



## TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS E AS CÉLULAS A COMBUSTÍVEL MICROBIANAS - MFC

**Nestor Cezar Heck** – heck@ufrgs.br  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Metalurgia  
Av. Bento Gonçalves, 9500  
91501-970 – Porto Alegre – RS

**Gelsa Edith Navarro Hidalgo** – gelsaedith@ufrgs.br  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Metalurgia

**Carlos Hoffmann Sampaio** – sampaio@ufrgs.br  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Departamento de Metalurgia

**Resumo:** *Água residual é vista hoje basicamente como uma fonte de poluição que requer tratamento antes de ser devolvida ao meio-ambiente. Mas, cada vez mais, ela poderá ser vista como uma fonte renovável de água, com nutrientes e energia potencial química contida nas ligações das substâncias moleculares nela presentes. O tratamento das águas residuais pode ser realizado em condições aeróbicas, com grande gasto de energia, ou em anaeróbicas, quando então se pode coletar o biogás (mistura principalmente de 40% CO<sub>2</sub> e 6% CH<sub>4</sub>) produzido por micro-organismos anaeróbios. O biogás, por causa do seu conteúdo em metano, pode ser utilizado para o aquecimento (por combustão) de alimentos e de ambientes, ou geração de eletricidade (principalmente com o uso de moto-geradores). Um novo tratamento de efluentes do tipo anaeróbico propõe a produção de eletricidade diretamente, sem a geração de gás (a menos de um pouco de CO<sub>2</sub>), com o auxílio de micro-organismos anaeróbios. Um tratamento deste tipo está sendo estudado no Programa de Pós-Graduação da Eng. de Minas, Materiais e Metalúrgica (PPGE3M) da UFRGS, e a base da sua operação será descrita neste trabalho.*

**Palavras-chave:** *Célula a combustível microbiana; MFC; Tratamento de esgotos*



## WASTEWATER TREATMENT AND THE MICROBIAL FUEL CELLS - MFC

**Abstract:** Wastewater is now regarded primarily as a source of pollution that requires treatment prior to disposal into the environment. But it may be increasingly seen as a renewable resource of water, nutrients and chemical potential energy contained in the links of the molecular substances in the mixture. The wastewater treatment can be conducted under aerobic conditions, with great expense of energy, or anaerobic, whereupon biogas (mainly a mixture of 40% CO<sub>2</sub> and 60% CH<sub>4</sub>) produced by anaerobic microorganisms can be harvested. Biogas because of its content in methane can be used for heating of foods and living spaces (by combustion), or for electricity generation (particularly with the use of motor generators). A new type of anaerobic treatment of wastewater proposes the production of electricity directly, without gas generation (unless of some CO<sub>2</sub>), with the aid of anaerobic microorganisms. Such treatment is being studied in the Graduate Program of Mining, Metallurgical and Materials Eng. (PPGE3M) at UFRGS, and the basis of its operation will be described in this work.

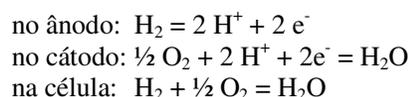
**Keywords:** Microbial Fuel Cell; MFC; Wastewater treatment

### 1. INTRODUÇÃO

Hoje, depois de um longo caminho já percorrido – veja, por exemplo, o trabalho de Potter realizado no início do século XX (POTTER, 1911) –, convencionou-se denominar um conjunto de tecnologias que se assemelham em muitos pontos de Sistema Bioeletroquímico (BES, sigla em inglês de Bioelectrochemical System). BESs contêm um cátodo e um ânodo, separados ou não por uma membrana (seletiva) trocadora de íons, e, dependendo do potencial das meias-células sobre os eletrodos, podem ser operadas como Células a Combustível Microbianas (MFCs) – células galvânicas que geram eletricidade – ou Células Microbianas Eletrolisadoras (MECs) – células eletrolíticas que necessitam energia elétrica para conduzir uma reação termodinamicamente desfavorável.

Os diferentes tipos de células a combustível anteriores à MFC convertem a energia contida em um *combustível* gasoso (ou gaseificado) para a produção de eletricidade. Dependendo da temperatura de operação da célula, o combustível será o hidrogênio (se for de baixa temperatura) ou misturas de gases redutores H<sub>2</sub> e CO (em altas temperaturas). As misturas gasosas são mais prontamente obtidas a partir da gaseificação de combustíveis sólidos e líquidos ou da *reforma* do gás natural ou do biogás. O hidrogênio pode ser obtido de hidrocarbonetos ou da eletrólise da água. O oxidante – para os dois casos – é o oxigênio gasoso do ar. Energia elétrica pode ser obtida da célula a combustível enquanto for mantido um fluxo ininterrupto de combustível e de oxidante.

As reações eletroquímicas de meias-células mais comumente encontrada nas células de baixa temperatura (alimentadas com hidrogênio) são:



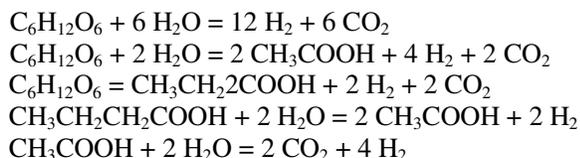
Em palavras, o hidrogênio (combustível) se oxida sobre o ânodo; o íon hidrônio (cátion monovalente) se difunde através de uma membrana trocadora de íons enquanto que elétrons são drenados pelo ânodo. Do ânodo eles são levados ao cátodo através de um *circuito externo* (eletrônico)



onde neutralizam o íon hidrônio (após ter atravessado a membrana), que então reage com o oxigênio formando água (reação espontânea). A corrente eletrônica pode ser utilizada para realizar trabalho mecânico, iluminar, aquecer, etc. Livres do passo intermediário de conversão do calor das reações em trabalho (a ser utilizado no motorizador), as células a combustível são capazes de converter entre 50-60% da energia diretamente em eletricidade.

Já as MFCs, no tratamento de águas residuais, fazem uso da energia potencial química contida em compostos dissolvidos na água. Neste caso, a oxidação dos compostos é feita tipicamente por material biológico como, por exemplo, enzimas ou micro-organismos anaeróbios presentes no meio. A efetividade deste conceito já foi testada em uma grande variedade de substratos, dentre eles: acetato, hexose, butirato, lactose, etc., em diferentes meios: sintéticos (produzidos em laboratório), águas servidas da indústria (cervejarias, fábricas de papel) e esgotos (PANT, VAN BOGAERT *et al.*, 2010).

Algumas reações de oxidação da glucose, butirato e acetato formando hidrogênio, dióxido carbônico e outros compostos, que ocorrem no compartimento anódico, podem ser escritas:



O  $CO_2$  se desprende sob a forma de bolhas da região onde as reações estão ocorrendo, enquanto que o hidrogênio se dissocia segundo:  $H_2 = 2 H^+ + 2 e^-$ .

Já sobre o cátodo ocorre a reação de redução do oxigênio:  $\frac{1}{2} O_2 + 2 H^+ + 2 e^- = H_2O$ .

Sabe-se que micro-organismos, quando se alimentam de glucose sob condições aeróbicas, produzem dióxido de carbono e água, mas, sob condições anaeróbicas (conforme preconizado pelas reações supracitadas) os produtos finais serão  $CO_2$ , prótons e elétrons.

Também é possível realizar (sobre o cátodo) a redução do nitrato a nitrogênio gasoso que, à custa de parte da energia (num processo de certa complexidade), possibilita a desnitrificação das águas residuais simultaneamente com a oxidação das substâncias orgânicas – a remoção de compostos de nitrogênio é essencial para se evitar a eutrofização dos corpos de água receptores de efluentes ricos em fósforo e nitrogênio (VIRDIS, RABAEY *et al.*, 2008).

Os mecanismos de transferência dos elétrons, dos micro-organismos eletricamente ativos para o ânodo, ainda são alvo de debates. Contudo admite-se que proteínas ligadas às membranas, como o *citocromo tipo c* (*citocromo c*), têm um papel chave no transporte dos elétrons (BOROLE, REGUERA *et al.*, 2011). Contudo, alguns micro-organismos de grande importância na degradação de matéria orgânica – como, por exemplo, o gênero de bactérias anaeróbicas *Geobacter* – não possuem o *citocromo c*, e têm capacidade de transferir elétrons para o receptor de elétrons (REGUERA, McCARTHY *et al.*, 2005).

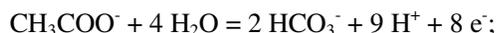
Assim, o resultado de diferentes estudos mostrou que os mecanismos de transferência de elétrons incluem: (i) o uso de componentes solúveis no meio capazes de transferir elétrons (atuam como “shuttle”) da célula ao eletrodo, (ii) a interação direta entre a célula da bactéria e o eletrodo por meio de citocromos da membrana externa, (iii) e o uso de apêndices eletricamente condutores, referidos frequentemente pela palavra *nanofios* (*nanowires*). Componentes de transferência do tipo “shuttles” podem ser metabólitos secundários, produzidos pelos próprios micro-organismos, ou podem ter uma origem abiótica, como é o caso dos ácidos húmicos. E não se descarta o uso de múltiplos mecanismos agindo de forma simultânea para a transferência de elétrons por distâncias maiores que as do tamanho da própria célula (KREYSA *et al.*, 2014).



## 2. TERMODINÂMICA E A FORÇA ELETROMOTRIZ

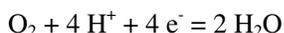
Logan e Regan (LOGAN & REGAN, 2006) descrevem que as bactérias crescem catalisando reações químicas, utilizando e armazenando a energia obtida sob a forma de adenosina trifosfato (ATP). Segundo esses autores, em algumas bactérias, substratos reduzidos são oxidados e os elétrons são transferidos às enzimas respiratórias pelo NADH – a forma reduzida do dinucleótido de nicotinamida e adenina (NAD). Estes elétrons fluem através da cadeia respiratória – uma série de enzimas que movem prótons através de uma membrana interna – criando um gradiente de prótons. Os prótons refluem para dentro da célula através da enzima ATPase, criando uma molécula de ATP a partir de uma de adenosina difosfato para cada 3-4 prótons. Por fim, os elétrons são liberados para um receptor de elétrons solúvel no meio aquoso, tal como nitrato, sulfato, ou oxigênio. O ponto onde o elétron deixa a cadeia respiratória definirá a voltagem (ou seja, a *energia* por carga) possível de ser extraída da decomposição de uma substância por meio de uma MFC. A bactéria, por exemplo, pode obter energia do potencial entre a NAHD e o *citocromo c*, enquanto que a MFC pode ser usada para extrair o restante da energia potencial entre o *citocromo c* e o oxigênio.

Para exemplificar estes fatos pode-se tomar a oxidação do acetato (LOGAN, HAMELERS *et al.*, 2006):



usando-se as seguintes condições:  $\text{HCO}_3^- = 5$  [mM],  $\text{CH}_3\text{COO}^- = 5$  [mM] e  $\text{pH} = 7$  na equação de Nernst, obtém-se para o potencial de meia-célula para o ânodo  $E_{\text{ân.}} = -0,296$  [V] (dado com base no eletrodo padrão de hidrogênio).

Para o cátodo, tomando-se a reação de redução do oxigênio (isto é, a MFC terá no oxigênio dissolvido no meio aquoso do cátodo, o receptor de elétrons da oxidação):



para  $\text{PO}_2 = 0,2$  [atm] e  $\text{pH} = 7$ ,  $E_{\text{cát.}} = 0,805$  [V]. Com estes dados obtém-se o valor da força eletromotriz da célula (potenciais anódico e catódico de *redução*):

$$E_{\text{fem}} = E_{\text{cát}} - E_{\text{ân}} = 0,805 + 0,296 = 1,101 \text{ [V]}$$

Esta equação demonstra, por um lado, que diferentes reações e condições empregadas no cátodo, com a utilização de um mesmo esquema no ânodo, seriam capazes de produzir, no sistema, potenciais significativamente diferentes e, portanto, diferentes níveis de energia (a energia que pode ser obtida por uma MFC dependerá disso); por outro, qual é o nível máximo de energia disponível.

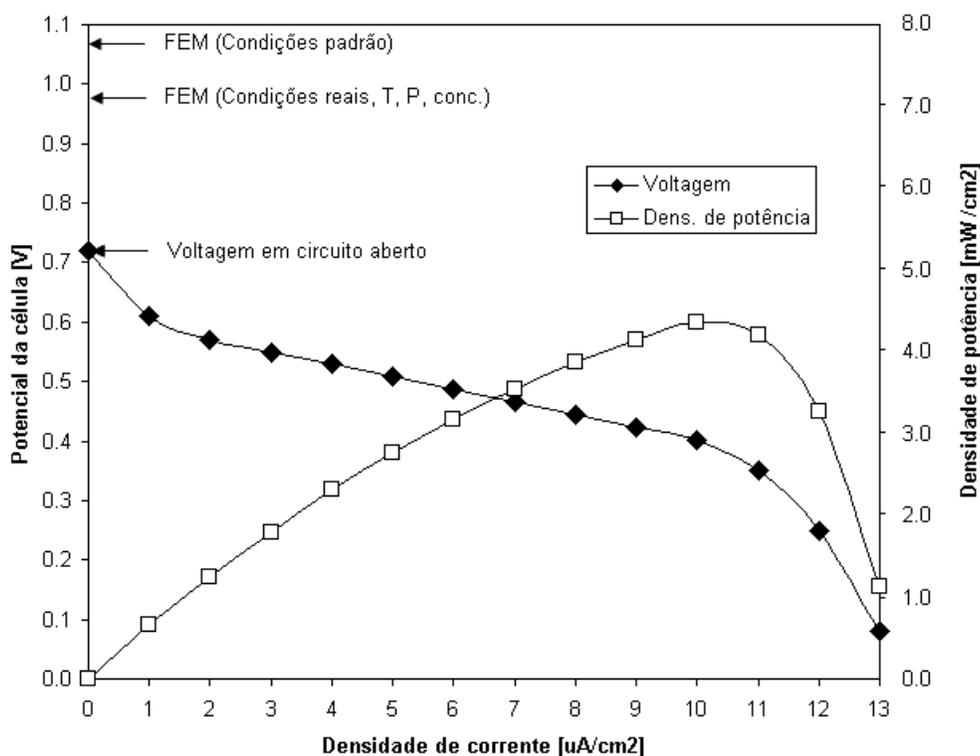
O conhecimento do valor da força eletromotriz da célula – embora valioso – é um dado termodinâmico, que não leva em consideração as perdas internas, dentre elas o metabolismo celular. Já a tensão de circuito aberto (TCA) é um dado experimental, medido sobre a célula na *ausência* de corrente elétrica, depois de decorrido certo tempo. Teoricamente ela deveria refletir a fem da célula galvânica. Na prática, no entanto, a TCA é substancialmente menor do que a força eletromotriz da célula, devido a várias perdas de potencial. Por exemplo, um potencial típico medido num cátodo onde se dá a redução de oxigênio, sob  $\text{pH} = 7$ , é de cerca de 0,2 [V]. Isto é claramente menor do que o valor esperado, de 0,805 [V], indicando a grande perda de energia que ocorre na cátodo – para este caso, de 0,605 [V] (igual à 0,805 [V] - 0,2 [V]). O potencial da célula em circuito aberto, por consequência, se estabelece em aproximadamente 0,5 [V] – mas pode chegar até 0,8 [V] sob condições muito favoráveis.

Fechando-se o circuito e, havendo corrente, o potencial da célula cai ainda mais. As causas são variadas e incluem – além perdas metabólicas bacterianas – (i) perdas por ativação (as



perdas resultantes da energia de ativação necessária para a reação de oxidação, visíveis já em baixas densidades de corrente); (i) perdas ôhmicas (as perdas na resistência ao fluxo de elétrons, visíveis em médias densidades de corrente); e, (iii) perdas por causa da baixa mobilidade dos reagentes e produtos no meio (marcadamente em altas densidades de corrente), Figura 1.

Figura 1. Diagrama esquemático mostrando características elétricas importantes nas células a combustível: potencial eletroquímico da célula galvânica e densidade de potência em função da densidade de corrente (corrente/área do ânodo) produzida pela célula; estão indicados a  $E_{fem}$  da célula (sob condições padrão e reais) e a tensão em circuito aberto, e podem ser observados também os efeitos da queda ôhmica no eletrólito e das sobretensões.



A FEM é, sinteticamente, o resultado do somatório de todos os efeitos mencionados. Incluem-se nela os sobrepotenciais (anódico e catódico), o potencial da célula, e o produto da corrente pelo somatório das resistências na célula – independentemente do valor da corrente que circula pelo circuito (note que a corrente, igual ao quociente entre a carga e o tempo, mostra que a termodinâmica foi deixada algo para trás, tendo-se adentrado no campo dos fenômenos de transporte):

$$E_{fem} = \eta_A + \eta_C + E_{cel} + I \Sigma R$$

Enquanto que alguns destes fatores aumentam com a corrente, outros diminuem, mantendo a FEM constante; a voltagem, ao contrário, cai.

$$E_{cel} = E_{fem} - (\eta_A + \eta_C + I \Sigma R)$$

### 3. RESISTÊNCIA INTERNA E POTÊNCIA

Como toda a fonte de tensão real, a MFC tem uma resistência interna,  $r$ . Representando a carga útil (aquecimento, motores, iluminação, etc.) por  $R$ , pode-se estabelecer (de uma forma muito simplificada) uma relação entre a força eletromotriz da fonte e as resistências por (lei de Ohm):

$$E_{fem} = I r + I R$$

como

$$E_{cel} = I R ,$$

$$E_{cel} = E_{fem} - I r$$

ou seja, a voltagem da célula (a *energia* disponível para ser utilizada) cai com o aumento da resistência interna. Vários fatores contribuem para a resistência interna, dentre outros: a resistividade do eletrólito, a distância entre os eletrodos, a presença da membrana condutora de cátions (a membrana Nafion® apresenta uma baixa resistência), etc.

Como a potência é dada por:

$$P = I^2 R$$

e

$$I = E_{fem} / (r + R)$$

$$P = E_{fem}^2 R / (r + R)^2$$

fica claro que a potência *aumenta* com a diminuição da resistência interna.

A resistência interna pode ser determinada pelo negativo da inclinação da voltagem da célula na sua porção linear (ver Figura 1).

Derivando-se a potência em função de  $R$  e igualando-se o resultado a zero obtêm-se a indicação que a potência dissipada sobre  $R$  é máxima (neste caso a segunda derivada é negativa) quando  $R = r$ .

A potência (assim como a corrente) é dependente das taxas das reações, das áreas envolvidas e da taxa de transporte dos reagentes e produtos como, por exemplo, do oxigênio no ânodo.

### 4. ARQUITETURA DAS CÉLULAS DE LABORATÓRIO

Na sua geometria as MFCs se dividem basicamente em dois tipos: de dupla câmara, Figura 2, e monocâmara; há também células sem membrana condutora de prótons nos dois tipos.

Figura 2. Célula a Combustível Microbiana, MFC, de dupla câmara (tipo H); câmara catódica à esquerda, câmara anódica (contendo os micro-organismos) à direita

Fonte: Laboratório LAPROM / UFRGS, foto dos autores





A presença de duas câmaras (anódica e catódica) separadas por uma membrana trocadora de cátions é bastante intuitiva e não traz nenhuma novidade. Num caso mais simples, as duas câmaras estão conectadas apenas por uma ponte salina.

Criadas por Liu e Logan (LIU & LOGAN, 2004), as MFCs monocâmara – com e sem membrana trocadora de íons – foram uma resposta tanto à baixa velocidade de transferência de oxigênio no meio aquoso da câmara anódica (entre a superfície da água e o cátodo), quanto à necessidade de se eliminar o borbulhamento de O<sub>2</sub> e mesmo de sobrepujar a baixa concentração atingida por este reagente na água à 25 °C. Estas células são construídas eliminando-se a câmara do cátodo e dotando-se a região da câmara onde havia a membrana de um “arranjo membrana-eletrodo” (MEA), onde um cátodo de carbono / Pt é exposto diretamente ao oxigênio disponível no ar. O MEA é composto pela junção de uma membrana polimérica com um eletrodo de difusão de gases, que pode tanto ser um tecido de carbono quanto papel de carbono. Este arranjo é o responsável pela reação eletroquímica do gás hidrogênio com o oxigênio do ar. Quando se elimina a membrana a eficiência da MFC sofre um incremento contudo, com o tempo, tende a haver uma difusão de oxigênio para o interior da câmara anaeróbica.

## 5. TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS

Água residual é vista hoje basicamente como uma fonte de poluição que requer tratamento (energia) antes de ser devolvida ao meio-ambiente. Mas, cada vez mais, ela poderá ser vista como uma fonte renovável de água, com nutrientes e energia potencial química contida nas ligações das substâncias moleculares nela presentes. Esta afirmação não é uma figura de retórica, mas o resultado de um estudo que demonstrou que, numa estação de tratamento moderna, a água residual pode conter 9,3 vezes a energia necessária para tratá-la (SHIZAS & BAGLEY, 2004). A recuperação eficiente dessa energia em uma usina de tratamento poderia levar não só a um sistema sustentável (com base nos requisitos de energia), mas também à produção de um excesso líquido de energia.

O tratamento das águas residuais é hoje feito basicamente com a utilização de duas tecnologias comprovadas, denominadas aqui de forma simplificada por: tratamento aeróbico e tratamento anaeróbico.

Ao se aplicar o tratamento aeróbico convencional, uma grande demanda bioquímica de oxigênio (DBO) pode ser removida, proporcionando um efluente de boa qualidade. A principal desvantagem do tratamento aeróbico, entretanto, é o custo da energia para manter a aeração numa taxa adequada, capaz de garantir os níveis necessários de oxigênio dissolvido, de modo que as condições aeróbicas do efluente sejam mantidas durante todo o tratamento.

Para contornar este problema, várias tecnologias foram desenvolvidas, especialmente para águas residuais de elevada concentração de solutos. A mais utilizada neste contexto é a tecnologia do Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo (UASB). Este tratamento anaeróbico é particularmente efetivo no tratamento de efluentes concentrados, e é capaz de produzir concomitantemente biogás durante o tratamento; o metano contido no biogás pode ser utilizado tanto na geração de calor quanto na de eletricidade (SEGHEZZO & ZEEMAN, 1998).

Neste contexto, pode-se pensar que um sistema com base nas MFCs também poderia ser útil no tratamento de águas residuais e, de fato, esta aplicação parece ser a mais imediata e promissora para as MFCs, pois (i) o substrato é “grátis” (tendo por base a geração de energia com biomassa cultivada), (ii) e há *necessidade* de tratamento deste resíduo. A produção de biogás do processo UASB é eliminada – o que pode até ser considerada uma vantagem (levando-se em conta os possíveis vazamentos deste gás para a atmosfera) – sendo “substituída” pela geração *direta* de eletricidade.

A utilização de membranas trocadoras de íons, no entanto, pode limitar seriamente a aplicação das MFCs para tratamento de águas residuais, não somente porque as



membranas são caras, mas porque existe a possibilidade de incrustação de materiais indesejados sobre elas (devido aos contaminantes sólidos em suspensão e mesmo os solúveis) em um processo de tratamento de águas residuais em larga escala. Por causa destes empecilhos, diferentes arquiteturas que dispensam a membrana das MFCs já foram apresentadas na literatura (JANG, PHAMA *et al.*, 2004), (DU, F.; XIE *et al.*, 2011).

Logan (LOGAN, 2007), em livro específico sobre as MFCs, detalha por meio de fluxogramas a instalação de unidades de tratamento à base de MFCs para o tratamento de águas residuais, considerando a existência de equipamentos auxiliares tradicionais à jusante, tais como recirculadores de lodo e clarificadores. Outrossim, salienta os quatro pontos principais que distinguem estas instalações das tradicionais:

- obtenção de um produto muito útil – a electricidade;
- eliminação da necessidade de arejamento;
- produção reduzida de sólidos;
- potencial para controle de odor.

Este autor considera também que o tratamento de esgotos domésticos gerados por 100 mil pessoas (equivalente a  $16,4 \times 10^6$  [L/ano]) pode ser capaz de suprir por meio de MFCs as necessidades de energia elétrica de 130 residências (com o nível tecnológico já existente: densidade de potência de  $146$  [mW/m<sup>2</sup>]). A sua meta, no entanto, é suprir a necessidade de 330 residências; para isso será necessário um incremento na densidade de potência, até que seja alcançado um valor de  $1$  [W/m<sup>2</sup>] (LOGAN, 2004).

Um sistema com base nas MFCs também poderá ser útil em residências individuais (pela eficiência na redução da DBO, em comparação com as instalações comumente empregadas); a produção de eletricidade, neste caso, é muito pequena para ser utilizada em cargas que exijam potência elevada, entretanto, um sistema de iluminação de baixa potência, por exemplo, poderia ser alimentado por ele.

Dentre os problemas específicos, oriundos da aplicação das MFCs no tratamento das águas residuais, podem ser citados: (i) a presença de uma gama de compostos orgânicos complexos, difíceis de ser decompostos por bactérias, (ii) a possível ocorrência de reações colaterais, tais como a metanogênese, concomitantemente com as reações de oxidação das substâncias orgânicas, e (iii) a baixa capacidade tampão da água residual, o que resulta na acidificação do biofilme no ânodo (KREYSA, 2014).

Mais recentemente um limite por volta de  $100$  [mg/L] na remoção de DQO (solúvel) por meio de MFCs foi reportada, estabelecendo que as MFCs podem ser utilizadas para recuperação de energia a partir de águas residuais, mas um processo de pós-tratamento adicional será necessário para reduzir a DQOs a níveis adequados para descarga (ZHANG, HE, *et al.*, 2015).

Um acoplamento de MFCs com a tecnologia de pequenos pântanos artificiais, construídos para o tratamento de águas residuais, por exemplo, já foi reportado na literatura com resultados interessantes. Foram obtidos bons resultados no que diz respeito à remoção de compostos orgânicos, filtração dos sólidos em suspensão, remoção de nutrientes e desinfecção passiva; contudo ainda há espaço para um incremento dos valores obtidos (van DENHOUWE, 2013).



## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

É necessário lembrar que, quando uma nova tecnologia é introduzida no mercado, a maior probabilidade de sucesso ocorre quando a aplicação mais prontamente rentável é atendida em primeiro lugar. À medida que a tecnologia se desenvolve, torna-se mais compreendida e, especialmente havendo evolução, aplicações mais “difíceis” podem ser escolhidas.

Com base nesta afirmação, pode-se dizer que a aplicação desta tecnologia para o tratamento de águas residuais parece ser a mais imediata e promissora para as MFCs. Acredita-se que o sistema não só poderia suprir a energia tornando-o sustentável, como seria capaz de fornecer um excesso líquido de eletricidade.

Contudo, uma evolução significativa da tecnologia ainda é aguardada. Alguns problemas estão localizados na ampliação da escala dos modelos experimentais – como as MFCs estão baseadas na existência de biofilmes, estruturas com áreas superficiais extensas devem ser implementáveis quando se deseja uma aplicação numa escala razoável. Outros problemas também aguardam solução, dentre eles, o custo elevado de alguns dos materiais empregados nesta classe de células a combustível bem como a necessidade de complementação desta com outras tecnologias, para o “polimento” final do efluente.

## REFERÊNCIAS

BOROLE, A. P.; REGUERA, G.; RINGEISEN, B.; WANG Z. W.; FENG, Y.; KIM, B. H. Electroactive biofilms: current status and future research needs. **Energy & Environmental Science**, Vol. 4, Nr. 12, p. 4813-4834, 2011.

van DENHOUWE, S. **Combining Constructed Wetlands and Microbial Fuel Cells for Enhanced Wastewater Treatment**. Gent, 2013. Dissertação (Mestrado). Universidade de Gent.

DU, F.; XIE, B.; DONG, W.; JIA, B.; DONG, K.; LIU, H. Continuous flowing membraneless microbial fuel cells with separated electrode chambers. **Bioresource Technology**, Vol. 102, Nr. 19, p. 8914-8920, 2011.

JANG, J. K.; PHAMA, T. H.; CHANG, I. S.; KANG, K. H.; MOON, H.; CHO, K. S.; KIMA, B. H. Construction and operation of a novel mediator- and membrane-less microbial fuel cell. **Process Biochemistry**, Vol. 39, p. 1007-1012, 2004.

KREYSA G. *et al.* (edits.), **ENCYCLOPEDIA of APPLIED ELECTROCHEMISTRY**, DOI 10.1007/978-1-4419-6996-5, Springer, Nova Iorque, 2014.

LIU, H.; LOGAN, B. E. Electricity Generation Using an Air-Cathode Single Chamber Microbial Fuel Cell in the Presence and Absence of a Proton Exchange Membrane. **Environmental Science & Technology**, Vol. 38, Nr. 14, p. 4040-4046, 2004.

LOGAN, B. E. **Harvesting Energy from Wastewater Treatment using MFCs**. WE&RF, 2004. Disponível em <[http://www.engr.psu.edu/ce/enve/logan/web\\_presentations/Logan-BuschAward-10-5-04.pdf](http://www.engr.psu.edu/ce/enve/logan/web_presentations/Logan-BuschAward-10-5-04.pdf)> Acesso em: 18 jan. 2016



LOGAN, B. E. **Microbial fuel cells**. Wiley, 2007. ISBN 978-0-470-23948-3

LOGAN, B. E.; REGAN, J. M. MICROBIAL FUEL CELLS – Challenges and Applications. **Environmental Science & Technology**, setembro, p. 5172-5180, 2006.

LOGAN, B. E.; HAMELERS, B.; ROZENDAL, R.; SCHRODER, U.; KELLER, J.; FREGUIA, S.; AELTERMAN, P.; VERSTRAETE, W.; RABAEY, R. Microbial Fuel Cells: Methodology and Technology. **Environmental Science & Technology**, Vol. 40, Nr. 17, p. 5181-5192, 2006.

PANT, D.; VAN BOGAERT, G.; DIELS, L.; VANBROEKHOVEN, K. A review of the substrates used in microbial fuel cells (MFCs) for sustainable energy production. **Bioresource technology**, Vol. 101, Nr. 6, p. 1533-1543, 2010.

POTTER, M.C. Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds. **Royal Society** (anteriormente: Proceedings of the Royal Society) **B**, Vol. 84, p. 260-276, 1911.

REGUERA, G.; McCARTHY, K. D.; MEHTA, T.; NICOLL, J. S.; TUOMINEN, M. T.; LOVLEY, D. R. Extracellular electron transfer via microbial nanowires. **Nature**, Vol. 435, junho, p. 1098-1101, 2005.

SEGHEZZO, L.; ZEEMAN, G.; van LIEL, J.B.; HAMELERS, H. V. M.; LETTINGA, G. A review: The anaerobic treatment of sewage in UASB and EGSB reactors. **Bioresource Technology**, Vol. 65 p. 175-190, 1998.

SHIZAS, I.; BAGLEY, D. M. Experimental Determination of Energy Content of Unknown Organics in Municipal Wastewater Streams. **Journal of Energy Engineering**, Vol. 130, Nr. 2, p. 45-53, 2004.

VIRDIS, B.; RABAEY, K.; YUAN, Z.; KELLER, J. Microbial fuel cells for simultaneous carbon and nitrogen removal. **Water Research**, Vol. 42, Nr. 12, p.3013–3024, 2008.

ZHANG, X.; HE, W.; REN, L.; STAGER, J.; EVANS, P. J.; LOGAN, B.E. COD removal characteristics in air-cathode microbial fuel cells. **Bioresource Technology**, Vol. 176, p. 23-31, 2015.