

MODELAGEM MATEMÁTICA DA CINÉTICA DE GERAÇÃO DE CORRENTE ELÉTRICA DE UMA CÉLULA COMBUSTÍVEL MICROBIANA INOCULADA COM SEDIMENTO MARINHO

J. T. TELEKEN¹, B. A. M. CARCIOFI¹, J. S. da SILVA², C. S. OGRODOWSKI², F. B. SANTANA²

¹ Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos

² Universidade Federal do Rio Grande, Escola de Química e Alimentos
E-mail para contato: jhony_tt@yahoo.com.br

RESUMO – O objetivo do presente trabalho foi modelar matematicamente a cinética de geração de corrente elétrica em uma célula combustível microbiana (CCM) inoculada com sedimento marinho. O modelo utilizado inclui a relação de Nernst-Monod para descrever o metabolismo microbiano e a Lei de Ohm para descrever o mecanismo de transferência eletrônica extracelular (TEE). Os dados experimentais foram obtidos em uma CCM de duas câmaras através de análises voltametria cíclica. Constatou-se que os microrganismos desenvolviam-se preferencialmente aderidos a superfície dos eletrodos e utilizavam um mecanismo de TEE predominantemente condutivo. O modelo foi capaz de descrever adequadamente aos dados experimentais e forneceu uma estimativa para condutividade elétrica do biofilme, na ordem de $10^{-3} \text{ mS m}^{-1}$. Este valor é inferior àqueles reportados para culturas microbianas puras, podendo estar associado à baixa densidade de nanofios e/ou a presença de micro-organismos não exoeletrogênicos no biofilme.

1. INTRODUÇÃO

Compreender as características cinéticas de bactérias exoeletrogênicas é um dos pontos-chaves para a melhoria do desempenho de células combustíveis microbianas (CCM). Bactérias exoeletrogênicas são frequentemente encontradas em ambientes anaeróbios como, sedimentos aquáticos, solos, efluentes e lodos de estações de tratamento. Tais microrganismos são capazes de oxidar matéria orgânica e transferir os elétrons oriundos dessa reação para um aceptor de elétrons insolúvel. Esse fluxo de elétrons, em essência, representa uma rota alternativa à respiração celular, ou seja, em uma CCM as bactérias usam o ânodo ao invés do oxigênio como aceptor final de elétrons.

Microrganismos exoeletrogênicos se desenvolvem, preferencialmente, aderidas aos eletrodos na forma de biofilmes e podem estabelecer o contato eletroquímico com estes utilizando três mecanismos de transferência eletrônica extracelular: 1) contato direto entre as proteínas presentes na membrana celular (citocromos) e o ânodo, 2) difusão de carreadores de elétrons (mediadores) entre as células e o ânodo, e 3) condução de elétrons através de

componentes sólidos como, o material extracelular (nanofios) e as múltiplas camadas de bactérias que compõem o biofilme (Lovely, 2012).

Portanto para modelar a cinética de geração de corrente elétrica em CCM deve-se levar em consideração os sobrepotenciais intracelulares, associados à reação biológica, e os extracelulares, associados ao mecanismo de TEE e as resistências impostas pelo transporte de substrato e metabólitos no interior do biofilme. Sistemáticamente, os modelos disponíveis na literatura estabelecem que a reação biológica seja descrita por uma relação de dupla limitação, a qual envolve a concentração do substrato e a contração, ou o potencial elétrico, do mecanismo de TEE (Picioreanu *et al.*, 2007; Marcus *et al.*, 2007; Pinto *et al.*, 2010;). A transferência eletrônica extracelular é modelada de acordo com o seu mecanismo: se o transporte for mediado por carreadores insolúveis, lei de Fick (Picioreanu *et al.*, 2007; Picioreanu *et al.*, 2010); e se o transporte for por condução através de componentes sólidos do biofilme, lei de Ohm (Marcus *et al.*, 2007). As reações que ocorrem entre o mecanismo de TEE e o eletrodo são descritos por modelos eletroquímicos, como a relação de Butler-Volmer (Picioreanu *et al.*, 2007; Zeng *et al.*, 2010). Diante do exposto, o objetivo do presente estudo foi identificar o principal mecanismo de TEE empregado por um biofilme exoeletrogênico de origem marinha e modelar matematicamente a cinética de geração de corrente elétrica em uma CCM de dois compartimentos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Aparato experimental

Inóculo e meio de cultivo: Sedimento de origem marinha coletado no estuário da Lagoa dos Patos, litoral sul do Brasil, foi utilizado como inóculo para a CCM. O meio de cultivo empregado segue da Silva *et al.* (2013), e como fonte de energia (doador de elétrons), utilizou-se o íon acetato (CH_3COO^-) nas concentrações de 5 e 10 g L⁻¹ de DQO.

Célula combustível microbiana: Os experimentos foram conduzidos em uma CCM de dois compartimentos, com dois eletrodos anódicos e um eletrodo catódico, conforme detalhado em da Silva *et al.* (2013).

Operação da CCM: No compartimento catódico foi utilizado ferrocianeto de potássio ($\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$), na concentração de 50 mM, comoceptor final de elétrons. O compartimento anódico foi inoculado com a suspensão obtida pela mistura de sedimento marinho com de meio de cultivo a 5 g L⁻¹ de DQO na proporção 2:1. O ânodo foi operado em regime de batelada sequencial e regime contínuo alternadamente, e a partir do 37º dia de operação dobrou-se a concentração de acetato na alimentação, passando de 5 para 10 g L⁻¹. Durante o regime de batelada sequencial eram realizadas renovações diárias de 0,3 L de meio de cultivo (da Silva *et al.*, 2013). As operações em regime contínuo eram realizadas em períodos de 24 horas cada qual com diferentes vazões de alimentação. No total, oito operações em regime contínuo foram realizadas, com vazões que iniciaram com valor de 2,7 L d⁻¹, e foram gradativamente aumentadas ao longo das operações, sendo a última realizada com vazão de 17,4 L d⁻¹.

Voltametria cíclica – biofilme: Análises de voltametria cíclica (VC) foram utilizadas para modelar a cinética de geração da corrente elétrica na CCM. Elas foram conduzidas após o 160º de operação do reator, garantindo o completo desenvolvimento do biofilme sobre o ânodo, e sempre após as etapas de alimentação para garantir que havia substrato em excesso no meio. As análises foram realizadas empregando-se um potenciostato Metrohm (PGSTAT 101, Suíça), o eletrodo de referência de Ag/AgCl KCl 3M (Metrohm, 6.0726.100, Suíça), o eletrodo anódico (a 5 cm da membrana) como eletrodo de trabalho e o eletrodo catódico como contra eletrodo. Os parâmetros selecionados para a realização da técnica foram: $E_{inicial} = -0,6 \text{ V}$ (vs Ag/AgCl), $E_{final} = 0,0 \text{ V}$ (vs Ag/AgCl), tempo de equilíbrio de 5 s, velocidades de escaneamento de 0,2, 1, 2,5, 5 e 10 mV s^{-1} e número de ciclos três. Os dias do experimento em que se procederam as análises foram: 161, 182, 195, 206, 220, 226, 256 e 276.

Voltametria cíclica – efluente: As análises de voltametria cíclica do efluente do compartimento anódico foram realizadas para investigar a importância dos compostos em solução na cinética de geração de corrente. As análises foram conduzidas em uma segunda célula eletroquímica com volume útil de 40 mL empregando-se neste caso um eletrodo de carbono vítreo (Metrohm, OD = 6 mm, ID = 1,6 mm, QA017, Suíça) como eletrodo de trabalho e um eletrodo de platina (Metrohm, 6.0331.000, Suíça) como contra eletrodo e utilizando os mesmos parâmetros da técnica realizada no biofilme. Durante as operações em regime contínuo, amostras de 40 mL de efluente eram coletadas, nos intervalos de tempo de 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 e 21 horas após o início da operação.

2.2 Modelagem matemática

O modelo matemático utilizado para descrever a cinética de geração de corrente elétrica foi proposto por Marcus *et al.* (2007). Este modelo considera o biofilme um sólido condutor 1-D, no qual a velocidade de consumo de substrato é limitada pela concentração local do substrato e pelo potencial elétrico local no interior do biofilme. Todas as análises de VC da CCM foram conduzidas em excesso de acetato, assim os efeitos referentes à sua limitação foram desconsiderados no modelo. O modelo utilizado considera a relação de Nernst-Monod, para descrever a reação biológica, e a Lei de Ohm, para descrever o mecanismo de transporte de elétrons no interior do biofilme, conforme o sistema de Equações 1, 2, 3 e 4.

$$\left(\frac{k_{bio}}{L_f} \right) \frac{d^2 \eta}{dz^2} - j_{max} \left[\frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{F}{RT} \eta\right)} \right] = 0 \quad (1)$$

$$z = 0, \quad \eta = V_{\text{ânodo}} \quad (2)$$

$$z = L_f, \quad \frac{\partial \eta}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

$$j_{cal} = -k_{bio} \frac{dn}{dz} \Big|_{z=0} \quad (4)$$

na qual j_{max} é a densidade de corrente elétrica máxima gerada pelo biofilme (A m^{-2}); k_{bio} e L_f são a condutividade elétrica (S m^{-1}) e a espessura do biofilme (m), respectivamente; $\eta(z) = E_{bio}(z) - E_{K_A}$, $E_{bio}(z)$ é o potencial elétrico em uma dada posição espacial no interior

do biofilme (V); E_{KA} é o potencial elétrico do biofilme (V) para que $j = j_{max}/2$ e $V_{ânodo}$ é definido em relação ao E_{KA} , $V_{ânodo} = E_{ânodo} - E_{KA}$, na qual $E_{ânodo}$ é o potencial elétrico do ânodo (V).

Para o caso de um biofilme com alta condutividade elétrica, a cinética de geração de corrente elétrica é limitada apenas pela cinética biológica, escrita em termos da densidade da corrente elétrica de acordo com a Equação 5.

$$j = j_{max} \left[\frac{1}{1 + \exp\left(-\frac{F}{RT}\eta^*\right)} \right] \quad (5)$$

na qual $\eta^* = E_{ânodo} - E_{KA}$.

Solução Numérica: A solução do sistema de Equações 1, 2 e 3 baseou-se no Método das Diferenças Finitas (Patankar, 1980), e a solução do sistema de equações na forma discreta foi obtida através do método de Newton para sistemas não lineares (Burden e Faires, 2011). Uma vez calculado o perfil de potencial elétrico no interior do biofilme, pode-se calcular a densidade da corrente elétrica gerada utilizando a Equação 4.

Estimativa dos parâmetros: Foram utilizados os dados das análises de VC na velocidade de escaneamento de $0,2 \text{ mV s}^{-1}$ e na direção de $-0,6$ até $0,0 \text{ V vs Ag/AgCl}$. Como o modelo contempla apenas a geração de corrente elétrica, ou seja, a direção do fluxo de elétrons ocorrendo do substrato para o eletrodo (respiração), a porção da corrente catódica foi normalizada em zero para as análises de ajuste. O parâmetro j_{max} foi estimado pelo ajuste da Equação 5 aos dados experimentais através da função *fit* da ferramenta *curve fitting tool* no *software* Matlab (MatchWorks, 7.13, EUA). E os parâmetros E_{KA} e $\frac{k_{bio}}{L_f}$, foram estimados pela minimização do valor da raiz do erro quadrado médio (*RMSE*) entre os dados de densidade de corrente elétrica observados experimentalmente (j_{exp}) e os dados calculados pelo modelo (j_{cal}) utilizando uma rotina exaustiva de cálculo. O algoritmo criado para o processo de otimização dos parâmetros foi implementado no *software* Matlab (MatchWorks, 7.13, EUA). O desempenho do modelo foi avaliado de acordo com os indicadores estatísticos: *RMSE* e o coeficiente de determinação (R^2).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das análises VC realizadas com o efluente do reator são apresentadas nas Figuras 1(a) e 1(b) e indicam um mecanismo direto de TEE do biofilme em estudo. Não foi observada a presença de picos de corrente elétrica anódica ou catódica, característicos da presença de compostos passíveis de reações de oxirredução (Bard e Faulkner, 2001), como mediadores (Marsili *et al.*, 2008 a), em nenhuma das velocidades de escaneamento (Figura 1 (a)), entre $0,2$ e 10 mV s^{-1} , e em diferentes intervalos de tempo desde o início da operação em regime contínuo (Figura 1 (b)). Estes resultados são similares àqueles apresentados por Torres *et al.* (2008) no estudo do estabelecimento de biofilme de *G. sulfurreducens* sobre o eletrodo anódico, no qual os autores constatarem a ausência de compostos eletroativos em suspensão na célula combustível com base nos resultados da análise de VC.

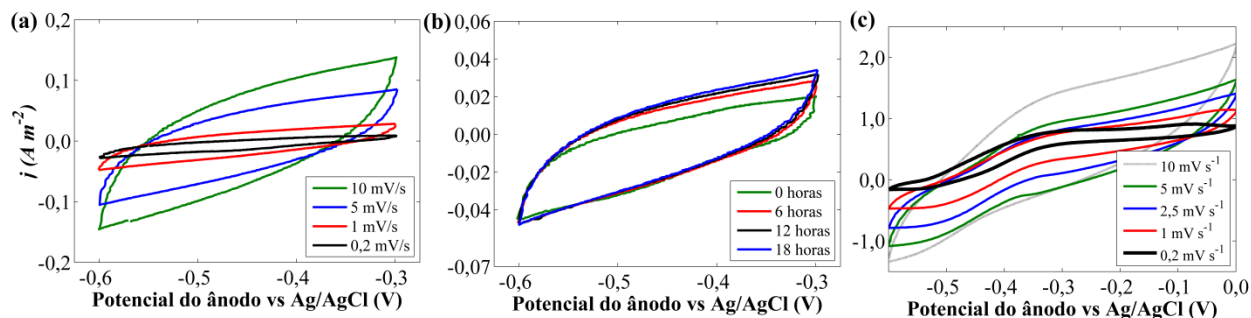


Figura 1 - Análises de VC para o efluente: (a) velocidades de escaneamento de 0,2, 1, 5 e 10 mV s⁻¹; e (b) na velocidade de 1 mV s⁻¹ após 0, 6, 12 e 18 horas de início do processo. Análises de VC para a CCM: (c) efeito da velocidade de escaneamento na resposta das análises.

Na Figura 1(c) encontram-se ilustrados os resultados das análises de VC realizadas na CCM no 161º dia de operação do reator. O tempo total da análise foi de 9 horas. Resultados semelhantes foram observados nas análises subsequentes. As diferenças nas estruturas dos ciclos para as diferentes velocidades de escaneamento de 0,2, 1, 2,5, 5 e 10 mV s⁻¹ indicando uma dinâmica lenta do processo, característica de biofilmes microbianos (Harnich e Freguia, 2012). Para a velocidade de escaneamento de 0,2 mV s⁻¹, as condições estavam dentro de uma escala de tempo suficiente para sustentar a catálise microbiana, revelada pelo perfil sigmoide da geração de corrente em função do potencial elétrico. Ciclos voltamétricos com formato sigmoide são característicos de biofilmes microbianos, em especial daqueles que utilizam mecanismos diretos de TEE, como é o caso dos biofilmes de *G. sulfurreducens* (Torres *et al.*, 2008; Lee *et al.*, 2009).

A Figura 2 ilustra o ajuste do modelo ao conjunto aos dados experimentais das análises de VC. Conforme pode ser observado o modelo foi capaz de descrever adequadamente os dados experimentais obtendo coeficiente R^2 superior a 0,988 e $RMSE$ inferior a 0,048 para todos os casos.

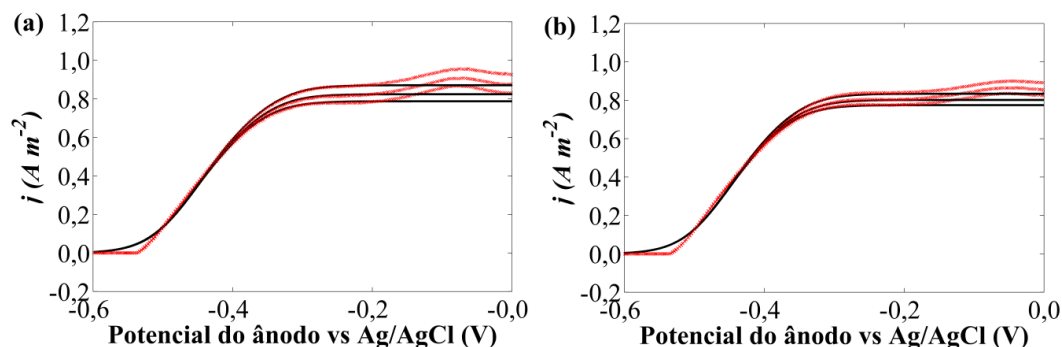


Figura 2 – Ajuste do modelo aos dados de VC do primeiro (a) (dia 161) e último dia de análise (b) (dia 275). Linha vermelha representa os dados experimentais e linha preta representa o modelo matemático.

Os valores estimados para os parâmetros j_{max} e E_{KA} estão ilustrados na tabela 1, sumarizados aos valores de culturas puras de *Geobacter sulfurreducens* e *Thermincola ferriacetica*. Os valores estimados de j_{max} apresentaram valor médio de $0,954 \text{ A m}^{-2}$. A manutenção dos valores deste parâmetro em torno de um valor médio (baixo desvio padrão) caracteriza o pleno desenvolvimento do biofilme sobre a superfície do eletrodo (Marsili *et al.*, 2010). Os valores de j_{max} do biofilme marinho foram inferiores aos obtidos para culturas puras de *G. sulfurreducens* e *T. ferriacetica* alimentados com acetato (ordem de grandeza de 10^1 A m^{-2}). Os valores estimados de E_{KA} apresentaram desvio padrão inferior a 1% do valor médio deste parâmetro. O E_{KA} também teve valor inferior comparado com as culturas puras. Os micro-organismos que apresentam os menores valores de E_{KA} podem ser favorecidos em CCM na competição com outras culturas que possuem velocidades de transferência de elétrons semelhantes ou maiores, mas requerem um maior potencial do acceptor de elétrons (Bond, 2010).

Tabela 1 – Parâmetros j_{max} e E_{KA} para o biofilme marinho e para as culturas puras de *G. sulfurreducens* e *T. ferriacetica*.

Parâmetro	Biofilme marinho	<i>G. sulfurreducens</i> *	<i>T. ferriacetica</i> **
$j_{max} \text{ (A m}^{-2}\text{)}$	$0,954 \pm 0,118$	8,39	10
$E_{KA} \text{ (V vs Ag/AgCl)}$	$-0,465 \pm 0,003$	-0,442	-0,369

(* Lee *et al.*, 2009) (**Parameswaran *et al.*, 2013)

Os valores estimados para a relação k_{bio}/L_f mantiveram-se próximos a um valor médio de $4,746 \text{ S m}^{-2}$ durante todas as análises (desvio padrão $< 9\%$). Segundo Torres *et al.* (2010), a condutividade elétrica é uma característica física inerente à composição do biofilme e, deste modo, o valor da relação seria alterado se a espessura ou a composição do biofilme variassem entre as medidas. Os valores reportados para a espessura dos biofilmes em CCM estão em uma estreita faixa, com ordem de grandeza de $10^1 \mu\text{m}$ (Marsili *et al.*, 2008b, Torres *et al.*, 2008, Lee *et al.*, 2009, Malvankar *et al.*, 2012, Parameswaran *et al.*, 2013). Entretanto, para o parâmetro k_{bio} são apresentados valores com maior amplitude, com a ordem de grandeza entre 10^{-3} e 10^0 mS cm^{-1} (El-Nagar *et al.*, 2008, Summers *et al.*, 2010, Morita *et al.*, 2011, Malvankar *et al.*, 2012). Considerando que a espessura do biofilme do presente trabalho não extrapola os valores relatados na literatura, estima-se que a sua condutividade elétrica é da ordem de grandeza de $10^{-3} \text{ mS m}^{-1}$.

Malvankar *et al.* (2011), constaram que cepas de *G. sulfurreducens* que produziam as maiores densidades de corrente elétrica apresentavam biofilmes com as maiores condutividades elétricas, demonstrando uma relação entre esta densidade e a rede de nanofios produzida pela bactéria. Na CCM do presente trabalho, as densidades de corrente elétrica foram menores do que as obtidas pelas culturas puras de *G. sulfurreducens*, podendo indicar uma menor quantidade de nanofios no biofilme da CCM, expresso pelo baixo valor do k_{bio} estimado. A CCM foi inoculada com uma cultura mista de microorganismos de origem marinha e segundo Logan e Regan (2006), biofilmes de comunidades mistas, incluem tanto diferentes micro-organismos exoeletrogênicos, quanto micro-organismos fermentadores e algumas espécies capazes de respirar utilizando um acceptor alternativo que não seja o eletrodo ou mesmo em simbiose com

outro microrganismo, essas presenças podem ter conduzido à diferença do comportamento da CCM em relação aos valores obtidos com as culturas puras.

4. CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos neste trabalho, constatou-se que a microbiota exoeletrogênica presente no sedimento marinho coletado no estuário da Lagoa dos Patos utiliza um mecanismo direto de transferência eletrônica extracelular e o modelo matemático foi capaz de descrever adequadamente aos resultados experimentais de corrente elétrica em função do potencial elétrico das análises de VC. Os resultados obtidos pelo modelo indicam que a condutividade elétrica do biofilme é uma resistência elétrica importante na CCM em estudo.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BARD, A. J., FAULKNER, L. R. Electrochemical methods fundamentals and applications. John Wiley & Sons: New York, 2001.
- BOND, R. D. Electrodes as electron acceptors, and the bacteria who love them, p. 385-400. In: Barton, L.L., Mandl, M., Loy, A., Geomicrobiology: molecular and environmental perspective. Springer: London 2010.
- BURDEN, R.L., FAIRES, J.D. Numerical analysis. Australia: Brooks/Cole, 2011.
- Da SILVA, J. S.; MEZZOMO, H.; NOGUÊS, L. B.; FRAGA, M. F.; OGRODOWSKI, C. S.; SANTANA, F. B. Efeito do processo contínuo sem reciclo de biomassa na operação de células de combustível microbiológicas. *Vetor*, v. 23, p. 46-60, 2013.
- EI-NAGGAR, M., WANGER, G., LEUNG, K. M., YUZINSKY, T. D., SOUTHAM, G., YANG, J., LAU, W. M., NEALSON, K. H., GORBY, Y. A. Electrical transport along bacterial nanowires from *Shewanella oneidensis* MR-1. *Proc Natl Acad Sci U.S.A.*, v. 107, p. 18127-18131, 2010.
- HARNISCH, F., FREGUIA, S. A basic tutorial on cyclic voltammetry for the investigation of electroactive microbial biofilms. *Chem-Asian J.*, v. 7, p. 466-475, 2012.
- LEE, H.S., TORRES, C. I., RITTMANN, B. E.: Effects of substrate diffusion and anode potential on kinetic parameters for anode-respiring bacteria. *Environ Sci Technol.*, v. 43, p. 7571-7577 2009.
- LOGAN, B. E., REGAN, J.M. Electricity-producing bacterial communities in microbial fuel cells. *TRENDS Microbiol.*, v. 14, p. 2006, 512-518.
- LOVLEY, D. Electromicrobiology. *Annu Rev Microbiol.*, v. 66, p. 391-409, 2012.
- MARCUS, A.K., TORRES, C.I., RITTMANN, B.E. Conduction-Based Modeling of the Biofilme Anode of a Microbial Fuel Cell. *Biotechnol Bioeng.*, v. 98, p.1171-1182, 2007.
- MALVANKAR, N. S., VARGAS, M., NEVIN, K. P., FRANKS, A. E., LEANG, C., KIM, B. C., INOUE, K., MESTER, T., COVALLA, S. F., JOHNSON, J. P., ROTELLO, V. M., TUOMINEN, M. T., LOVLEY, D. R. Tunable metallic-like conductivity in microbial nanowire networks. *Nat nanotechnol.*, v. 6, p. 573-579, 2011.

- MALVANKAR, N. S., TUOMINEN, M. T., LOVLEY D. R. Biofilm conductivity is a decisive variable for high-current-density *Geobacter sulfurreducens* microbial fuel cells. *Energy Environ Sci.* v. 5, p. 5790-5797, 2012.
- MARSILI, E., BARON, D. B., SHIKHARE, I. D., COURSOLE, D., GRALNICK, J. A., BOND, D. R. *Shewanella* secretes flavins that mediate extracellular electron transfer. *Proc Natl Acad Sci U.S.A.*, v. 105, p. 3968-3973, 2008a.
- MARSILI, E., ROLLEFSON, J. B., BARON, D. B., HOZALSKI, R. M., BOND, D. R. Microbial biofilm voltammetry: direct electrochemical characterization of catalytic electrode-attached biofilms. *Appl Environ Microbiol.*, v. 74, p. 7329-7337, 2008b.
- MARSILI, E., SUN, J., BOND, D.R. Voltammetry and growth physiology of *Geobacter sulfurreducens* biofilms as a function of growth stage and imposed electrode potential. *Electroanal.*, v. 22, p. 865-874, 2010.
- MORITA, M., MALVANKAR, N. S., FRANKS, A. E., SUMMERS, Z. M., GILOTEAUX, L., ROTARU, A. E., ROTARU, C., LOVLEY, D. R. Potential for direct interspecies electrons transfer in methanogenic wastewater digester aggregates. *mBio*, v. 2, 2011.
- PARAMESWARAN, P.; BRY, T.; POPAT, S. C.; LUSK, B. G., RITTMANN, B. E.; TORRES, C. I. Kinetic, electrochemical, and microscopic characterization of the thermophilic, anode-respiring bacterium *thermincola ferriacetica*. *Enviro Sci Technol.* v. 47, p. 4934-4940, 2013.
- PATANKAR, S.V. Numerical heat transfer and fluid flow. New York: Routledge, 1980.
- PICIOREANU, C., HEAD, I.M., KATURI, K.P., Van LOOSDRESCHT, M.C.M., SCOTT, K. A computational model for biofilm-based microbial fuel cells. *Water Res.*, v.41, p. 2921-2940, 2007.
- PICIOREANU, C. KATURI, K.P., van LOOSDRECHT, M.C.M., HEAD, I.M., SCOTT, K. Modelling microbial fuel cells with suspended cells and added electron transfer mediator. *J Appl Electrochem.*, v. 40, p. 151-162, 2010.
- PINTO, R.P., SRINIVASAN, B., MANUEL, M.F., TARTAKOVSKY, B. A two-population bio-electrochemical model of a microbial fuel cell. *Bioresource Technol.*, v. 101, p. 5256-5265, 2010.
- SUMMERS, Z. M., FOGARTY, H. E., LEANG, C., FRANKS, A. E., MALVANKAR, N. S., LOVLEY, D. R. Direct exchange of electrons within aggregates of an evolved syntrophic coculture of anaerobic bacteria. *Science*, v. 330, p. 1413-1415, 2010.
- TORRES, C.I., MARCUS, A.K., PARAMESWARAN, P., RITTMANN, B.E. Kinetic Experiments for evaluating the Nernst-Monod Model for Anode Respiring Bacteria (ARB) in biofilme anode. *Environ Sci Technol.*, v. 42, p. 6593-6597, 2008.
- TORRES, C. I., MARCUS, A. K., LEE, H.S, PARAMESWARAN, P., KRAJMALNIK-BROWN, R. A kinetic perspective on extracellular electron transfer by anode-repiring bacteria. *FEMS Microbiol Rev.*, v. 34, p. 3-17, 2010.
- ZENG, Y., CHOO, Y.F., KIM, B.H., WU, P. Modelling and simulation of two-chamber microbial fuel cell. *J Power Sources.*, v. 195, p. 79-89, 2010.