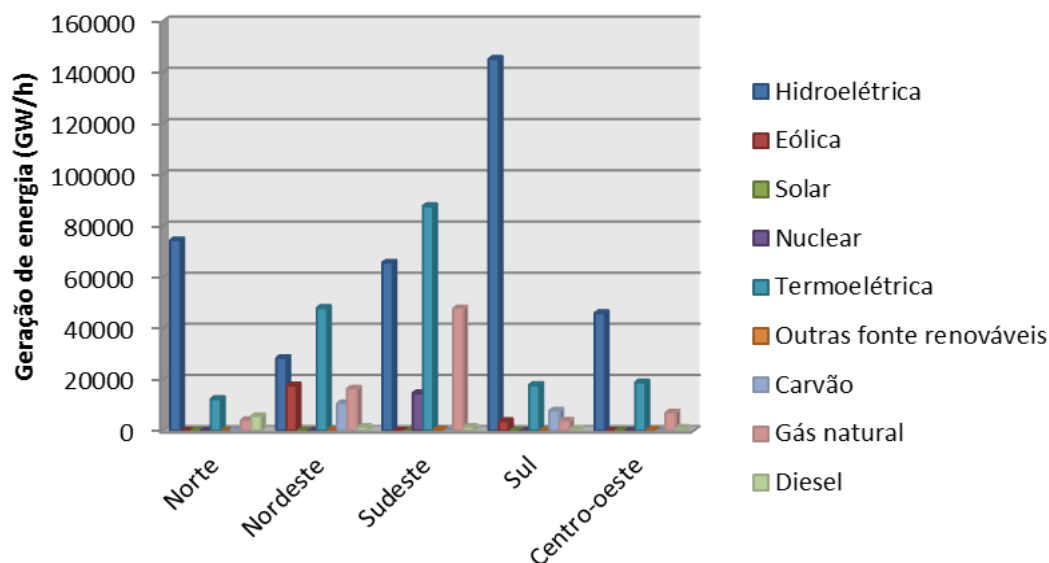


Figura 2: Perfil de produção de energia em cada região do Brasil no ano de 2015.
Fonte: Adaptado de MME, 2016.

Os dados apresentados na Figura 2, mostram a região Sudeste como o maior produtor de energia termoeletricas. Isso ocorre pelo fato de haver uma grande produção e importação de gás natural, a qual é desviada para as termoeletricas com a finalidade de diminuir os custos (TOLMASQUIM, 2016).

Como alternativas sustentáveis, o Brasil tem explorado o potencial da energia eólica e solar. Em relação à eólica, parte desse potencial pode ser aproveitado, comercialmente, nos litorais do Nordeste, Sudeste e Sul do país. Já em relação à solar, apesar do potencial, ainda são necessários investimentos em tecnologia para redução dos custos de implantação e geração de energia (BRONZATTI; NETO, 2008; ROSA, 2007; SANTOS et al., 1999).

Devido à configuração do panorama energético do país, onde nem todas as cidades tem acesso às tecnologias convencionais de fornecimento de energia e a falta de projetos que prevejam esse acesso, deu-se início a estudos para implantação de alternativas energéticas, focando principalmente nos Estados que compõem a Amazônia Legal: Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima, Tocantins, Maranhão e Goiás (RODRIGUES et al., 2006; SILVA et al., 2010).

O mercado de energia elétrica da região Amazônica pode ser subdividido em três tipos (SOUZA, 2003):

1. *Mercado das Capitais*: como o próprio nome sugere, é o mercado das capitais de cada Estado, onde, em sua maioria, é atendido por parques hidrotérmicos (hidroelétricas e termelétricas), de propriedade de concessionárias federais;
2. *Mercado Elétrico Concentrado*: é representado pelas áreas urbanas dos municípios do interior dos Estados e pequenas localidades que estão nas proximidades das capitais, atendidos por unidades termelétricas a óleo diesel, de médio porte com redes locais, de responsabilidade de concessionária estadual ou por empresas terceirizadas;
3. *Mercado Elétrico Disperso*: representados por parte da população localizadas em áreas longínquas dos Estados, que não tem acesso à eletricidade ou possuem pequenos geradores a diesel de propriedade do município, gerando eletricidade para alguns usos específicos.

Para atender as necessidades de cada um desses mercados, são necessários estudos separados, uma vez que a realidade de cada um é bem distinta, principalmente a do *Mercado Elétrico Disperso* (SOUZA, 2003).

As principais razões para que essas populações não estejam cobertas pela rede elétrica

convencional são as distâncias necessárias para atender a demanda de consumidores de baixo consumo, barreiras naturais e a falta de interesse dos serviços públicos de energia, devido aos altos custos envolvidos (MARTINS et al., 2008 in SILVA et al., 2010). Além disso, ainda têm barreiras burocráticas pois, parte dessa população pertence as comunidades tradicionais, ou moram em áreas de reservas indígenas, ou extrativista de fauna ou flora, ou de desenvolvimento sustentável, que possuem legislação específica para cada caso (MARTINS et al., 2008 in SILVA et al., 2010; SOUZA, 2003).

Neste cenário, foi criado o Projeto NERAM (Modelo de Negócio de Energia Elétrica em Comunidades Isoladas no Amazonas) que se propôs buscar uma solução para o suprimento energético de comunidades isoladas, pelo uso de recursos naturais renováveis disponíveis localmente (FREITAS et al., 2006; SOUZA, 2003).

Além dessa iniciativa, existe o programa “Luz para todos” do Ministério de Minas e Energia (MME) que é executado por ações do INCRA – Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária (INCRA, 2017).

Células a Combustível, em especial a Célula a Combustível Microbiano, diante deste cenário, poderiam somar como tecnologias alternativas tanto para o uso em localidades distantes como para abastecimento de grandes centros, seja na Amazônia ou em outra região similar no globo.

4. Células a Combustível

Células a Combustível são dispositivos capazes de converter energia química (proveniente de muitas fontes) em energia elétrica de forma contínua e direta, produzindo água como subproduto. Uma célula típica conta com a participação de dois eletrodos: catodo (positivo) e o anodo (negativo), separados por eletrólitos e conectados por um circuito externo. As reações para a geração de energia ocorrem nesses eletrodos (CALIMAN, 2013; KIRUBAKARAN et al., 2009; ZEN, 2008).

Apesar de o conceito existir há mais de 160 anos, somente em 1959 a primeira Célula a Combustível foi construída com sucesso por Francis Bacon (BACON, 1960 in ZEN, 2008).

Os estudos e investimentos empregados nessa tecnologia se devem às suas principais características: confiabilidade, alta eficiência, baixa (ou nenhuma) emissão de poluentes e pouco

ruído durante seu funcionamento (SPIEGEL, 2007). Em contrapartida, temos como sua principal desvantagem os altos custos para a confecção das células, pois materiais como o eletrodo de platina e membranas funcionais do tipo Nafion® têm custos altíssimos. Muitos estudos visam novos materiais de baixo custo, como a membrana a base de polipropileno (ZEN, 2008).

Sabendo das limitações das tecnologias energéticas atuais (hidrelétrica, eólica, solar, etc.), foi elaborado, no Brasil, o Programa Brasileiro de Hidrogênio e Sistemas de Célula a Combustível, em 2002, visando incorporar as Células a Combustível na matriz energética do país até 2020, porém os protótipos e estudos de implementação ainda estão em desenvolvimento (LINARDI, 2011).

Em 2013, Silva e colaboradores simularam um projeto-piloto da implantação de um sistema híbrido fotovoltaico/Células de hidrogênio no Estado de Tocantins, levando em consideração as condições climáticas do local em um período de um ano. Pelos resultados, a tecnologia oferece menos custos que o sistema a diesel e necessita de menos manutenção, porém não era economicamente viável pela baixa produção de hidrogênio no país, além do alto custo dos painéis solares.

Ainda que necessitem de muitos estudos e testes para implantar estas células, já há indicativos das aplicações de acordo com cada tipo de célula como, por exemplo, energia portátil, energia reserva, transporte e energia estacionária (SPIEGEL, 2007).

4.1 Tipos de Células a Combustível

As Células a Combustível são classificadas de acordo com a escolha do eletrólito e do combustível (Figura 3), mas também podem ser separadas pela temperatura em que operam (KIRUBAKARAN et al., 2009; LINARDI et al., 2011; VILLULLAS et al., 2002; SPIEGEL, 2007). Podemos citar:

- *Célula a Combustível Alcalina (AFC)*: o eletrólito é uma solução concentrada de KOH (30-50% m/m), operando a 80°C. Foi desenvolvida, originalmente, para o uso da NASA para a simultânea produção de energia e água, porém seu desempenho foi afetado por CO₂;
- *Célula a Combustível de Ácido Fosfórico (PAFC)*: o eletrólito é o ácido fosfórico

concentrado (90-100% m/m), operando entre 160°C a 220°C, está com o desenvolvimento mais avançado;

- *Célula a Combustível Biológico (BFC)*: converte energia bioquímica em eletricidade usando como catalisador um agente biológico (micro-organismo ou enzima) e utiliza como eletrólito uma membrana polimérica, operando em temperatura ambiente ($\pm 30^\circ\text{C}$);
- *Célula a Combustível de Carbonato de Molten (MCFC)*: o eletrólito é uma mistura de carbonatos de lítio, potássio e sódio, operando entre 600°C e 800°C;
- *Célula a Combustível de Membrana de Troca de Prótons (PEMFC)*: ao contrário das demais células, utiliza como eletrólito uma membrana polimérica, como o Nafion®. Normalmente, atuam entre 85°C e 105°C, porém há entre seus subtipos as que operam em temperaturas mais amenas;
- *Célula a Combustível de Metanol Direto (DMFC)*: Essa célula foge à classificação por eletrólito, sendo classificada pelo seu combustível, o metanol. Seu sistema é baseado nas PEMFC, então usa como eletrólito uma membrana e opera entre 60°C e 120°C;
- *Célula a Combustível de Óxidos Sólidos (SOFC)*: o eletrólito é elaborado com um composto cerâmico sólido de óxido de zircônia estabilizado com óxido de ítrio. Atua em elevadas temperaturas (800-1000°C) e possui uma eficiência entre 60-80% de aproveitamento dos óxidos para converter em eletricidade.

4.2 Células a Combustível Microbiano

A primeira CCM foi proposta por Potter, em 1910, sendo composta por um eletrodo aniônico e um catiônico, similar a uma bateria comum. Estas se enquadram no tipo de Célula a Combustível Biológico (BFC) e possuem diferentes tipos.

Dentre os tipos de CCM que já foram desenvolvidas, a mais tradicional é a de duas câmaras, uma anaeróbica (ânodo) e outra aeróbica (cátodo), sendo separadas por uma membrana de troca de prótons (BELAFI-BAKO et al., 2014).

As CCM possuem aplicações potenciais nos campos de biorremediação, tratamento de águas residuais, biossensores e bioenergia. Estes sistemas também permitem o estudo da fisiologia microbiana e do metabolismo energético sob condições redox controladas, tornando-as ferramentas efetivas para explorar mecanismos de transferência de elétrons extracelulares em comunidades microbianas mistas e culturas puras (BRETSCHGER et al, 2010).

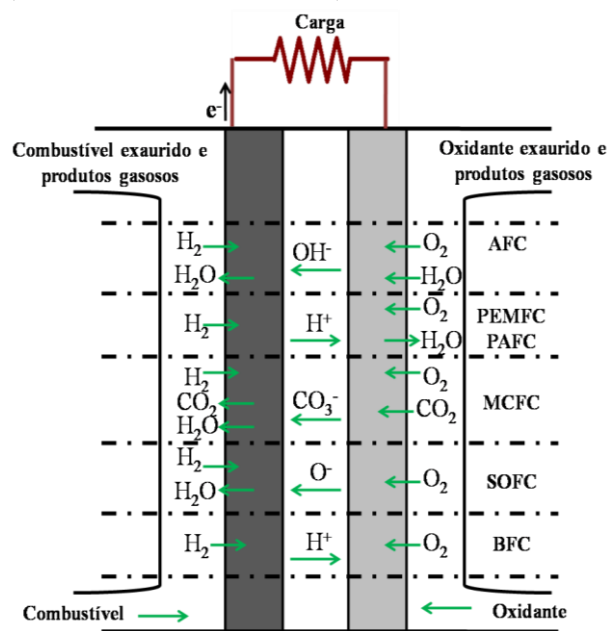


Figura 3: Esquema simplificado dos principais tipos de Células a Combustível. Fonte: Adaptado de LINARDI, 2011 e SPIEGEL, 2007

4.2.1 Categorias

Mahadevan, Gunawardena e Fernando, em 2014, listam cinco categorias de CCM:

- *Desacoplada*: um compartimento separado onde os organismos produzem o hidrogênio (combustível) e que o hidrogênio é alimentado em uma pilha de combustível do hidrogênio;
- *Integrada*: produção de hidrogênio e de eletricidade na mesma câmara;
- *Com transferência de elétrons mediada*: na qual moléculas mediadoras (ubiquinonas, corantes e/ou metais) transferem elétrons de células microbianas para o eletrodo;
- *Com transferência de elétrons direta*: nesta a transferência de elétrons para o eletrodo ocorre sem a presença de qualquer molécula mediadora;

- **Microfluídica:** é um tipo emergente de CCM que elimina o uso de mediadores e membranas de troca catiônica.

Na busca por alta eficiência, há uma variedade vasta de *design* e materiais propostos atendendo as necessidades de testes de prova de conceito até protótipos mais robustos de caráter comercial (Figura 4).

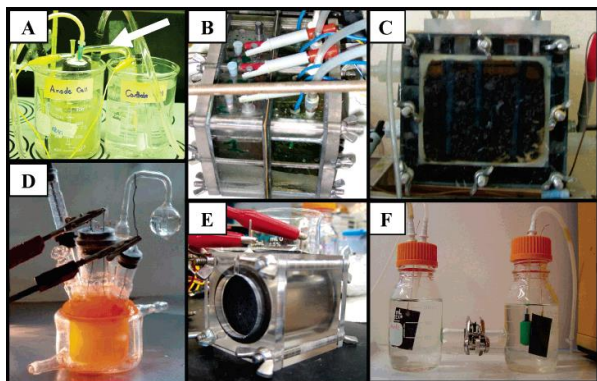


Figura 4 – Tipos de protótipo/*design* de CCM utilizados em estudos com diferentes configurações e materiais: (A) sistema construído facilmente contendo uma ponte de sal (mostrada pela seta); (B) quatro CCM em lote onde as câmaras são separadas pela membrana (sem tubo) e mantidas juntas por parafusos; (C) igual a B, mas com um ânodo com fluxo contínuo (matriz de grafite granular) e colocação de ânodo-cátodo próximo; (D) CCM fotoheterotrófica; (E) sistema de câmara única e ar-cátodo em um simples arranjo de "tubo"; (F) sistema de tipo H de duas câmaras que mostra câmaras de ânodo e cátodo equipadas para a pulverização de gás. Fonte: LOGAN et al, 2007.

Dependendo da fase em que o projeto está, os pesquisadores optam por materiais de baixo custo e baixa durabilidade, como garrafas PET, a fim de obter os dados necessários para projetar uma célula mais adequada (NWOGU, 2007; OH; LOGAN, 2005; 2006; LOUREIRO, 2005; PARK; ZEIKUS, 2002; SPIEGEL, 2007).

A escolha do tipo de CCM com a qual vai se trabalhar vai depender não apenas do composto orgânico e da bactéria de estudo, mas também dos materiais disponíveis e a geografia do local (clima, altitude, etc.) para reduzir os custos e maximizar a eficiência energética (LINARDI, 2011, SPIEGEL, 2007). Por exemplo, se há um protótipo feito com algum material metálico (alumínio, ferro, etc.) com uma eficiência acima de 70% de conversão do composto orgânico em energia ambientada entre 25-30°C. Por ser de metálico, não se recomenda

aplicar em regiões litorâneas, pois a maresia diminui a vida útil por causar corrosão do material.

Ainda com o mesmo exemplo, se empregado em regiões com temperaturas mais baixas (5-20°C), a eficiência de conversão pode cair drasticamente, pois o micro-organismo utilizado não está adaptado para essas temperaturas.

Nos dois casos, as taxas para manter o padrão de funcionamento aumentariam, podendo não valer a pena o investimento. Portanto, antes de iniciar qualquer empreendimento, é importante ponderar os vários aspectos além dos técnicos.

4.2.2 Interferências eletroquímicas

Durante o planejamento para construir um protótipo de qualquer célula eletroquímica, seja microbiana ou outro tipo, há alguns questionamentos que devem ser respondidos para diminuir a perda de energia gerada, aumentando a sua eficiência.

No caso das CCM, é necessário o mínimo de conhecimento do metabolismo da cultura microbiana, seja ela pura ou de um consórcio de micro-organismos.

Não é incomum o uso de espécimes não identificadas para compor um consórcio, porém as culturas coletadas, normalmente, são isoladas e diluídas não somente para a identificação das espécies, mas também para conhecer a simbiose entre estes organismos de forma atingir o equilíbrio mais vantajoso para aplicar nas CCM (ZHI et al, 2014).

Se possível, é interessante saber quais espécimes estão sendo utilizadas, pois colabora nas respostas dos demais questionamentos como se há necessidade de adicionar algum carreador químico no meio, se algum material é tóxico para a cultura, temperatura de trabalho, etc. Na impossibilidade, os primeiros passos são para modelar as melhores condições.

Outro detalhe importante que deve ser levado em consideração é composição da fonte de carbono, uma vez que pode interferir diretamente nas reações eletroquímicas. Seus componentes podem interferir no transporte de massas e na polarização do sistema, elevando a resistência interna da célula e em baixa conversão de energia (KIM et al, 2000; MAHADEVAN; GUNAWARDENA; FERNANDO, 2014; TELEKEN, 2013).

Um dos componentes capazes de interferir eletroquimicamente é o sódio (Na) no

compartimento anódico, que pode reduzir até 45% da eficiência da célula (KIELY et al, 2010).

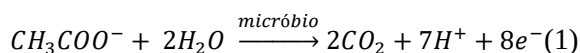
De acordo com Rabaey e colaboradores, em 2010, uma das soluções para diminuir a resistência interna da célula e a sua polarização é aumentar o fluxo de oxigênio na câmara com o cátodo. Alguns autores, também recomendam o uso de eletrólitos salinos tal como o ferrocianeto ($C_6N_6FeK_4$), principalmente (KIELY et al, 2010; NUNES, 2010; TELEKEN, 2013).

4.2.3 Fonte de carbono

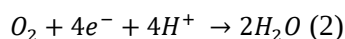
O princípio dessa tecnologia é utilizar micro-organismos para degradar e oxidar os compostos orgânicos como óleos graxos, amido, esgoto doméstico, gorduras animais e vegetais, glicose entre outros na câmara anaeróbica e gerar elétrons (e^-) e prótons (H^+), isto é, converter energia química gerada pela degradação da fonte biológica em energia elétrica (DU et al., 2007; HE; ANGENT, 2006).

Se por exemplo usarmos o acetato como fonte de carbono, as reações típicas nos eletrodos ocorreram como mostradas abaixo.

- Reação no ânodo:



- Reação no cátodo:



O dióxido de carbono é produzido como um produto da oxidação dos compostos orgânicos na câmara anaeróbica, porém não há emissão líquida de carbono, pois o dióxido de carbono presente na biomassa degradada vem, originalmente, da atmosfera no processo de fotossíntese (DU; LI; GU, 2007).

Os elétrons gerados são carreados do ânodo ao cátodo por um circuito externo, enquanto os prótons permeiam a membrana de troca de prótons para migrar para a câmara aeróbica, onde ocorre a redução do oxigênio à água. A geração de corrente elétrica é tornada possível mantendo os micro-organismos separados do oxigênio ou qualquer outro terminal aceitador do terminal diferente do ânodo e isso requer uma câmara anódica anaeróbia (CARVALHO, 2010; DU; LI; GU, 2007; PEIXOTO, 2012; YADAV et al., 2012).

Como fonte de carbono, já foram utilizados substratos puros como glicose, lactato e ácidos graxos, assim como compostos complexos como

efluente industrial (rico em sacarose), sedimentos marinhos e óleo de fritura (FONSECA, 2013; FREGUIA et al, 2010; LOVLEY, 2006; RABAEY, 2005);

Uma vez selecionado o tipo de substrato que será empregado na CCM, é importante levar em consideração o processo metabólico de adaptação e assimilação do micro-organismo do estudo, pois diferentes micro-organismos vão responder diferentemente (NWOGU, 2007).

Dentre os micro-organismos mais empregados, estão as bactérias chamadas de eletroativas que podem ser empregadas isoladamente ou em consórcio com outros micro-organismos para a simultânea degradação do composto orgânico e geração de energia (Figura 5).

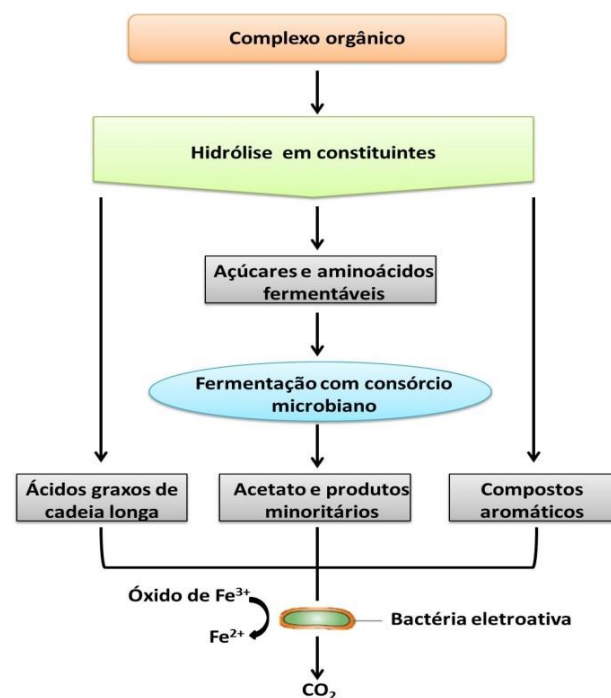


Figura 5 – Via geral para a oxidação anaeróbica de complexos orgânicos a dióxido de carbono com óxidos de Fe^{3+} como carreador de elétrons. Fonte: Adaptado de LOVLEY, 2006.

4.3 Bactérias eletroativas

Desulfuromonas acetoxidans foi a primeira bactéria eletroativa descrita com capacidade de oxidar um composto orgânico com transferência de elétrons diretamente no eletrodo, porém membros do gênero *Desulfuromonas* são pouco empregados atualmente. Espécies dos gêneros *Geobacter*, *Shewanella* e *Rhodospirillum rubrum* são as principais bactérias eletroativas empregadas em CCM,

tanto em culturas puras quanto em uma mistura para formar o consórcio (DEBABOV, 2008; RACHINSKY, 2010).

O gênero *Geobacter*, normalmente, utiliza ácidos orgânicos simples como fonte de carbono, mas não metaboliza açúcares. Isto a torna, relativamente, limitada nas aplicações em CCM. Pode-se nomear a *G. metallireducens* e *G. sulfurreducens* como as principais espécies representantes do gênero (DEBABOV, 2008).

O gênero *Shewanella* é considerado um modelo de estresse ambiental por sua capacidade de adaptabilidade aos ambientes extremados e o uso de diversas fontes de carbono (FURUKAWA; DALE, 2013; FONSECA, 2013; HAN; GRALNICK, 2007; RODIONOV et al, 2011).

Dentre as espécies do gênero, a *Shewanella putrefaciens* conquistou o interesse de muitos pesquisadores por possuir, em condições anaeróbicas, uma quantidade anormal de citocromos do tipo C, quando comparadas com as demais espécies do seu gênero, o que representa uma vantagem para a entrega de elétrons pelo método direto (contato bactéria-eletródo) (DEBAVOV, 2008; GAO et al, 2010).

Além da *Shewanella putrefaciens*, a *S. oneidensis* também é amplamente empregada em estudos em Células a Combustível Microbiano, porém há uma espécie do gênero que foi isolada na foz do Rio Amazonas, *S. amazonensis*, que vem apresentando alguns resultados promissores não apenas na aplicação em CCM, mas na produção de algumas moléculas como a alfa-manosidade (CARMONA-MARTINEZ et al, 2011; LAROCHE; ROY, 2009; MOTOIGI; OKUYAMA, 2011; PARNEL et al, 2011; RINGEISEN et al, 2006; VENKATESWARAN et al, 1998). Infelizmente, esta espécie, apesar de ter sido isolada no Brasil, não foi encontrada em nenhum acervo microbiológico no país até o momento.

Rhodoferrax é um gênero, relativamente, novo, então não há muitas espécies do gênero identificadas e testadas em CCM. A *Rhodoferrax ferrireducens* é a espécie, atualmente, empregada em CCM e possui a habilidade de oxidar completamente a glicose e transferir os elétrons para o eletródo em condições de temperatura que variam entre 4 a 30°C e em condições anaeróbicas (DEBANOV, 2008; RACHINSKY et al, 2010).

4.3.1 Sistema de transporte de elétrons

A transferência de elétrons para o meio extracelular por bactérias eletroativas ocorre, naturalmente, durante a metabolização de compostos orgânicos e de metais no ambiente, ao oxidarem uma grande variedade de ácidos carboxílicos de cadeia curta e longa, a fim de criar equivalentes de redução que podem ser externalizados pelas cascatas de citocromo de membrana externa para receptores de elétrons solúveis e insolúveis (FITZGERALD et al., 2012; PEIXOTO, 2012).

Os elétrons são entregues à matriz extracelular a partir do periplasma por um complexo de porina-citocromo que atravessa a membrana externa. Os primeiros estudos, referentes aos citocromos do gênero *Shewanella* sp, foram realizados por Myers, Myers e Nealson (1988, 1990, 1992, 1997, 2000), indicando que o transporte de elétrons é facilitado por um tipo específico de citocromo C, o CymA (RABAEY et al., 2010; MARRIT et al., 2012).

O CymA é expresso constitutivamente, mas regulado quando o fumarato, nitrato ferro (III) ou um eletródo servem como aceitador terminal de elétrons (Figura 6). A formação transitória de complexos de CymA redutase facilita a distribuição de elétrons que estão na quinona para os demais citocromos C (MtrC e OmcA), os quais fazem parte de um conjunto complexo de citocromo transmembranar envolvendo mais de 40 proteínas e desempenham um papel-chave no mecanismo de transferência de elétrons (MYERS; MYERS, 2000; CARMONA-MARTINEZ et al., 2012; MARRIT et al., 2012).

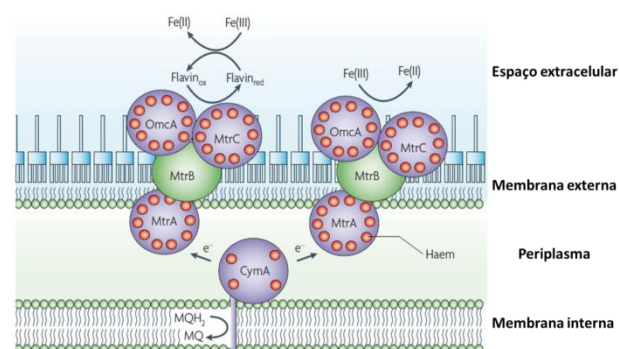


Figura 6 – Cascata de citocromos responsáveis pelo sistema de transporte de elétrons do gênero *Shewanella*, no qual ocorre a redução de Fe de forma indireta (uso de flavinas) e direta.

Fonte: Adaptado de FREDRICKSON et al., 2008.

Independentemente da natureza e localização do receptor de elétrons terminal, o ciclo redox de Q (quinona) e sua forma reduzida de elétrons QH₂ (quinol) na membrana interna é fundamental para a conservação da energia respiratória da bactéria. Os elétrons provenientes da metabolização de alguma molécula orgânica são levados à redução de Q a QH₂, sendo então dirigidos para o periplasma pelo CymA, podendo, assim, serem entregues a eletrodos sólidos sem a necessidade de mediadores redox (MARRIT et al., 2012; OKAMOTO et al., 2012).

Colocando esse maquinário bioquímico a favor da geração de novas tecnologias, foi elucidado que há três formas de se transferir elétrons para eletrodos (Figura 7): por contato direto, formando um biofilme, por meio de suas fímbrias (nanofios) e/ ou pela produção ou a utilização de pequenas moléculas solúveis (carreadores químicos) que atiram elétrons do lado de fora da membrana celular para os terminais dos receptores de elétrons (GORBY et al., 2006; RABAEY et al., 2010; CARMONA-MARTINEZ et al., 2012).

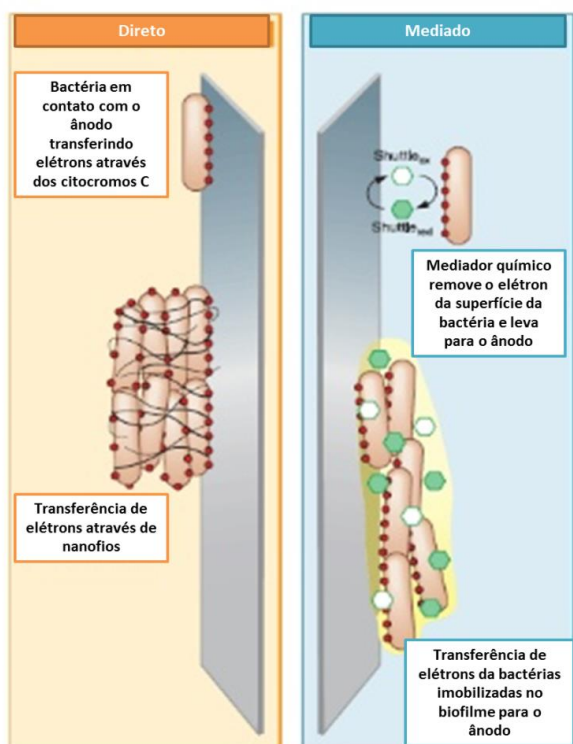


Figura 7- Esquema ilustrativo do sistema de transporte de elétrons de bactérias eletroativas por métodos diretos e mediados. Fonte: Adaptado de SALGADO, 2009.

O gênero *Shewanella*, assim como o *Geobacter*, possui o citocromo C, localizado

comumente na membrana externa da bactéria, podendo também estar no periplasma e membrana interna, pois participam de vias de transferência de elétrons, criando um potencial elétrico que é aproveitado em Células a Combustível Microbiano para gerar energia (CARMONA-MARTÍNEZ et al., 2012; MEYER et al., 2004; PARNEL et al., 2011; RABAEY et al., 2010).

5. Cenário mundial

A primeira CCM funcional e operante foi reportada, em 2008, por Leonard Tender e colaboradores nos Estados Unidos. O dispositivo foi desenvolvido para usar os micro-organismos presentes no mar e, como fonte de carbono, sedimento marinho com a finalidade de ser a única fonte de alimentação de boias meteorológicas, sustentando uma potência de 36 mW, o que equivale 26 baterias alcalinas por ano (TENDER et al., 2008 in FRANKS; NEVIN, 2010).

Isso acarretou um tipo de furor no mundo, renovando o fôlego para a continuação das pesquisas em novos métodos e *designs*. Uma das evidências é o crescimento de equipes ao redor do globo que usam como tema CCM para participar de uma competição internacional de biologia sintética, o IGEM (International Genetically Engineered Machine).

Criada em 2003 no MIT (Massachusetts Institute of Technology), a competição abriga times que modificam organismos geneticamente para uma infinidade de usos, sendo alguns mais práticos do que outros.

No contexto da competição, podem-se citar algumas das equipes que se aventuraram a desenvolver CCM, tais como: Harvard (2008), Missouri Miners (2010) –Estados Unidos, Bielefeld - Alemanha (2013), Manaus – Amazonas – Brasil (2013), SCAU-China (2014), Westminster (2015) e New Castle (2016) Estados Unidos. Não apenas empregaram as bactérias eletroativas (*Shewanella* e *Geobacter*), como também usaram *Escherichia coli* modificada em modelos diversos de CCM com fontes de carbono diversas: água do mar, meio de cultura bacteriana comercial, glicerol, efluente, óleo de fritura, lactato, etc. (IGEM, 2008; 2013; 2015; 2016).

6. Considerações finais

Uma vez que Células a Combustível Microbiano fazem uso de rejeitos orgânicos (efluente industrial, óleos de fritura, esgoto, etc.) como substratos para os micro-organismos

eletroativos, oferecem maior versatilidade de insumos, além de não emitirem CO₂, tornando-a altamente atrativa para compor a matriz energética do país.

Mesmo com resultados, aparentemente, não tão eficientes nos últimos anos, o potencial que a CCM carrega é palpável e a corrida para o desenvolvimento de novos *designs* e formulações aproxima cada vez mais o futuro em que essas estarão inseridas no cotidiano da sociedade. Mas, para isso ser possível, são necessárias medidas não apenas técnico-científicas, mas também políticas e sociais, criando leis e regulamentos adequados e conscientização da população para remover alguns preconceitos, que possam existir, devido ao uso de bactérias em sua composição.

7. Divulgação

Este artigo é inédito e não está sendo considerado para qualquer outra publicação. O(s) autor(es) e revisores não relataram qualquer conflito de interesse durante a sua avaliação. Logo, a revista *Scientia Amazonia* detém os direitos autorais, tem a aprovação e a permissão dos autores para divulgação, deste artigo, por meio eletrônico.

8. Referências

ALAVI, F.; LEE, E. P.; WOUW, N.; SCHUTTER, B.; LUKSO, Z. Fuel cell cars in a microgrid for synergies between hydrogen and electricity networks. **Applied Energy**, vol. 192, p. 296-304, 2017;

BACON, F.T. The high pressure hydrogen-oxygen fuel cell. **Fuel Cells**, vol. 52, 1960;

BELAFI-BAKO, K.; VAJDA, B.; BAKONYI, P.; NEMESTOTHY, N. Removal of COD by two-chamber Microbial Fuel Cells. In: WANG, C. (org). **Technology and Application of Microbial Fuel Cells**. INTECH, p. 77- 87, 2014;

BRETSCHGER, O.; CHEUNG, A. C. M.; MANSFELD, F.; NEALSON, K. H. Comparative microbial fuel cell of *Shewanella* spp. **Electroanalysis**, vol. 22, p. 883-894, 2010;

BRONZATTI, F.L.; NETO, A.I. **Matrizes Energéticas no Brasil: cenário 2010-2030**. XXVII Encontro Nacional de Engenharia da Produção, Rio de Janeiro, RJ, 2008;

CALIMAN, C.C. **Estudo da eletro-oxidação de alcoóis em catalisadores do tipo PtSnNiTi para aplicação em células a combustível**. Dissertação de Mestrado em Química, Vitória – UFES, 2013;

CARMONA-MARTÍNEZ, A.A.; HARNISCH, F.; KUHLCHE, U.; NEU, T.R.; SCHRÖDER, U. Electron transfer and biofilm formation of *Shewanella putrefaciens* as function of anode potencial. **Bioelectrochemistry**, 2012;

CARVALHO, T.J.L. **Estudo da produção de energia elétrica a partir de uma célula de combustível microbiana**. Dissertação de Mestrado (Mestrado Integrado em Engenharia Química), Universidade do Porto, 2010;

COSTA, R.A.; CASOTTI, B.P.; AZEVEDO, R.L.S. Um Panorama da Indústria de Bens de Capital relacionados à Energia Eólica. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, 2009;

COSTA, V.T.R. **Avaliação comparativa de impactos ambientais entre pequenas e grandes centrais hidrelétricas: estudo de caso na bacia hidrográfica do rio Itabapoana, Macaé – RJ**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental, 2015;

COUTINHO, L.; FERRAZ, J. C. **Estudo da competitividade da indústria brasileira**. 4 ed. Campinas: Papirus, 2002;

CROCCO, M.A.; SANTOS, F.; FIGUEIREDO, A. Exclusão financeira no Brasil: uma análise regional exploratória. **Revista de Economia Política**, vol. 33, 2013;

DALL'AGNOL, A.; LAZAROTTO, J.J.; HIRAKURI, M. H. **Desenvolvimento, Mercado e Rentabilidade da Soja Brasileira**. Circular Técnico – EMBRAPA, 2010.

DEBABOV, V. G. Electricity from microorganisms. **Microbiology**, vol. 77, p.123-131, 2008;

DU, Z.; LI, H.; GU, T.; A state of the art review on microbial fuel cells: a promising technology for waste water treatment and bioenergy. **Biotechnology Advances**, vol. 25, p. 464-482, 2007;

FEARNSIDE, P.M. **Hidrelétricas na Amazônia: Impactos ambientais e sociais na tomada de decisões sobre grandes obras**. INPA, 2015;

FITZGERALD, L.A.; PETERSEN, E.R.; RAY, R.I.; LITTLE, B.J.; COOPER, C.J.; HOWARD, E. C.; RIGEISEN, B.R.; BIFFINGER, J.C. *Shewanella oneidensis*MR-1 Msh pilin proteins are involved in extracellular electron transfer in microbial fuel cells. **Process Biochemistry**, 2012;

FONSECA, J.S. **Degradação de óleos de fritura residual (OFR) por *Shewanella putrefaciens* para produção de eletricidade**. Trabalho de



Conclusão de Curso em Biotecnologia, UFAM – Manaus, 2013;

FRANKS, A.; NEVIN, K. P. Microbial fuel cells, a current review. **Energies**, vol. 3, p. 899-819, 2010;

FREDRICKSON, J. K.; ROMINE, M. F.; BELIAEV, A. S. et al. Towards environmental systems biology of *Shewanella*. **Nature Reviews**, 2008;

FREGUIA, S.; TEH, E. H.; BOON, N.; LEUNG, K. M.; KELLER, J.; RABAEY, K. Microbial fuel cells operating on mixed fatty acids. **Bioresource Technology**, vol. 101, p. 1233-1238, 2010;

FREITAS, K.T.; SOUZA, R.C.R.; SEYE, O.; SANTOS, E.C.S.; XAVIER, D.J.C.; BACELLAR, A.A. Custo de geração de energia elétrica em comunidade isolada do Amazonas: estudo preliminar do projeto NERAM. **Revista Brasileira de Energia**, vol. 12, 2006;

FURUKAWA, Y.; DALE, J.R. The surface properties of *Shewanella putrefaciens* 200 and *S. oneidensis* MR-1: the effect of pH and terminal electron acceptors. **Geochemical transactions**, vol. 14, 2013;

GAO, H.; BARUA, S.; LIANG, Y.; WU, L.; DONG, Y.; REED, S.; CHEN, J.; CULLEY, D.; KENNEDY, D.; YANG, Y.; HE, Z.; NEALSON, K. H.; FREDRIKSON, J.K.; TIEDJE, J. M.; ROMINE, M.; JHOU, J. Impacts of *Shewanella oneidensis* c-type cytochromes on aerobic and anaerobic respiration. **Microbiology and Biotechnology**, vol. 3, p. 455-466, 2010;

GORBY, Y.A.; YANINA, S.; MCLEAN, J.S. ROSSO, K.M.; MOYLES, D. et al. Electrically conductive bacterial nanowires produced by *Shewanella oneidensis* strain MR-1 and other microorganisms. **PNAS**, vol. 103, 2006;

HAU, H.H.; GRALNICK, J.A. Ecology and Biotechnology of the Genus *Shewanella*. **Annual Reviews of Microbiology**, 2007;

HE, Z.; ANGENENT, L. T. Application of Bacterial Biocathodes in Microbial Fuel Cells. **Electroanalysis**, 2006;

IGEM. **Bielefeld-Germany**, 2013. Disponível em <<http://2013.igem.org/Team:Bielefeld-Germany>>. Acessado em 02 de setembro de 2017;

IGEM. **Harvard**, 2008. Disponível em <<http://2008.igem.org/Team:Harvard/Hardware>>. Acessado em 02 de setembro de 2017;

IGEM. **Manaus-Amazonas-Brazil**, 2013. Disponível em

<http://2013.igem.org/Team:Manaus_Amazonas-Brazil>. Acessado em 02 de setembro de 2017;

IGEM. **Missouri Miners**, 2010. Disponível em <http://2010.igem.org/Team:Missouri_Miners>. Acessado em 02 de setembro de 2017;

IGEM. **New Castle**, 2016. Disponível em <<http://2016.igem.org/Team:Newcastle>>. Acessado em 02 de setembro de 2017;

IGEM. **SCAU-China**, 2014. Disponível em <<http://2014.igem.org/Team:SCAU-China>>. Acessado em 02 de setembro de 2017;

IGEM. **Westminster**, 2015. Disponível em <<http://2015.igem.org/Team:Westminster>>. Acessado em 02 de setembro de 2017;

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, **Indicadores de Desenvolvimento Humano**, Rio de Janeiro, 2010;

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa de Inovação Tecnológica (PINTEC 2011)**. Rio de Janeiro, 2014;

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Carta de conjuntura nº34**, 2017. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/cartadeconjuntura/>. Acessado em 04 de abril de 2017;

INSTITUTO NACIONAL DE COLONIZAÇÃO E REFORMA AGRÁRIA. **Infraestrutura**. Disponível em <http://www.incra.gov.br/infraestrutura_assentamentos>. Acessado em 02 de setembro de 2017.

KIELY, P. D.; CALL, D. F.; YATES, M. D.; REGAN, J. M.; LOGAN, B.E. Anodic Biofilms in microbial fuel cells harbor low numbers of higher-power-production bacteria than abundant genera. **Bioenergy and Biofuels**, vol. 88, 2010;

KIM, N.; CHOI, Y.; JUNG, S.; KIM, S. Effect of initial carbon sources on the performance of microbial fuel cells containing *Proteus vulgaris*. **Biotechnology and Bioengineering**, vol. 70, 2000;

LAUROUCHE, A.; ROY, P. H. Analysis by mutagenesis of a chromosomal integrin integrase from *Shewanella amazonensis* SB2BT. **Journal of Bacteriology**, vol. 191, p. 1933-1940, 2009;

LIMA, M.T.S.L.; SOUZA, M.C.; FLORES, T.S.; et al. Sobre a Situação Energética Brasileira: De 1970 a 2030. **Ciência e Natura**, vol. 37, 2014;

LINARDI, M. Hidrogênio e células a combustível: Programa brasileiro de I&D. **Ciência & Tecnologia dos Materiais**, vol. 23, 2011;

LOGAN, B.; CHENG, S.; WATSON, V.; ESTADT, G. Graphite Fiber brush anode for increased power production in Air-cathode microbial fuel cell. **Environment Science Technology**, vol. 41, p. 3341-3346, 2007;

LOUREIRO, F. A. M. **Desenvolvimento de um material avançado para aplicação como eletrólito de uma célula combustível do tipo PEM: uma nova opção para o uso de gás.** Trabalho de Conclusão de Curso em Química, Rio de Janeiro, 2005;

LOVLEY, D. R. Bug juice: harvesting electricity with microorganisms. **Nature Reviews**, vol. 4, p. 497 – 508, 2006;

LOWER, B.H.; YOUNGSUNTHON, R.; SHI, L.; WILDLING, L.; GRUBER, H. et al. Antibody recognition force microscopy shows that outer membrane cytochromes OmcA and MtrC are expressed on the exterior surface of *Shewanella oneidensis* MR-1. **Applied Environmental Microbiology**, vol. 75, 2009;

LUCON, O.; GOLDEMBERG, J. Crise financeira, energia e sustentabilidade no Brasil. **Estudos Avançados**, vol. 23, 2009;

MAHADEVAN, A.; GUNAWARDENA, D. A.; FERNANDO, S. Biochemical and electrochemical perspectives of the anode of a microbial fuel cell. In: WANG, C. (org). **Technology and Application of Microbial Fuel Cells**. INTECH, p. 13- 32, 2014;

MARRIT, S.J.; LOWE, T.G.; BYE, J.; McMILLAN, D.G.G.; SHI, L.; FREDRICKSON, J. et al. A functional description of CymA, an electron-transfer hub supporting anaerobic respiratory flexibility in *Shewanella*. **Biochemistry Journal**, 2012;

MARTINS, F.R.; PEREIRA, E.B.; ABREU, S.L.; COLLE, S. Solar energy scenarios in Brazil. Part one: resource assessment. **Energy Policy**, vol. 36, 2008;

MATIAS-PEREIRA, J.; KRUGLIANSKAS, I. Gestão de inovação: a lei de inovação tecnológica como ferramenta de apoio às políticas industrial e tecnológica do Brasil. **RAE-eletrônica**, v. 4, n. 2, Art. 18, 2005;

MEYER, T.E. TSAPIN, A.I.; VANDENBERGHE, I.; DE SMET, L.; FRISHMAN, D. NEALSON, K.H. CUSANOVICH, M.A.; VAN BEEUMEN, J.J. Identification of 42 possible cytochrome c genes in the *Shewanella oneidensis* genome and

characterization of six soluble cytochrome. **OMICS-aIntegr. Biol.**, vol. 8, 2004;

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Balanço energético nacional 2016: ano base 2015. **Empresa de Pesquisa Energética**, 2016;

MORAIS, J.M. **Uma avaliação de programas de apoio financeiros à inovação tecnológica com base nos fundos setoriais e na lei de inovação.** Cap. 2 in NEGRI, J.A.; KUBOTA, L.C. (org). Políticas de Incentivo à Inovação Tecnológica no Brasil. Brasília – IPEA, 2008;

MORTON, O. The dream that failed: Special Report Nuclear Energy. **The Economist**, 2012;

MOTOIGI, T.; OKUYAMA, H. Fatty acid and hydrocarbon composition in tropical marine *Shewanella amazonensis* SB2B. **Journal of Basic Microbiology**, vol. 51, p. 494-489, 2011;

MYERS, C.R.; MYERS, J.M. Cloning and Sequence of cymA, a Gene Encoding a Tetraheme Cytochrome c Required for Reduction of Iron(III), Fumarate and Nitrate by *Shewanella putrefaciens* MR-1. **Journal of Bacteriology**, vol. 179, 1997;

MYERS, C.R.; MYERS, J.M. Isolation and sequence of omcA, a gene encoding a decaheme outer membrane cytochrome c of *Shewanella putrefaciens* MR-1, and detection of omcA homologs in other strains of *S. putrefaciens*. **Biochimia et Biophysica Acta**, 1998;

MYERS, C.R.; MYERS, J.M. Localization of cytochromes to the outer membrane of anaerobically grown *Shewanella putrefaciens* MR-1. **Journal of Bacteriology**, vol. 174, 1992;

MYERS, C.R.; MYERS, J.M. Role of the Tetraheme Cytochrome CymA in Anaerobic Electron Transport in Cells of *Shewanella putrefaciens* MR-1 with Normal Levels of Menaquinone. **Journal of Bacteriology**, vol. 182, 2000;

MYERS, C.R.; NEALSON, K.H. Microbial reduction of manganese oxides: interactions with iron and sulfur. **Geochim. Cosmochim. Acta**, vol. 52, 1988;

MYERS, C.R.; NEALSON, K.H. Respiration-linked proton translocation coupled to anaerobic reduction of manganese (IV) and iron (III) in *Shewanella putrefaciens* MR-1 **Journal of Bacteriology**, vol. 172, 1990;

NUNES, G. M. F. **Caracterização de pilha de combustível de hidrogênio e monitorização de célula individual.** Dissertação de Mestrado



em Engenharia Mecânica, Universidade Técnica de Lisboa, 2010;

NWOGU, N. G. Microbial fuel cell and parameters affecting performance when generating electricity. **Basic Biotechnology eJournal**, vol. 3, p. 73-79, 2007;

OH, S.; LOGAN, B.E. Hydrogen and electricity production from a food processing wastewater using fermentation and microbial fuel cell technologies. **Water Research**, vol. 39, p. 4673-4682, 2005;

OH, S.; LOGAN, B. Proton exchange membrane and electrode surface areas as factors that affect power generation in microbial fuel cells. **Applied Microbiology and Biotechnology**, vol. 70, p. 162-169, 2006;

OKAMOTO, A.; HASHIMOTO, K.; NAKAMURA, R. Long-range electron conduction of *Shewanella* biofilms mediated by outer membrane C-types cytochromes. **Bioelectrochemistry**, vol. 85, p. 61-65, 2012;

PARK, D. H.; ZEIKUS, J. G. Improved fuel cell and electrode designs for producing electricity from microbial degradation. **Biotechnology and Bioengineering**, vol. 81, 2003;

PARNEL, J.J.; CALLISTER, S.J.; ROMPATO, G.; NICORA, C.D.; PAS'A-TOLIC, L.; WILLIAMSON, A.; PFRENDER, M.E. Time-course analysis of the *Shewanella amazonensis* SB2B proteome in response to sodium chloride shock. **Nature: Scientific reports**, 2011;

PEIXOTO, L.J.S. **Microbial Fuel Cells for autonomous systems: Kinetics and technological advances in wastewater treatment and sensor applications**. Tese de Doutorado em Engenharia Química e Biológica. Universidade de Minho, 2012;

RABAEY, K.; ANGENET, L.; SCHRÖDER, U.; KELLER, J. **Bioelectrochemical Systems: from extracellular electron transfer to biotechnological application**. IWA publishing, 1ª ed., 2010;

RACHINSKI, S.; CARUBELLI, A.; MANGONI, A.P.; MANGRICH, A.S. Pilhas de combustíveis microbianas utilizadas na produção de eletricidade a partir de rejeitos orgânicos: uma perspectiva do futuro. **Química Nova**, Vol. 33, 2010;

RINGEISEN, B. R.; HENDERSON, E.; WU, P. K.; PIETRON, J.; RAY, R.; LITTLE, B.; BIFFINGER, J. C.; JONES-MEEHAN, J. High power density from a miniature microbial fuel cell using *Shewanella*

oneidensis DSP10. **Environment Science Technology**, vol. 40, p. 2629-2634, 2006;

RODIONOV, D.A.; NOVICHKOV, P.S.; STAVROVSKAYA, E.D.; RODIONOVA, I.A. et al. Comparative genomic reconstruction of transcriptional networks controlling central metabolism in the *Shewanella* genus. **BMC Genomics**, 2011;

RODRIGUES, M.; XAVIER, D.; SOUZA, R.; SEYE, O.; SANTOS, E.; FREITAS, K; MORAES, M. O projeto NERAM – modelo de negócio de energia elétrica em comunidades isoladas na Amazônia. **Enc. Energ. Meio Rural**, 2006;

SALGADO, C. A. Microbial fuel cells powered by *Geobacter sulfurreducens*. **Basic Biotechnology**, vol 5, 2009;

SANTOS, R.R.; MERCEDES, S.S.P.; SAUER, I.L. A reestruturação do setor elétrico brasileiro e a universalização do acesso ao serviço de energia elétrica. **Revista Brasileira de Energia**, 1999;

SILVA, S.B.; OLIVEIRA, M.A.G.; SEVERINO, M.M. Economic evaluation and optimization of a photovoltaic-fuel cell-batteries hybrid system for use in the Brazilian Amazon. **Energy Policy**, 2010;

SILVA, S.B.; SEVERINO, M.M.; OLIVEIRA, M.A.G. A stand-alone hybrid photovoltaic, fuel cell and battery system: a case study of Tocantis, Brazil. **Renewable Energy**, vol. 57, 2013;

SIQUEIRA, J.C. **Análise de Técnicas para Controle de Energia Elétrica para Dados de Alta Frequência: Aplicação à Previsão de Carga**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica – PUC-RJ, 2012;

SOUZA, R.C.R. Energias alternativas: Desafios e possibilidades para a Amazônia. **T&C Amazônia**, 2003. Disponível em: http://amazonialivre.org/energias_alternativas.pdf

SPIEGEL, C.S. **Designing & Building Fuel Cells**. McGraw-Hill, 1ª ed., 2007;

TELEKEN, J. T. **Modelagem matemática da geração de corrente elétrica em uma célula combustível microbiana inoculada com micro-organismos marinhos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Alimentos, Florianópolis, UFSC, 2013;

TENDER, L.; GRAY, S.; GROVEMAN, E.; LOWY, D.; KAUFFMA, P.; MELHADO, R.; TYCE, R.; FLYNN, D.; PETRECCA, R.; DOBARRO, J. The first demonstration of a microbial fuel cell as a viable



power supply: Powering a meteorological buoy. **J. Power Sourc.**, vol. 179, p. 571–575, 2008;

TENDER, L.M.; REIMERS, C.E.; STECHER III, H.A. HOLMES, D. E.; BOND, D.R.; LOWY, D.A.; POLIBELLO, K.; FERTIG, J.S.; LOVLEY, D.R. Harnessing microbially generated power on the sea floor. **Nature Biotechnology**, v. 20, 2002;

TOLMASQUIM, M. T. **Energia Termelétrica: gás natural, biomassa, carvão e nuclear**. EPE – Rio de Janeiro, 2016;

TOLMASQUIM, M.T.; GUERREIRO, A.; GORINI, R. Matriz energética brasileira. **Novos Estudos**, vol. 79, 2007;

TURINI, E. **Conjuntura do Açaí**. CONAB, 2016. Disponível em http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_05_09_11_55_19_conjuntura_de_acai_a_br_-16-1.pdf;

VENKATESWARAN, K.; DOLLHOPF, M. E.; ALLER, R.; STACKEBRANDT, E.; NEALSON, K. E.

Shewanella amazonensis sp: a novel metal-reducing facultative anaerobe from Amazonian shelf muds. **Internacional Journal of Systematic Bacteriology**, vol. 48, p. 965-972, 1998;

VILLULLAS, H.M.; TICIANELLI, E.A.; GONZÁLEZ, E.R. Células a combustível: energia limpa a partir de fontes renováveis. **Química Nova na Escola**, 2002;

WILBERFORCE, T.; EL-HASSAN, Z.; KHATIB, F. N.; MAKKY, A.; BAROUTAJI, A.; CARTON, J. G.; OLABI, A. G. Developments of electric cars and fuel cell hydrogen electric cars. **Internacional Journal of hydrogen energy**, 2017;

YIN, J.; GAO, H. Stress response of *Shewanella*. **International Journal of Microbiology**, 2011;

ZEN, H.A. **Obtenção de membrana trocadora de prótons para uso em célula a combustível, à base de polipropileno (PP)**. Dissertação de Mestrado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear – Materiais, São Paulo –IPEN, 2008.