



11º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Expressão Portuguesa VII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa
27 a 30 de Maio de 2013 - Maputo, Moçambique

11º SILUSBA
Zonas Costeiras 2013

CÉLULAS DE COMBUSTÍVEL MICROBIANAS: UM PROCESSO INOVADOR PARA PRODUÇÃO DE ENERGIA E TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS EM SISTEMAS DESCENTRALIZADOS

Luciana Peixoto ¹, Gilberto Martins ², Diogo Amorim ³, Pier Parpot ⁴, Regina Nogueira ⁵ e António Guerreiro de Brito ⁶

¹ Bióloga, PhD, IBB-Centro de Eng. Biológica, Universidade do Minho, Braga, Portugal, luciana.peixoto@deb.uminho.pt

² Eng. Biológico, PhD, IBB-Centro de Eng. Biológica, Universidade do Minho, Braga, Portugal, gilberto.martins@deb.uminho.pt

³ Biotecnólogo, MSc, IBB-Centro de Eng. Biológica, Universidade do Minho, Braga, Portugal, sir.diogoamorim@gmail.com

⁴ Químico, PhD, Dep. Química, Universidade do Minho, Braga, Portugal, parpot@quimica.uminho.pt

⁵ Eng^a Biológica, PhD, Universidade de Hannover, Hannover, Alemanha, nogueira@isah.uni-hannover.de

⁶ Eng^o do Ambiente, PhD, IBB-Dep. Eng. Biológica, Universidade do Minho, Braga, Portugal, agbrito@deb.uminho.pt



Palavras-chave: Células de combustíveis microbianas, bioeletricidade, tratamento de águas residuais, sistemas autónomos.

Resumo

A produção de energia constitui uma base essencial para o desenvolvimento humano. Neste quadro, a capacidade de determinados microrganismos oxidarem matéria orgânica e transferirem eletrões para um ânodo e, por essa via, permitirem a produção direta de eletricidade representa uma efetiva oportunidade tecnológica. Este novo processo, designado por célula de combustível microbiana, constitui uma abordagem de produção de energia elétrica com capacidade para ser acoplada ao tratamento de águas residuais, apresentando elevado potencial para integrar fluxos de eletricidade e tratamento de águas residuais em sistemas descentralizados. No presente trabalho efetuaram-se ensaios eletroquímicos de voltametria cíclica, os quais permitiram reforçar a importância da transferência direta de eletrões e da formação de biofilme eletroactivo na superfície do eléctrodo. O desempenho da MFC para produção de bioeletricidade e tratamento de águas residuais foi efectuado com comunidades microbianas anódicas mista e pura (*Geobacter sulfurreducens*). As densidades de potência instantânea atingiram máximos de 710 W/m³ com uma cultura pura e 823 W/m³ com a mista, sendo que a remoção de carbono da água residual atingiu valores médios de 83%.



1. INTRODUÇÃO. ASPECTOS GERAIS

A disponibilidade de fontes energéticas constitui uma das principais bases estratégicas para o desenvolvimento humano e esse objetivo requer o uso crescente de energias baseadas em recursos renováveis, sustentáveis. Esta perspetiva favorece um esforço de articulação, baseada em sistemas inovadores, entre a redução da poluição dos recursos hídricos e a produção de energia, designadamente em zonas com escassez de água [1]. Nesse sentido, os sistemas de tratamento de águas residuais devem assentar numa perspetiva de recuperação de recursos e eficiência, estando a questão energética ao mais alto nível de prioridade. Com efeito, novos modelos conceituais de sistemas sustentáveis de tratamento de águas residuais são necessários, em especial em sistemas isolados e em zonas rurais [2]. Entre as opções disponíveis, as células de combustível microbiana (Microbial Fuel Cell - MFC), baseadas na capacidade de determinados microrganismos oxidarem a matéria orgânica e transferirem eletrões para um ânodo e permitirem a produção direta de eletricidade, representam uma efetiva oportunidade tecnológica [3, 4].

Uma célula de combustível microbiana converte a energia química armazenada nos compostos orgânicos em energia elétrica por via de reações catalíticas operadas por microrganismos que, agregados em biofilmes, crescem em condições anaeróbias sobre elétrodos [3, 4]. A Figura 1 mostra um esquema geral de uma MFC com duas câmaras, anódica e catódica, separadas por uma membrana de troca de prótons (MTP).

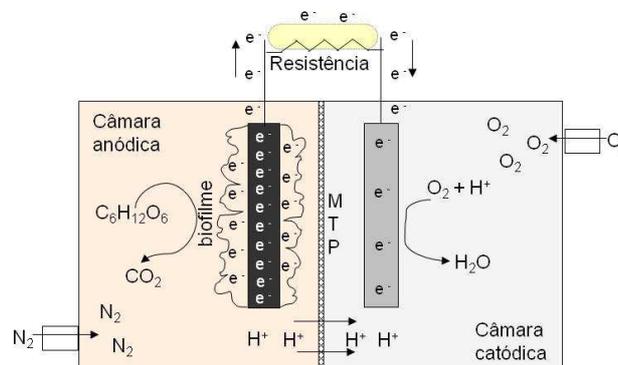


Figura 1. Esquema de uma MFC.

Os microrganismos colonizam o ânodo e oxidam os substratos e geram eletrões e prótons, com produção de dióxido de carbono. Ao contrário da combustão direta, os eletrões são recebidos pelo ânodo e transportados até ao cátodo através de um circuito externo. Os prótons são transferidos para a câmara catódica através da membrana de troca de prótons, onde se combinam com o oxigênio para formarem água. A geração de corrente elétrica é possível por existir uma resistência entre os elétrodos que promove uma diferença de potencial convertida em corrente elétrica. Este processo requer que a oxidação ocorra sem a presença de oxigênio ou outro aceitador final de eletrões que não seja o ânodo [5, 6].

A comunidade bacteriana que constitui o biofilme numa MFC contém bactérias eletroativas, essencialmente do género *Geobacter* (*Deltaproteobacteria*) como sejam a *G. sulfurreducens* e *G. metalireducens*, ou género *Shewanella* (*Gammaproteobacteria*) como, por exemplo, a *S. oneidensis* [6, 7, 8]. Estes grupos de bactérias desenvolvem um pili condutor conectado com os citocromos da membrana externa, permitindo a transferência de eletrões para aceitadores de eletrões mais distantes, desenvolvendo-se assim na superfície dos elétrodos um



biofilme eletroativo [9]. Esta transferência de eletrões de bactérias para eléttodos durante a decomposição de compostos orgânicos foi observada pela primeira vez em 1911 [10]. Além da energia produzida pela oxidação da matéria orgânica é também possível aplicar a tecnologia das MFC para obter hidrogénio, promovendo a eletrólise da matéria orgânica, em sistemas vulgarmente denominados de Células de Eletrólise Microbianas (MEC) [11].

As MFC têm sido testadas em diversas configurações pelo grupo *bio4Environment* da Universidade do Minho. Uma das configurações corresponde ao reator em forma de H com duas câmaras (anódica e catódica) e por uma membrana de troca de protões, como se observa na Figura 2a. De modo a aumentar a diferença de potencial entre os eléttodos, ensaiaram-se a outros desenhos como a MFC de duas câmaras (Figura 2b), que permite diminuir a distância entre os eléttodos e aumentar a área de troca de protões, a MFC de reatores cilíndricos, onde um cilindro externo representa o cátodo e o interno o ânodo, e a MFC submersível (Figura 2c), em que a câmara catódica tem um fluxo contínuo de ar e o ânodo está imerso numa câmara que, neste caso, é um reator anaeróbio [12].

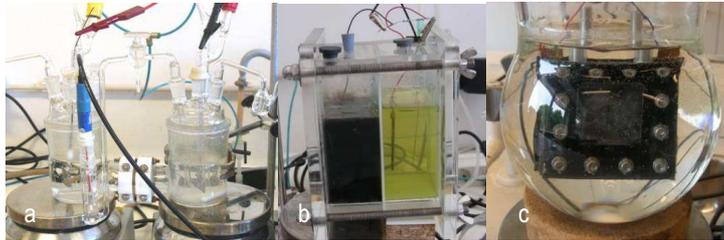


Figura 2. Exemplos de configurações de MFC: tipo H (a), 2 – câmaras (b) e submersível (c).

O tratamento de águas residuais baseado em sistemas aeróbios, designadamente em processo de lamas activadas, são economicamente dispendiosos dado o elevado consumo de energia para os mecanismos de mistura e arejamento, além dos problemas associados às emissões de carbono [13]. No entanto, continuam a predominar em resultado da sua facilidade de operação e qualidade do efluente final, ainda que os sistemas anaeróbios também sejam viáveis em efluentes pouco concentrados [14] e, ainda melhor, em efluentes alimentares concentrados [15]. Contudo, existem já sistemas MFC à escala piloto para o tratamento de águas residuais [16], tendo-se atingido uma remoção até 80% de matéria orgânica, expresso em termos de CBO, de uma água residual com matéria orgânica solúvel [17].

2. OBJETIVOS

A presente comunicação apresenta os trabalhos de desenvolvimento e otimização de MFC plana para compatibilizar objectivos de tratamento de águas residuais com uma produção descentralizada de energia eléctrica. Nesse sentido, indicam-se os resultados de ensaios de voltametria cíclica, evidencia-se a importância da transferência direta de eletrões, assim como a influência do desenvolvimento de biofilme anódico na intensidade de corrente. A análise da eficiência da MFC plana inoculada com uma cultura mista (água residual) e uma cultura pura de *Geobacter sulfurreducens* foi outro dos objetivos do presente estudo.



3. METODOLOGIA

3.1. *Geobacter sulfurreducens*: crescimento e manutenção

Geobacter sulfurreducens (DSM 12127) foi obtida a partir da coleção da DSMZ (Braunschweig, Alemanha) e cultivada como sugerido por Caccavo *et al.*, [18]. O crescimento de *G. sulfurreducens* foi realizado em garrafas de 100 mL seladas com rolhas de borracha e cápsulas de alumínio a 35 °C, 100 rpm. Acetato de sódio e fumarato de sódio foram utilizados como dador e aceitador de elétrons respetivamente. O meio de crescimento apresentou a seguinte composição, por litro: 1.5 g de NH₄Cl, 0.6 g de Na₂HPO₄, 1.5 g de NaH₂PO₄, 0.1 g de KCl, 0.8 g de Na-acetato, 8.0 g de Na₂-fumarato, 2.5 de NaHCO₃, 10 mL de solução de vitaminas, 10 mL de solução de sais minerais e 1 mL de solução de selénio-tungstato. A solução com todos os componentes (exceto NaHCO₃ e Na₂-fumarato) foi aquecida até à ebulição, com arrefecimento até à temperatura ambiente em banho de gelo, acompanhado de desarejamento com N₂-CO₂ (80:20%), o que permitiu assegurar condições anaeróbias e tamponar a solução com NaHCO₃ até ajuste do pH a 6.8. Posteriormente, procedeu-se à autoclavagem durante 20 minutos. Antes da inoculação, 50 mM de fumarato de sódio foram adicionados através de um filtro estéril (0.22 µm), a partir de uma solução em condições de assepsia. As culturas foram mantidas em fase exponencial de crescimento promovendo a manutenção da concentração de acetato de sódio (20mM) e de fumarato de sódio (50 mM) através de injeção de soluções concentradas.

3.2. Estudo da transferência de elétrons: voltametria cíclica

Uma MFC foi utilizada nos estudos fundamentais da transferência eletrónica, nomeadamente na avaliação da importância da transferência de elétrons direta para elétrodos. A célula eletroquímica apresentava duas câmaras separadas por uma membrana de troca iónica (Nafion 117, DuPont Co.) e três elétrodos, sendo o de referência de Calomelano saturado (SCE), o de trabalho de Carbono Toray (3x3 cm) e o contra elétrodo de Platina (3x3 cm). A placa de carbono Toray (E-TEK division) foi colada a um fio de Platina (Alfa Aesor). Antes de todos os experimentos eletroquímicos as câmaras foram preenchidas com KCl 0.1 M, desarejado com Argon e a integridade do sistema foi confirmado. O software *Labview* (National Instruments) e o módulo PCI-MIO-16E-4 I/O foram usados para gerar e aplicar o potencial programado assim como adquirir os dados de intensidade de corrente. Foram efetuados voltamogramas com meio de cultura na ausência de bactéria, meio de cultura previamente inoculado com *G. sulfurreducens* (150 mg de proteína/L) no tempo 0 e após 24 h. Este último ensaio foi repetido utilizando uma membrana de diálise a recobrir o elétrodo, que apenas impediu a bactéria de se aproximar do elétrodo de trabalho, impedindo a transferência direta para o elétrodo e a formação de biofilme. A instrumentação eletroquímica consiste num potencióstato/galvanostato da *Amel Instruments* acoplado a um computador através de conversor AD/DA.

3.3. MFC plana: construção, operação e avaliação

A célula eletroquímica do tipo Filter Press FM01-LC da Imperial Chemical Industries PLC (ICI), adquirida à Akzo Nobel, foi adaptada a MFC plana de duas câmaras. A MFC plana (figura 3), com 64 cm² de área de elétrodo (carbono Toray (E-TEK division)) e 1 cm³ de volume de eletrólito na câmara anódica, foi operada com água residual doméstica em modo descontínuo (valor 622±10 mg/L, em termos de CQO) com recirculação na câmara anódica e com cultura pura de *G. sulfurreducens* em meio de crescimento (D.O de 0.55 a 640 ηm e concentração total de



proteína de 118.6 mg/L), para posterior comparação das eficiências. No compartimento catódico foi usado tampão fosfato com hexacianoferrato (50 mM). O ânodo e o cátodo encontravam-se separados por uma membrana de permuta iónica (Nafion 117, DuPont Co.). Os elétrodos, folhas de carbono Toray (4 cm x 16 cm), foram prensados em suportes de aço inoxidável e ligados a uma resistência com fios de cobre com revestimento. A diferença de potencial entre o ânodo e cátodo foi medida através de uma resistência de 1 k Ω , recorrendo a um software de aquisição de dados (Labview 6.0) [17].

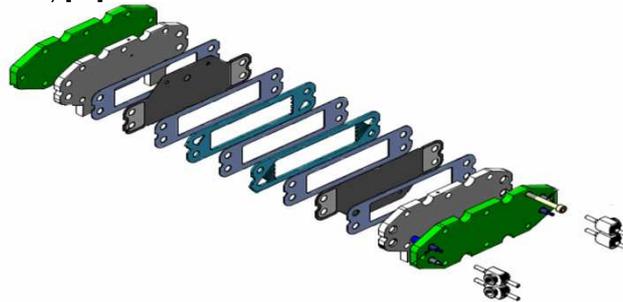


Figura 3. Componentes da MFC plana.

As condições de assepsia do reator foram promovidas por autoclavagem dos componentes autoclaváveis e, as não autoclaváveis por sucessivas lavagens com solução de 10% de ácido nítrico (HNO₃), 10% ácido sulfúrico (H₂SO₄) e água-ultra pura e o reator foi montado em câmara de fluxo laminar. A concentração de carbono foi mantida durante a operação e crescimento do biofilme, sempre que se verificou a queda da produção de densidade de corrente, por trocas sucessivas de água residual (MFC inoculada com água residual) e por manutenção da concentração de 20 mM de acetato de sódio através de injeção de solução stock (MFC inoculada com cultura pura).

O desempenho das MFC foi avaliado através da análise da produção de densidade de corrente ao longo do tempo e através da elaboração de curvas de polarização e potência, que descrevem a diferença de potencial e a potência em função da densidade de corrente [17]. As respectivas curvas foram obtidas através de uma série de resistências no intervalo de 31,1 k Ω a 10 Ω . A resistência interna da MFC foi calculada a partir do declive da curva de polarização na região dominada por perdas óhmicas [4]. As curvas de polarização e potência foram obtidas na fase estacionária, no início e no fim da formação de biofilme anódico, considerando-se que este se encontrava no estado estacionário quando valores semelhantes de densidade de corrente foram obtidos 3 vezes consecutivamente, sem recirculação

dos eletrólitos [17]. A intensidade de corrente (i), em amperes (A) foi calculada de acordo com a lei de Ohm, $i = \frac{V}{R}$, onde V é a voltagem medida em Volts (V) e R é o valor conhecido da resistência externa (Ω). A densidade de

corrente (j) foi determinada segundo a equação $j = \frac{i}{A_o}$, onde A_o é a área de superfície projetada do ânodo. A densidade de potência (P) foi calculada como o produto da intensidade de corrente (i) e a voltagem (V) pela área de

superfície projetada (A_o) do ânodo ($P = \frac{iV}{A_o}$). Para determinar a potência volumétrica, P_v (W.m⁻³), a potência foi normalizada ao volume da câmara anódica do reator, $P_v = \frac{iV}{v}$, onde v é o volume total da câmara anódica [17].



4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Transferência eletrónica direta vs. mediada: voltametria cíclica

A figura 3 apresenta os voltamogramas de carbono Toray a 50 mV/s, em meio de cultura (negrito tracejado), meio de cultura com *G. sulfurreducens* na fase exponencial de crescimento em contacto com o eléctrodo imediatamente após inoculação (cinza claro) e após 24 horas (cinza escuro), meio de cultura com *G. sulfurreducens* na fase exponencial de crescimento mas com o eléctrodo recoberto com membrana de diálise e preenchido com meio sem bactéria imediatamente após inoculação (laranja) e após 24 horas (azul). Conforme é dado observar, o voltamograma de meio de cultura na ausência de bactéria exibe um aumento da intensidade de corrente com máximo aos 509 mV mas com moderada intensidade de corrente (0.172) e um pico de redução aos 207 mV. Este comportamento é devido à oxidação espontânea de alguns constituintes minerais do meio de cultura. Os voltamogramas de carbono Toray na presença de *G. sulfurreducens* imediatamente após inoculação e após 24 horas apresentam um aumento da intensidade de corrente entre 500 e 890 mV com dois picos de oxidação para o tempo 0 e 390 e 880 mV com apenas um pico de oxidação que talvez seja a conjugação dos dois anteriores, predominando o pico a um potencial mais catódico, ao fim de 24 horas de inoculação. Os máximos são, respetivamente, de 0.48 mA (624 mV), 0.79 mA (809 mV) e 1.291mA (600 mV). Os picos de oxidação apresentados nestes voltamogramas correspondem à transferência de eletrões por mecanismos diversificados, nomeadamente responsáveis pela transferência direta e indireta de eletrões para eléctrodos [19]. Os voltamogramas de carbono toray na ausência de contacto direto com *G. sulfurreducens*, onde a transferência eletrónica direta é impedida em detrimento da transferência indireta, foi possível observar a presença de 1 pico de oxidação entre os 390 mV e os 640 mV, com pico máximo de 0.286 mA aos 540 mV. Após 24 h da inoculação foi possível observar no voltamograma um aumento da intensidade de corrente entre os 0.340 mV e os 0.611 mV com moderada intensidade de corrente 0.281 mA aos 540 mV e um pico de redução mais acentuado aos 210 mV. Com os resultados destes voltamogramas é possível corroborar a importância da transferência direta na produção de intensidade de corrente, assim como a formação de biofilme na superfície do eléctrodo uma vez que a intensidade dos picos de oxidação aumenta significativamente à medida que o biofilme aumenta. Estes dados são coincidentes com os obtidos nos trabalhos de Peixoto *et al.* [19]. Saliencia-se o facto de nos voltamogramas obtidos com o eléctrodo recoberto por uma membrana a intensidade de corrente ser superior à observada no meio de cultura, contudo muito inferior à observada quando a bactéria está em contacto direto com o eléctrodo; esta tendência tende a manter-se mesmo ao fim de 24 horas, uma vez que, neste caso, não há crescimento de biofilme, nem alteração nas condições experimentais.

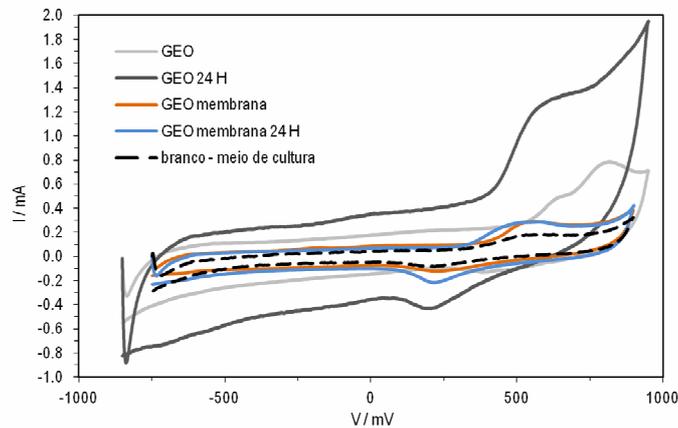


Figura 3. Comparação entre voltamogramas de *G. sulfurreducens* imediatamente após inoculação e após 24 horas na presença e ausência de membrana de diálise.

4.2. Desempenho da MFC plana: *Geobacter sulfurreducens* vs. cultura mista

Um excelente desempenho da MFC plana para produção de bioeletricidade e tratamento de água residual foi obtido, quando o circuito foi fechado com resistência externa de 1000 Ω , com uma comunidade microbiana anódica mista e com cultura pura, sendo os dois desempenhos bastante semelhantes em termos de densidade de potência gerada (Figura 5). Com cultura mista, as densidades de potência instantânea atingiram máximos de 407 W/m^3 (Figura 5 - laranja), após 3 semanas com ausência de produção de eletricidade e como consequência da formação de biofilme bacteriano na superfície do ânodo da MFC, estes valores são comparáveis com outros observados na bibliografia [20]. As fases estáveis de produção de eletricidade corresponderam, em média, a 56 horas sendo que a densidade de potência tendeu a diminuir à medida que o biofilme aumentou devido, provavelmente, ao aumento da resistência interna promovido pela colmatação da membrana de troca iónica. A remoção do carbono da água residual, quando a comunidade se apresenta estável, atingiu valores médios de $83\% \pm 4\%$, assegurando uma descarga compatível com os valores limite de emissão.

A produção de densidade de potência obtida na MFC plana com *G. sulfurreducens* iniciou-se após 32 horas da inoculação, aumentando significativamente até atingir valores instantâneos de 480 W/m^3 , que se mantiveram nas 5 horas seguintes, sendo o máximo atingido durante toda a operação. Nos ciclos de operação consecutivos, a duração da fase estável aumentou gradualmente, provavelmente devido ao desenvolvimento do biofilme anódico, contudo atingindo valores de produção de densidade de potência inferiores, mas na mesma ordem de grandeza dos obtidos para as mesmas condições de operação quando inoculada com cultura mista. As diminuições bruscas da densidade de potência são o resultado da limitação da concentração de carbono, que foi repostada com adição de Acetato de sódio (20 mM). Após um mês de operação, a densidade de potência instantânea estabilizou em torno dos 426 W/m^3 .

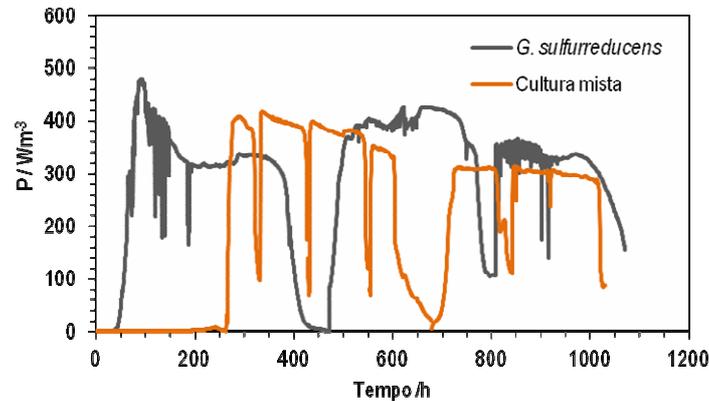


Figura 5. Densidade de potência ao longo do tempo obtidas na flat MFC inoculada com *G. sulfurreducens* e com cultura mista.

O valor máximo de densidade de potência obtido pela MFC plana (480 W/m^3) com cultura pura foi superior à densidade de potência máxima alcançada nas mesmas condições quando a MFC foi inoculada com cultura mista, sendo que estas diferenças não foram tão significativas quanto o esperado. Rabaey *et al.* [21], obteve valores inferiores (216 W.m^{-3}) com uma cultura mista (lamas ativadas) numa MFC de duas câmaras compacta e elétrodo de grafite simples, e Aelterman *et al.* (2006), obteve 275 W/m^3 com um conjunto de 6 MFC de duas câmaras compactas inoculada com uma cultura mista (lamas ativadas) e elétrodo de grafite simples. O valor obtido foi ligeiramente inferior ao de Ringeisen *et al.*, 2006 (500 W/m^3) numa MFC de duas câmaras compactas inoculada com uma cultura pura (*Shewanella oneidensis*) e com um elétrodo de carbono vítreo reticulado. Nevin *et al.* (2008) utilizando uma MFC de duas câmaras compactas e uma cultura de *G. sulfurreducens* obteve uma densidade de potência máxima de 2150 W.m^{-3} , sendo que estas densidades de potência são das maiores observadas na literatura, contrariando os valores de densidade de potência superiores obtidos com culturas mistas até à data. A densidade de potência depende não só da comunidade bacteriana existente mas, também, do *design* da MFC utilizada [22]. O presente ensaio corrobora esta teoria, uma vez que valores de densidade de potência semelhantes foram obtidos pelo mesmo reator na presença de um cultura mista e uma cultura pura de bactéria eletroactiva. Assim sendo, a principal diferença observada relaciona-se com a concentração de bactérias eletroactivas que, no caso da cultura mista, demorou algum tempo a densificar, aumentando também o tempo de aclimação ao elétrodo e início da geração de eletricidade.

Na figura 6, é possível observar as curvas de polarização e de potência obtidas na fase estável de geração de eletricidade para a MFC plana inoculada com cultura mista e cultura pura de *G. sulfurreducens*. A curva de polarização foi obtida pela alteração da resistência entre os elétrodos de $31,1 \text{ k } \Omega$ a $10 \text{ } \Omega$. Em ambas não se verificou a existência de um declive acentuado para as densidades de corrente mais baixas, podendo concluir-se que não existem perdas por ativação.

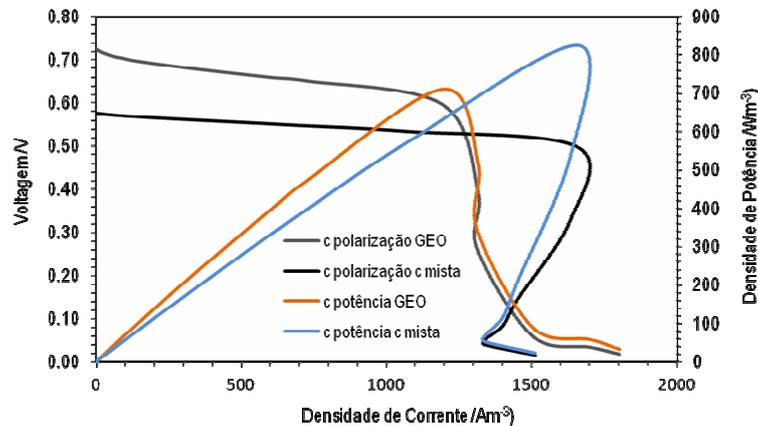


Figura. 6 Curvas de polarização e de potência da flat MFC inoculada com cultura mista e cultura pura de *G. sulfurreducens*.

A OCV inicial medida para a MFC plana inoculada com cultura mista foi de 576 mV e de 725 mV (figura 6 – curvas cinza e preto) na fase estável da produção de eletricidade. Este valor encontra-se em conformidade com os valores citados na literatura (0.5 a 0.8 V) [16, 23]. As densidades de potência (P) máximas alcançadas nas curvas de potência da MFC inoculada com cultura mista e pura foram de 823 e 710 W/m³, respetivamente. Dado os valores de OCV seria expectável obter-se máximos de densidade de potência com a cultura pura, o que leva a inferir que o desenvolvimento do biofilme de *G. sulfurreducens* não se efetuou nas melhores condições, ou seja, deveriam ser utilizadas resistências inferior neste processo. A resistência interna deste reator, calculada a partir das curvas de polarização da figura 6, foram de 7 Ω para a MFC inoculada com a cultura mista e de 6 Ω para a inoculada com a cultura pura, não sendo considerada uma diferença significativa. Os baixos valores de resistência interna obtidos podem dever-se à configuração do reator, que minimiza as distâncias entre os eléctrodos e a membrana [4].

5. CONCLUSÕES

A importância da formação de biofilme electroactivo foi reconfirmada pelo presente estudo numa MFC plana, nomeadamente nos ensaios de voltametria cíclica. A MFC apresenta uma reduzida resistência interna e apresentou um bom desempenho em termos de produção de bioeletricidade e tratamento de água residual. Densidades de potência máximas de 823 W/m³ foram obtidas na MFC inoculada com cultura mista e 87% de remoção de carbono e 710 W/m³ foram obtidos com a cultura pura. Por outro lado, a estrutura do reator, nomeadamente a minimização da resistência interna entre os eléctrodos, será um dos factores principais a melhorar. Ainda assim, a configuração muito compacta da MFC plana permite, com a aplicação de várias unidades em série, aumentar a densidade de potência e reforçar a sua aplicabilidade em sistemas descentralizados e aplicações autónomas.

Referências

[1] Martins, G.; Brito, A.G.; Nogueira, R.; Ureña, M.; Fernández, D.; Luque, F.J.; Alcácer, C. - *Water resources management in European southern countries: clues for a regional water hypercluster based on research and innovation*. J. Environ. Manag. 119, 76-84. 2013.



- [2] Vera, L.; Martel, G.; Salas, J.J.; Sardón, N.; Nogueira, R.; Brito, A.G.; Faby, J.A.; Ramón, A. - *Depuranat project: sustainable management of wastewater in rural areas*. Desalination and Water Treatment. 4 (1-3), 59-68. 2009.
- [3] Bond, D.R.; Holmes, D.E.; Tender, L.M.; Lovley, D.R. - *Electrode-reducing microorganisms that harvest energy from marine sediments*. Science. 295, 483-485. 2002.
- [4] Logan, B.E.; Hamelers, B.; Rozendal, R.; Schroder, U.; Keller, J.; Freguia, S.; Aelterman, P.; Verstraete, W.; Rabaey, K. - *Microbial fuel cells: methodology and technology*. Environ. Sci. Technol. 40, 5181-5192. 2006.
- [5] Logan, B.E. - *Exoelectrogenic bacteria that power microbial fuel cells*. Nature Reviews Microbiol. 7 (5), 375-381. 2009.
- [6] Franks, A.E.; Nevin, K.P. - *Microbial Fuel Cells, A Current Review*. Energies 3, 899-919. 2010.
- [7] Holmes, D.E.; Bond, D.R.; O'Neil, R.A.; Reimers, C.E.; Tender, L.R.; Lovley, D.R. - *Microbial communities associated with electrodes harvesting electricity from a variety of aquatic sediments*. Microbial Ecol. 48, 178-190. 2004
- [8] Rabaey, K.; Verstraete W. - *Microbial fuel cells: novel biotechnology for energy generation*. Trends in Biotechnology 23, 291-298. 2005.
- [9] Reguera, G.; Pollina, R.B.; Nicoll, J.S.; Lovley, D.R. - *Possible Nonconductive Role of Geobacter sulfurreducens Pilus Nanowires in Biofilm Formation*. J. Bacteriol 189, 2125-2127. 2007.
- [10] Potter, M.C. - *Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds*. Proc. Roy. Soc. London Ser. B 84, 260-276. 1911.
- [11] Logan, B.E.; Call, D.; Cheng, S.; Hamelers, H.V.M.; Sleutels, T.H.J.A.; Jeremiasse, A.W.; Rozendal, R.A. - *Microbial electrolysis cells for high yield hydrogen gas production from organic matter*. Environ. Sci. Technol. 42, 8630-8640. 2008.
- [12] Peixoto, L.; Min, B.; Martins, G.; Brito, A.G.; Kroff, P.; Parpot, P.; Angelidaki, I.; Nogueira, R. - *In situ microbial fuel cell-based biosensor for organic carbon*. Bioelectrochemistry 81 (2), 99-103. 2011.
- [13] Machado, A.P.; Urbano, L.; Brito, A.G.; Janknecht, P.; Salas, J.J.; Nogueira, R. - *Life cycle assessment of wastewater treatment options for small and decentralized communities*. Water Science and Technology. 56 (3), 15-22. 2007.
- [14] Brito, A.G.; Melo L.F. - *Operation of UASB and EGSB reactors with low strength acidified wastewaters: a simplified analysis of reaction and mass transfer effects*. Environmental Technology, 18 (1), 35-44. 1997.
- [15] Brito, A.G.; Peixoto, J.; Oliveira, J.M., Oliveira, J.A.; Costa, C., Nogueira, R.; Rodrigues, A. - *Brewery and winery wastewater treatment: some focal points of design and operation*. In: Utilization of By-Products and Treatment of Waste in the Food Industry. V. Oreopoulou and R. Winfred (Eds.), ISEKI Series, 3. New York: Springer, 2007.
- [16] Logan, B.E. - *Scaling up microbial fuel cells and other bioelectrochemical systems*. Appl. Microbiol. Biotechnol. 85, 1665-1671. 2010.
- [17] Peixoto, L.; Rodrigues, A.L.; Martins, G.; Nicolau, A.; Brito, A.G.; Silva, M.M.; Parpot, P. Nogueira, R. - *A flat microbial fuel cell for decentralized wastewater valorisation: process performance and optimization potential*. Environmental Technology (submitted).
- [18] Caccavo, F.J.; Lonergan, D.J.; Lovley, D.R.; Davis, M.; Stolz, J.F.; McInerney, M.J. - *Geobacter sulfurreducens sp. nov., a hydrogen- and acetate-oxidizing dissimilatory metal-reducing microorganism*. Appl. Environ. Microbiol. 60(10), 3752-3759. 1994.
- [19] Peixoto, L.; Brito, A.G.; Nogueira, R.; Kroff, P.; Parpot, P. - *Kinetic study of the redox processes at electrodes coated with Geobacter sulfurreducens biofilm in a microbial fuel cell*. Electrochemistry (submitted).
- [20] Cheng, S.; Logan, B.E. - *Increasing power generation for scaling up single-chamber air cathode microbial fuel cells*, Bioresource Technol. 102. 2011.
- [21] Rabaey, K.; Lissens, G.; Siciliano, S.D.; Verstraete, W. - *A microbial fuel cell capable of converting glucose to electricity at high rate and efficiency*. Biotechnol. Lett. 25, 1531-1535. 2003.



11º SILUSBA
Zonas Costeiras 2013

11º Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Expressão Portuguesa VII Congresso sobre Planeamento e Gestão das Zonas Costeiras dos Países de Expressão Portuguesa
27 a 30 de Maio de 2013 - Maputo, Moçambique

- [22] Bond, D.R.; Lovley, D.R. - *Electricity production by Geobacter sulfurreducens attached to electrodes*. Appl. Environ. Microbiol. 69, 1548-1555. 2003.
- [23] Liu, H.; Cheng, S.; Logan, B.E. - *Production of electricity from acetate or butyrate in a single chamber microbial fuel cell*. Environ. Sci. Technol. 39 (2), 658-662. 2005.