

MODELAGEM E SIMULAÇÃO BASEADA EM AGENTES PARA UMA CÉLULA MICROBIOLÓGICA DE COMBUSTÍVEL

DIOGO O. MACHADO^{1,2},

¹*Automação Industrial – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – IFRS.
Campus Rio Grande. Rua Eng. Alfredo Huch, 475 | Bairro Centro | CEP: 96201-460 | Rio Grande/RS
E-mails: diogo.machado@riogrande.ifrs.edu.br.*

DIANA F. ADAMATTI², EDER M. N. GONÇALVES²

²*Centro de Ciências Computacionais – C3. Universidade Federal do Rio Grande - FURG
Campus Carreiros - Av. Itália km 8 Bairro Carreiros – E-mails: dianaadamatti@furg.br
edergoncalves@furg.br*

Abstract— This paper models and simulates the Microbial Fuel Cell biofilm using agent-based simulation. This approach is comparing to analytic and micrographic models. This kind of simulation brings resources for a wide range of areas. This work show the potential of this technology to enhance de wastewater treatment and the renewable energy.

Keywords— Modelling, simulation, multi-agents, renewable energy, fuel cell.

Resumo— Este artigo modela e simula uma célula microbiológica de combustível utilizando a abordagem baseada em agentes. Sua avaliação é realizada frente à modelos analíticos e visuais. Este tipo de simulação traz subsídios para problemas em diversas áreas. Este trabalho mostra o potencial desta tecnologia para a melhoria do problema de tratamento de esgoto e da obtenção de energia através de fontes renováveis.

Palavras-chave— modelagem, simulação, multiagentes, energias renováveis, células combustíveis.

1 Introdução

Muita pesquisa tem sido feita em torno da problemática energética e seus impactos ambientais. Entre estas, a mitigação de danos ambientais e a busca por alternativas renováveis de energia são o cerne destas corridas tecnológicas. Estudos indicam que a geração bacteriana de energia elétrica combinada com o tratamento biológico de esgoto podem ser combinados e gerar uma solução tecnológica (Logan, 2008).

Neste sentido, a modelagem e a simulação computacional trazem ferramentas que podem expandir o entendimento de sistemas e processos com vantagens econômicas e temporais em relação à construção de plantas piloto, protótipos e ao planejamento e execução de experimentos. Sabe-se que sozinha a modelagem e simulação não trazem todos os aspectos e variáveis envolvidas no mundo real. Entretanto, seu uso traz mais condições para um planejamento e desenvolvimento de estratégias para os passos experimentais (Maria, 1997).

Este trabalho busca explorar de maneira qualitativa o potencial da abordagem baseada em agentes na modelagem de uma célula microbiológica de combustível. Um dos problemas deste paradigma é a dificuldade de abstração entre os modelos analíticos e os modelos baseados em agentes. Os objetivos são, portanto, programar comportamentos básicos dos agentes, as bactérias e, qualitativamente, confrontá-los com o modelo analítico mais utilizado bem

como através de padrões geométricos do filme bacteriano.

2 Revisão bibliográfica

As Células Combustíveis Microbiológicas (CCM ou *Microbial Fuel Cells – MFC*) são células capazes de gerar energia elétrica através do metabolismo de certas bactérias. Seu estudo e desenvolvimento é de extrema interdisciplinaridade, utilizando conceitos de engenharia, eletro-química, cálculo de reatores, fenômenos de transporte, eletricidade e microbiologia mostrando-se um desafio para a modelagem e simulação computacional (Logan, 2008).

O efeito exoeletrogênico, o qual certas bactérias liberam elétrons através de suas paredes celulares, foi descoberto por volta de 1911 por Potter (Potter, 1911). Este fenômeno ocorre naturalmente a partir do consumo bacteriano de substrato para o desenvolvimento de ações vitais do microorganismo tais como: motilidade, colonização, reprodução e interação com o ambiente. Alguns estudos foram realizados com o objetivo de explorar esta energia, mas até a década de 90 nenhuma iniciativa se mostrou madura o suficiente. Nos anos 90, um número cada vez maior de pesquisadores percebeu que esta tecnologia poderia ser usada de maneira híbrida com outros processos e gerar ganhos em pontos fracos desses sistemas produtivos. Desses, o que mais se destaca é a utilização de CCM junto ao tratamento de esgoto. Conforme Logan (2008), outras aplicações também são estudadas como a produção de hidrogênio, por

uma rota energeticamente mais eficiente ou o desenvolvimento de sensores para medição da Demanda Bioquímica de Oxigênio - DBO, um parâmetro de qualidade ambiental da água.

Neste sentido uma série de conceitos e parâmetros são necessários para o desenvolvimento de estudos nas áreas de tratamento de efluentes, microbiologia e eletroquímica, alguns deles serão explorados a seguir. O poder poluidor do esgoto é mensurado através da DBO e da Demanda Química de Oxigênio - DQO. A DBO quantifica a concentração de oxigênio que seria consumida apenas por microorganismos, geralmente em uma base de tempo de cinco dias. Este parâmetro é importante pois dá subsídios para avaliar o impacto que este esgoto traria no balanço microbiológico de um corpo de água. Primeiramente, deve-se observar que o esgoto carrega uma série de compostos orgânicos que podem ser consumidos por microorganismos ou reagentes químicos (Metcalf e Eddy,).

As operações responsáveis por assegurar que o esgoto gerado pelas cidades alcancem os corpos de água em condições ambientais e legalmente corretas são chamadas Estações de Tratamento de Esgoto - ETE. São estações que executam processos os quais garantem a qualidade ambiental da água que retorna a rios, lagos e mar. Estes processos são basicamente divididos em três etapas: o tratamento primário, secundário e terciário que consistem, de maneira simplificada, na limpeza mecânica, química e microbiana, respectivamente. No tratamento secundário, a limpeza química usa parâmetros que quantificam o poder poluidor de um determinado esgoto a fim de mitigar este impacto antes que este esgoto volte ao meio ambiente.

No caso da DBO, um esgoto com alta concentração de compostos carbonáceos fosse despejado em um rio, os organismos que ali vivem teriam mais alimento e necessitariam também de mais oxigênio para metabolizar este alimento. Esta abundância de alimento geraria uma reprodução bacteriana que acarretaria em um consumo de oxigênio ainda maior, fazendo com que haja um déficit de oxigênio para outras formas de vida como vegetais e peixes provocando sua morte. Além disto, em um ambiente sem oxigênio, microorganismos anaeróbios cresceriam, liberando compostos tóxicos e mau cheirosos. Uma analogia pode ser feita com a DQO, Demanda Química de Oxigênio, com a diferença que no caso da demanda química, todos os consumidores de oxigênio entrariam em consideração, isto é, bactérias e espécies químicas (Metcalf e Eddy, 2003).

Estes parâmetros são regulados no tratamento secundário em uma ETE. Basicamente, é projetado um tanque em que uma comunidade superpopulosa de microorganismos trabalha consumindo a matéria carbonácea, assim diminuindo a DQO e DBO. Este tanque, é chamado tanque de lodo ativado e possui dispersores de ar para adicionar oxigênio ao meio. Neste tanque até 95% da DQO pode ser reduzida. Assim, há uma compatibilidade com os processos expostos: a CCM utiliza microorganismos para a geração de

energia e as ETE utilizam microorganismos para a mitigação da poluição do esgoto.

Conforme exposto, a tecnologia para o tratamento de esgoto é conhecida e aplicada. Entretanto, alguns dados mostram que serviços de saneamento básico ainda deixam a desejar em muitos lugares no Brasil. De acordo com a Pesquisa de Saneamento Básico no Brasil (IBGE, 2008), 34,8 milhões de pessoas vivem sem sistema de drenagem ou tratamento de esgoto. Isto gera um impacto negativo nas áreas da saúde e ambiental para os cofres públicos. Uma questão técnica que dificulta a implementação de ETE, em cidades menores que 100.000 habitantes, é a curva de viabilidade econômica. Para ser economicamente favorável a construção e operação de uma ETE deve aportar um maior volume de esgoto.

É estimado que o conteúdo energético na forma de compostos orgânicos poluidores seja 5,9 vezes maior que a energia gasta durante o processo de limpeza executado por uma ETE (Copper et al apud Logan, 2008). Considerando as perdas existentes em toda a cadeia de transformação energética, ainda assim, é possível que suas implementações e vantagens recíprocas tenham viabilidade econômica, evidentemente trazendo vantagens ambientais. A geração local de energia, a diminuição no consumo de energia da concessionária, a autossuficiência energética da ETE, o acúmulo de ativos com a venda de energia, a possibilidade de empreendimento em locais sem rede de energia elétrica, justificam o aumento da pesquisa nesta área.

Assim, é importante compreender quais são os conceitos científicos necessários para o entendimento de uma CCM. Seu funcionamento pode ser explicado macroscopicamente, através do funcionamento de uma célula galvânica, que possui duas câmaras: o compartimento anódico e o catódico. Nestes compartimentos, preenchidos com solução iônica, estão dois eletrodos: ânodo e o cátodo. Neste, através de reações de oxirredução ocorre a liberação de elétrons e prótons. Caso o ânodo e o cátodo sejam ligados em um circuito elétrico com uma determinada carga, as concentrações de cargas positivas e negativas no ânodo e no cátodo geram uma força eletromotriz entre os eletrodos e assim geram uma corrente elétrica. As CCM utilizam uma arquitetura similar à célula galvânica. Entretanto, ao invés de utilizar espécies químicas na solução iônica, são utilizadas bactérias. Tais bactérias executam as reações de oxirredução para viver e reproduzir (ver Figura 1).

A fim de ampliar o entendimento do funcionamento das CCM, alguns autores modelam este sistema de maneira similar às equações de cinética química das células galvânicas, considerando as bactérias como catalizadores das reações. Entretanto, esta é uma abstração com alto grau de simplificação, já que os microorganismos não são espécies químicas. Existem muitos paradigmas sobre o tipo de modelagem a ser feita neste sistema e muitas formas de alcançar modelos e simulações, todavia, não há método ou para-

digma computacional que seja tido como padrão na área.

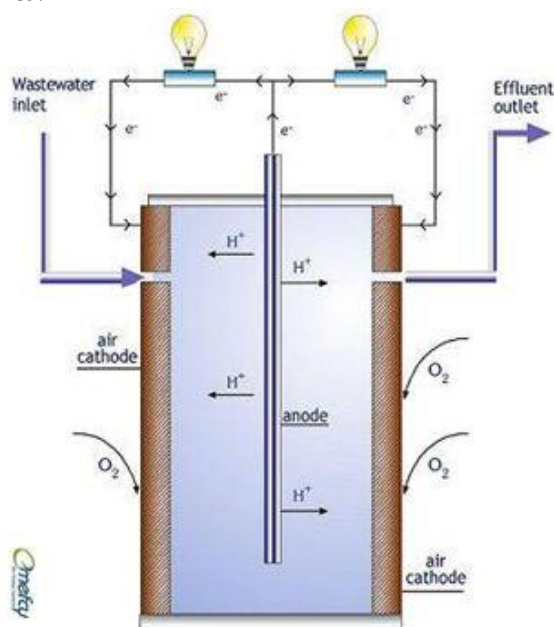


Figura 1. Célula microbiana de combustível. As bactérias ficam distribuídas no ânodo. Fonte: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Emefcy-MFC.JPG>

Microscopicamente, as bactérias se multiplicam na superfície do ânodo, gerando o que se chama de biofilme. É neste nível de abstração que diversos estudos são feitos a fim de modelar e simular estas interações objetivando explicar ou extrapolar comportamentos. Uma microfotografia real do biofilme é apresentada pela Figura 2.

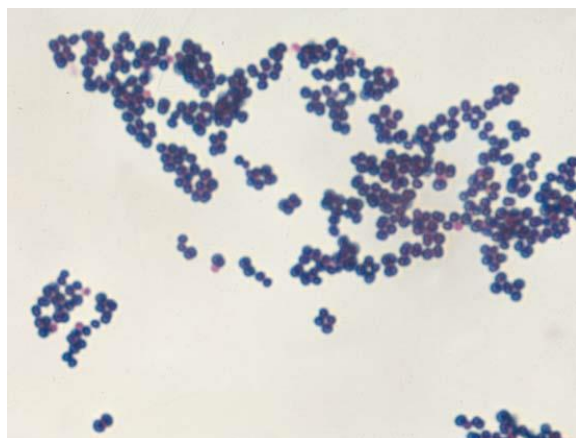


Figura 2. Colônia de bactérias – biofilme Rakosy (2004). Disponível em <http://global.britannica.com/science/Staphylococcus>

O crescimento do biofilme possui o perfil de consumo de substrato em relação ao tempo apresentado pela Figura 3. Este comportamento é modelado matematicamente pela equação de Monod (Monod, 1949):

$$\mu = \frac{\mu_{\max} \times S}{K_s + S} \quad (1)$$

Onde μ e $\mu_{\max}$ são a velocidade específica e máxima de crescimento (h^{-1}), respectivamente. S é a concen-

tração de substrato (mol/L) e K_s é a constante de Monod (mol/L). A constante de Monod representa a concentração onde é alcançada a metade da velocidade máxima de crescimento. Esta equação limita o crescimento bacteriano a apenas um substrato.

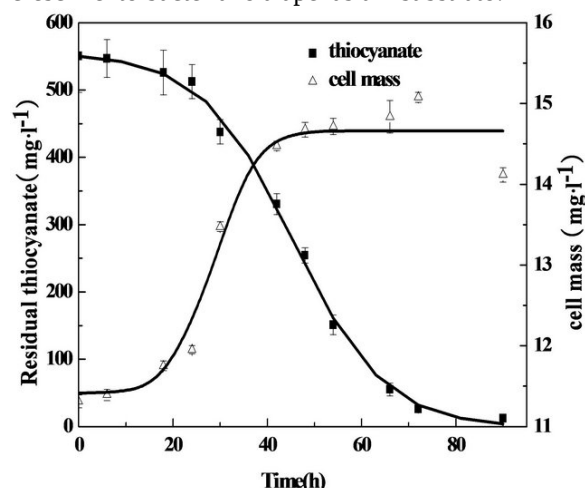


Figura 3. Curva de crescimento bacteriano (Huang et al, 2013).

Diversos frameworks para modelagem destes tipos de sistemas naturais complexos são utilizados: Klugl et al (2002) colocam redes de filas, redes de Petri, autômatos celulares e sistemas multiagentes. Para modelagem com sistemas multiagentes é necessário uma diferente metodologia, onde o modelador deve resolver o problema de projetar ações básicas dos agentes as quais fazem emergir um comportamento global coerente do sistema. Algumas vantagens dessa proposta são o paralelismo computacional, e o efeito do ambiente sobre os agentes, já as desvantagens apresentam-se na carência de precisão formal, e dificuldades de modelar comportamento dos agentes

Esser et al (2015) coloca ainda mais paradigmas de modelagem para o problema específico de crescimento microbiano. Conceitos e formas de modelagens apontados são: matemáticos, de transporte reativo, fenomenológicos, mecânicos, cinéticos, redes Bayesianas, redes neurais, modelos baseados em partículas e agentes. Nestas inclui-se multiagentes, que utiliza os dois últimos conceitos. Esse trabalho ainda expõe que os últimos esforços para a modelagem de CCM, concomitante com a tecnologia de tratamento de esgoto modelado através de multiagente, utiliza principalmente parâmetros como: transporte de massa, balanços estequiométricos e balanço de energia.

3 Modelagem de CCM utilizando simulação baseada em agentes

Foi realizado a modelagem e simulação baseada em agentes, com o uso do ambiente NetLogo. A ideia é programar os agentes com ações básicas, e depois realizar uma avaliação qualitativa frente ao modelo de Monod e ao arranjo de biofilme mostrados nas figuras 2 e 3, respectivamente.

O Netlogo   uma plataforma para programac o baseada em agentes, onde agentes são denominados turtles e patches são os locais na superfície ou espaço. As ticks são turnos de execu o do algoritmo, o que pode-se atribuir ao tempo. Todas aplica es desenvolvidas utilizam os comandos setup e go para dar o passo inicial e executar o algoritmo, respectivamente.

Para o desenvolvimento deste modelo foi declarado o conjunto de agentes chamados *bactérias*, com o indivíduo denominado *bactéria*, representados pelos  rculos escuros (ver Figuras 8). Os atributos destes agentes são a reserva de energia interna, a energia interna máxima e a energia interna inicial. O mundo destes agentes   a área evidenciada na Figura 8, e representa a superfície do ânodo. Esta superfície   dividida em patches onde os mesmos representam o espaço que uma bactéria pode ocupar. Os atributos dos patches são a concentra o de substrato e o restante deste substrato após o metabolismo.

Alguns dos parâmetros utilizados como SubstrateQt, Efficiency, numberbacterias, metabolismenergy, representam, respectivamente, a concentra o de substrato, eficiência metabólica, número inicial de bactérias no biofilme e energia interna inicial. A saída do algoritmo   o número de bactérias. O algoritmo utilizado executa, de maneira simplificada, as seguintes fun es: difusão do substrato, crescimento do biofilme, metabolismo e morte de bactérias.

Para a difusão do substrato foi colocado apenas um balanço de massa, considerando regime permanente de alimenta o de substrato, isto  , a cada tick a concentra o dos patches   atualizada,   executada a rotina de metaboliza o e um resto   calculado, conforme colocado:

$$[S]_{\text{resto}} = [S]_{\text{total}} - [S]_{\text{consumido}}$$

Onde $[S]$ representa a concentra o de substrato restante, total e consumido conforme índices em termos percentuais de zero até a satura o de substrato. Por sua vez a concentra o de substrato consumido   integrada célula por célula através da seguinte regra:

$$[S]_{\text{consumido}} = [S]_{\text{total}} \times X_{\text{bactérias}} \times \eta_{\text{metabólica}}$$

Onde $X_{\text{bactérias}}$ e $\eta_{\text{metabólica}}$ são a popula o de bactérias, a qual foi normalizada no algoritmo, e a eficiência metabólica respectivamente em termos percentuais. O crescimento do biofilme foi modelado a partir da seguinte regra: caso a energia interna da bactéria estivesse maior que 40% da energia máxima, então esta bactéria poderia se reproduzir. Esta a o acarreta na diminui o de um quarto da energia antes da reprodu o. A reprodu o da bactéria resulta no nascimento de quatro novos indivíduos, os quais possuem a metade da energia de seu progenitor. Sabe-se que a reprodu o bacteriana gera apenas um indivíduo, assim, para cada tick tem-se aproximadamente duas reprodu es, já que ao fim tem-se cinco agentes.

A energia interna da bactéria por sua vez foi modelada a partir do metabolismo, que possui a seguinte regra: a quantidade de energia proveniente do sub-

trato   armazenada a partir da eficiência do metabolismo da bactéria. Logo,   em fun o da capacidade da bactéria em absorver substrato, e da concentra o deste, que a bactéria terá um balanço de energia interna.

Assim, tem-se um modelo simplificado do crescimento do biofilme. As quantidades de entrada foram normalizadas de 0 a 100%, isto  , as quantidades de energia interna e concentra o de substratos variam de sem energia até a satura o. Caso a energia interna alcance 0, então a célula morre.

4 Análise dos resultados

A Tabela 1 apresenta a varia o dos valores das variáveis utilizados nos testes.

Tabela 1 – Estratégia dos testes.

Variável	Descri�o	Teste 1	Teste 2
substrateQt	Concentra�o de substrato (%)	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100	20
efficiency	Eficiência metabólica (%)	50	25, 50, 75, 100
numberbacterias	Número de bactérias iniciais	25	
metabolismenergy	Energia interna inicial (%)	50	

4.1 Teste 1 – Simula o com varia o na concentra o de substrato

Para o primeiro teste com o modelo   variado o crescimento microbiano da quantidade inicial até o equilíbrio. Com concentra es de 0 a 100%, varia es de 10% e eficiência constante de 50%, têm-se as seguintes respostas:

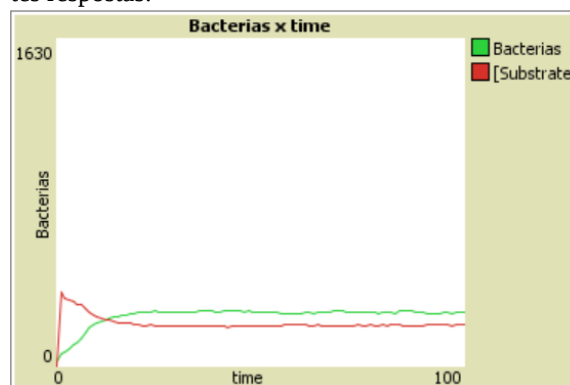


Figura 4. Teste 1 com concentra o de substrato de 10%.

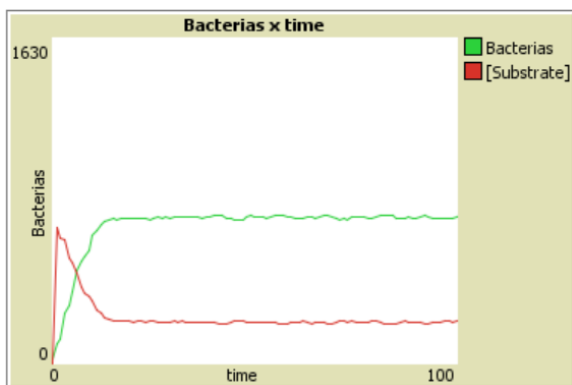


Figura 5. Teste 1 com concentração de substrato de 20%.

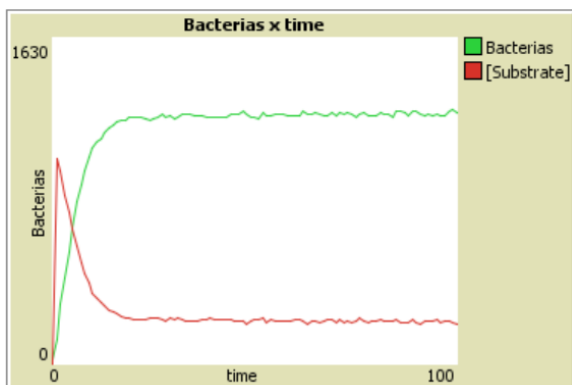


Figura 6. Teste 1 com concentração de substrato de 30%.

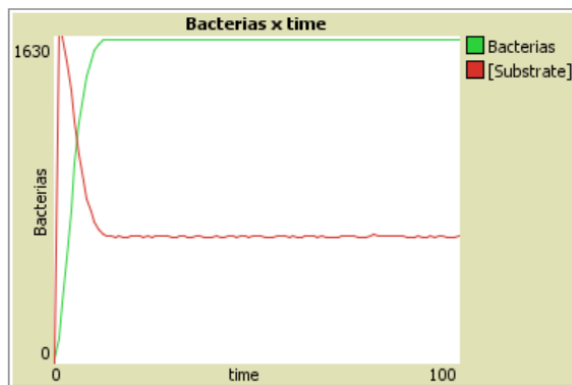


Figura 7. Teste 1 com concentração de substrato de 40%.

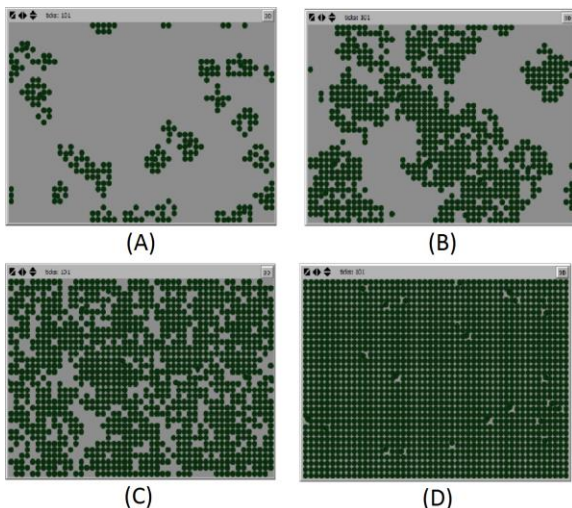


Figura 8. Biofilme simulado no Teste 1 com concentração de substrato de 10% (A), 20% (B), 30% (C) e 40% (D).

A Figura 8 mostra o crescimento populacional em função da disponibilidade de nutriente. Um padrão   evidenciado, com conglomerados de bactérias e alguns valores. Isso ocorre devido a reprodução das células e a adesão de novas células em torno da progenitora. Em (A) e (B), parte do ânodo se mostra vazio, já em (D)   representado um preenchimento total do ânodo. Esta última imagem do eletrodo mostra um limite físico de produção de energia deste sistema, já que apenas as células que estão no biofilme ter o condições de escoar seus elétrons para o ânodo e gerar energia útil.

Os resultados de população vs tempo, Figuras 4, 5, 6, e 7, mostram um comportamento exponencial do crescimento bacteriano e decaimento exponencial da concentração de substrato.   possível avaliar o ruído projetado no modelo e a fase de crescimento e estabilização. Variando-se a concentração de substrato não há mudança no tempo de estabilização do sistema. Isso indica que com o aumento de substrato, a célula possui uma taxa de crescimento maior para que, no resultado final, a metabolização de substrato alcance o regime permanente no mesmo tempo. Por fim,   possível verificar o comportamento dos agentes em função da equação de Monod, comparando-se os valores de crescimento da Figura 5 com os dados reais da Figura 3.

Na simulação apresentada na Figura 7, a concentração estava no valor de 40%, sendo possível perceber o aumento da concentração restante, não metabolizada. Isto se deve ao fato do sistema ser alimentado de forma contínua. Assim, foi realizado um teste para mostrar este comportamento da célula (Figura 9).

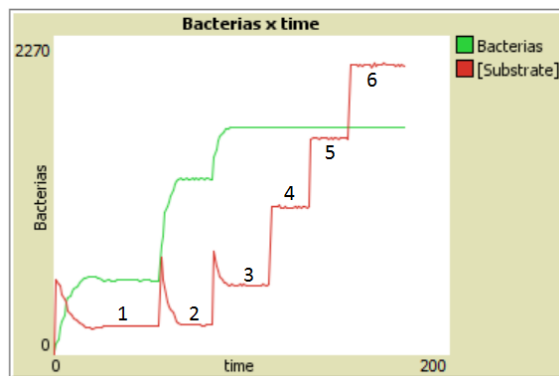


Figura 9 – Teste 1 – Variação contínua da concentração de substrato: 15% (1), 30% (2), 45% (3), 60% (4), 75% (5), 90% (6).

Através deste teste   evidenciado o crescimento bacteriano através do aumento da concentração de substrato. A resposta ao aumento   instantânea. Entretanto, existe um tempo de reprodução até atingir-se outro patamar de população microbiana. Este comportamento varia conforme o tipo de microrganismo, porém, era esperado um tempo de adaptação, um atraso, ao novo ambiente. Na terceira mudança de concentração (3) já   possível visualizar a tendência de saturação, devido o aumento do $[S]_{\text{resto}}$, ou seja, da concentração de substrato em solução. Da

quarta (4) até a sexta (6) mudança, o aumento de substrato não acarreta aumento na população do biofilme, fato explicado pela população máxima de biofilme no eletrodo limitada pela área do ânodo.

4.2 Teste 2 – Simulação com variação da eficiência metabólica da bactéria.

Este teste alterou a eficiência metabólica da bactéria para uma concentração de entrada de substrato constante e avaliou o impacto na população do biofilme. Para uma concentração constante de 20% de substrato, e variações de 25% na eficiência (ver Figura 14).

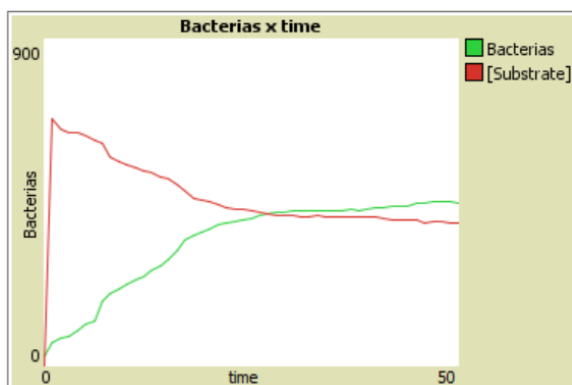


Figura 10. Teste 2 com eficiência de 10%.

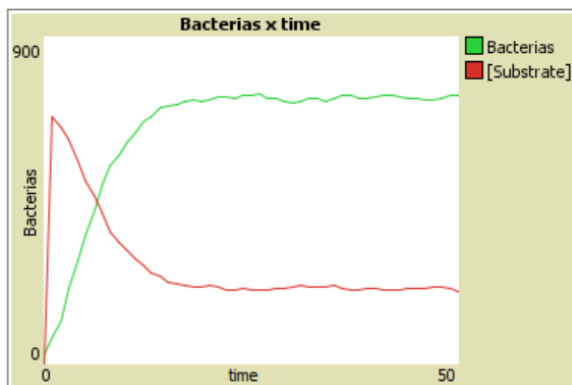


Figura 11. Teste 2 com eficiência de 20%.

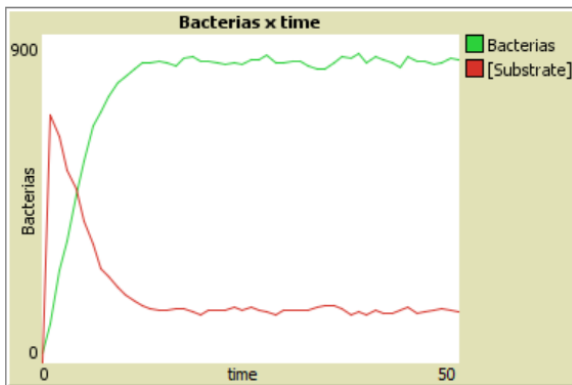


Figura 12. Teste 2 com eficiência de 30%.

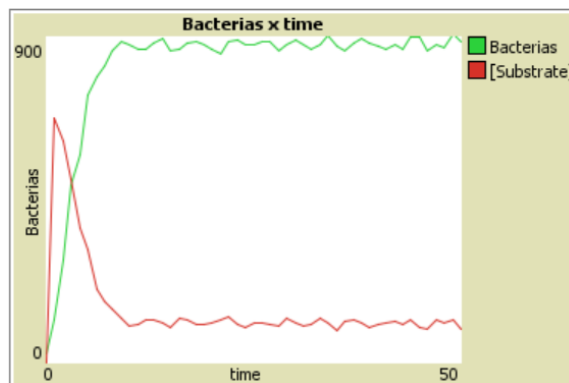


Figura 13. Teste 2 com eficiência de 40%.

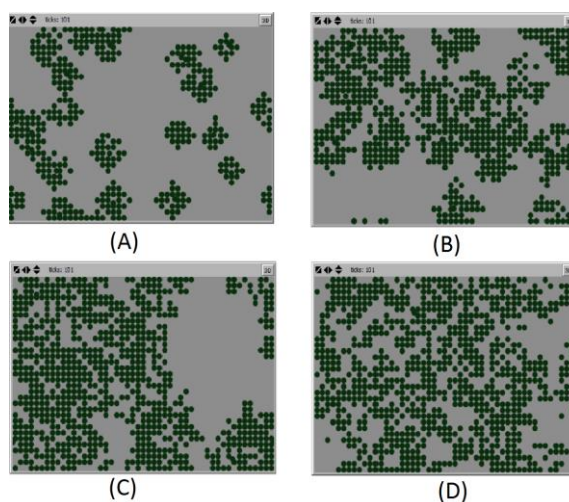


Figura 14 – Teste 2: Eficiência de 10% (A), 20% (B), 30% (C) e 40% (D).

Novamente é possível avaliar o crescimento do biofilme através do aumento da eficiência metabólica. Entretanto, aparentemente, para o mesmo período, as células estão mais distantes entre si. Através do aumento da eficiência, há uma diferença no tempo de estabilização para os diferentes testes. Isso ocorre pela necessidade de mais tempo para a bactéria alcançar a energia interna necessária para sua reprodução. Este parâmetro, conforme exposto na equação de Monod, é chamado "constante de Monod". Esse teste evidencia uma relação entre a eficiência metabólica da bactéria com este parâmetro do modelo analítico.

A figura 15 mostra a diminuição da concentração do substrato restante após o equilíbrio. Houve o aumento na variabilidade da população de bactérias em regime permanente, fato que aparentemente não ocorreu com os testes realizados através da variação na concentração. O teste indica que, para uma mesma concentração de substrato, diferentes concentrações de bactérias são alcançadas e diferentes concentrações finais de substrato são alcançadas. A frequência de oscilação na população é maior nos valores (3) e (4). Isto implica que, com eficiências maiores, o sistema se torna mais ruidoso.

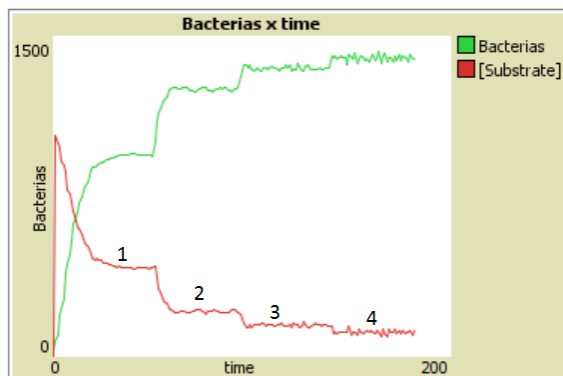


Figura 15. Teste 2 – Variação contínua da eficiência. 25% (1), 50% (2), 75% (3), 100% (4).

5 Conclusões e trabalhos futuros

O artigo apresenta, através de abstrações simples e programação de comportamentos básicos de bactérias, que modelos baseados em agentes são ferramentas adequadas na modelagem destes tipos de sistemas. Através da variação da concentração de substrato é possível visualizar qualitativamente o comportamento do modelo frente ao modelo matemático de Monod (conforme testes apresentados nas Figuras 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14). Além disto, a abordagem baseada em agentes fornece informações valiosas da geometria e organização espacial do biofilme, a qual pode também ser verificada frente à micrografia do biofilme e a interface do NetLogo (conforme apresentados nas Figuras 2, 8 e 14). Essas características que podem trazer respostas frente ao comportamento dinâmico do biofilme.

Com trabalhos futuros, espera-se aprimorar o modelo e a simulação, realizando uma adequação dimensional ao modelo; tratando o tamanho do eletrodo como uma variável; realizando o balanço de elétrons variável; explorando os efeitos acerca da eficiência coulombica; implementando os efeitos de transporte e fluidodinâmica; e desenvolvendo o modelo em três dimensões.

Agradecimentos

Agradeço a dedicação e o trabalho dos orientadores. Às instituições que suportaram esta atividade: a FURG e ao IFRS – campus Rio Grande. Aos colegas de mestrado e trabalho.

Referências Bibliográficas

- Cooper, N.B., Marshall, J.W., Hunt, K. and Reidy, J.G. (2007) Less power, great performance. *Wat. Environ. Technol.* 19(2), 63-66.
- Esser, D. S., Leveau, J. H. J., Meyer, K. M. (2015) "Modeling microbial growth and dynamics." In:

- Appl Microbiol Biotechnol* (2015) 99:8831–8846 Springer-Verlag. Berlin Heidelberg- 2015.
- Huang, H., Feng, C., Pan X., Wu, H., Ren, Y., Wu, C., Wei C., (2013) "Thiocyanate Oxidation by Coculture from a Coke Wastewater Treatment Plant". In: *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*. Vol. 4 No.2A.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, (2008) "Pesquisa Nacional de Saneamento Básico". ISBN 978-85-240-4136-5. Rio de Janeiro - IBGE 2010
- Klugl, F., Oeichslein, C., Puppe, F., Dornhaus, A., (2002) "Multi-agent modelling in comparison to standard modelling". In: *AIS'2002 (Artificial Intelligence, Simulation and Planning in High Autonomy Systems)*, F. J. Barros and N. Giambiasi (Eds.) SCS Publishing House, pp 105-110, 2002.
- Logan, B. E. (2008) "Microbial Fuel Cells". John Wiley & Sons. New Jersey.
- Potter, M.C. (1911) "Electrical effects accompanying the decomposition of organic compounds." *Proc. Roy. SOC. London Ser. B* 84,260-276.
- Monod, J. (1949) "The growth of bacterial cultures". *Annual Review of Microbiology*. Vol. 3, 371-394.
- Maria, A. (1997) "Introduction to modeling and simulation". In: *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference*.
- METCALF & EDDY. *Wastewater Engineering treatment Disposal Reuse*. 4. ed. New York, McGraw - Hill Book, 2003.