

II-108 - SEPARAÇÃO DE MICROALGAS PARA PRODUÇÃO DE BIODIESEL EM REATOR DE ELETROFLOTAÇÃO POR CAMPO ELÉTRICO UNIFORME

Eliezer Fares Abdala Neto ⁽¹⁾

Engenheiro Mecânico pela Universidade de Fortaleza. Mestre em Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Doutor em Saneamento Ambiental pela UFC. Pesquisador Pós-Doc (Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental - UFC).

Anna Patrícia Florentino de Souza Silva

Bióloga pela Universidade Estadual do Ceará. Mestre em Saneamento Ambiental pela Universidade Federal do Ceará. Doutoranda em Microbiologia na Wageningen University.

Mayara Carantino Costa

Engenheira Civil pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Mestre em Saneamento Ambiental pela UFC. Doutora em Saneamento Ambiental pela UFC. Pesquisadora pós-doc (Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental - UFC).

Riamburgo Gomes de Carvalho Neto

Engenheiro Químico pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Mestrando em Saneamento Ambiental pela UFC.

André Bezerra dos Santos

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Ceará (UFC). Mestre em Saneamento Ambiental pela UFC. Doutor em Saneamento Ambiental pela Wageningen University. Professor Adjunto IV do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental na UFC.

Endereço ⁽¹⁾: Rua Carlos Vasconcelos, 472 - Meireles – Fortaleza – Ce - CEP: 60115-170 - Brasil - Tel: (85) 88559010 - e-mail: superagua@superig.com.br

RESUMO

Microalgas vêm sendo alvo de pesquisas e aplicação em escala real haja vista que as mesmas podem ser convertidas em biodiesel. Antecede o processo de produção do biodiesel, a separação das microalgas que apresentam tamanho reduzido e se encontram diluídas no meio. Entretanto, o processo de separação algal é problemático e as tecnologias empregadas são de alto custo.. O presente trabalho objetivou desenvolver e otimizar um reator de eletroflotação por campo elétrico uniforme para o processo de separação de microalgas contidas em efluente de lagoa de maturação. O reator construído em acrílico foi testado com diferentes estratégias para entrada e saída do efluente. O reator continha eletrodos metálicos insolúveis e foi operado com vazões de 30, 200 e 500 mL.min⁻¹. A eficiência foi avaliada pela medida da turbidez das amostras coletadas em 4, 15, 20 e 30 minutos de operação. Para todas as situações estudadas, a melhor eficiência de remoção de turbidez foi de 81% com tempo de detenção de 15 minutos que correspondia a uma vazão de 200 mL.min⁻¹. Os detalhes hidrodinâmicos inerentes aos reatores potencializam ações de flotação e subsequente aumento da eficiência do sistema. O reator de eletroflotação por campo elétrico uniforme mostrou-se como técnica viável para separação de microalgas em efluentes, sendo obtida biomassa algal concentrada para eventual produção de biocombustível ou outros tipos de reusos.

PALAVRAS-CHAVE: Eletroflotação, separação de microalgas, processos eletrolíticos.

INTRODUÇÃO

Elevada produção de microalgas são encontradas em efluentes de lagoas de maturação, que ao atingirem o corpo receptor podem causar impactos ambientais, além disso, para o aproveitamento desta biomassa diluída, é necessário que ocorra o processo de separação no meio aquático (RAWAT *et al.*, 2013). Esta biomassa algal uma vez separada do efluente pode ser aproveitada para produção de biocombustíveis (RAWAT *et al.*, 2011; e PARMAR *et al.*, 2011).

Os processos utilizados para separação de biomassa algal incluem coagulação-floculação, centrifugação, filtração, sedimentação por gravidade, flotação e técnicas de eletroforese, que em geral estão associados a elevados custos (GRIMA *et al.*, 2003; GAO *et al.*, 2010; CHEN, 2011; CHRISTENSON e SIMS, 2011).

Pesquisas têm elucidado o grande potencial dos processos eletroquímicos aplicados ao tratamento de efluentes, destacam-se como principais vantagens a operação e automação facilitadas e a utilização do elétron como reagente, fornecendo uma alternativa promissora aos métodos tradicionais (FORNAZARI *et al.*, 2009), além de permitir a produção de compostos desinfetantes *in situ*, ao passo que se eliminam os problemas de estocagem e transporte de produtos químicos perigosos como, por exemplo, o cloro (RIBEIRO *et al.*, 2004).

Na remediação de efluentes aquosos a aplicação de processo eletrolítico não produz odores fortes, há a desobrigação de adição de produtos químicos durante o tratamento, com tempos curtos de detenção do efluente e de fácil automatização (ANGELIS *et al.*, 1998), aliados à sua simplicidade de operação e desempenho confiável para uma ampla variedade de compostos tóxicos. Por outro lado, a atividade catalítica, e consequentemente a eficiência da degradação, é dependente do tipo de material que constitui o eletrodo, da sua estrutura morfológica e natureza de seus constituintes. Jüttner *et al.*, (2000) e Angelis *et al.*, (1998) descrevem os processos eletrolíticos como “processos limpos”, ou seja, sem geração de lodos, de grande compatibilidade ambiental onde o principal reagente é o elétron.

De acordo com Ticianelli *et al.* (2005), para que ocorra eletrólise é necessário que dois eletrodos ou condutores eletrônicos, devidamente espaçados, conforme mostrado na figura 1, estejam mergulhados em um eletrólito ou condutor iônico, contido em um recipiente chamado célula unitária. Estes eletrodos são ligados aos pólos de uma fonte de corrente contínua (CC), onde ao pólo positivo liga-se o ânodo e ao negativo o cátodo. Ao se aplicar uma tensão entre os eletrodos, forma-se um campo elétrico entre eles.

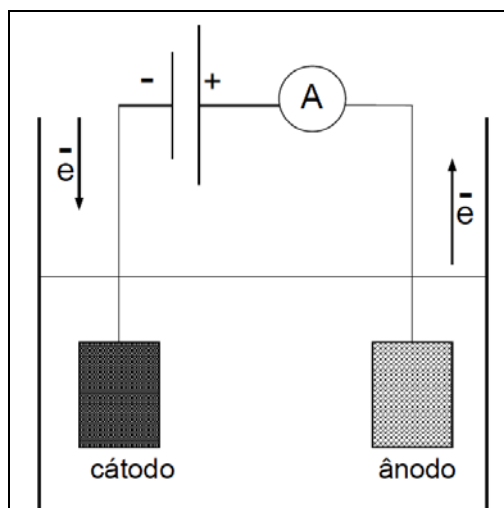


Figura 1 – Representação de um processo eletrolítico.
Fonte: MONEGO (2007).

Entre dois eletrodos imersos em uma solução eletrolítica, submetidos a uma diferença de potencial, reações eletroquímicas de oxidação e redução começam a ocorrer no ânodo e no cátodo, respectivamente. Tais reações podem ser governadas por fenômenos associados a eletrólise, que, por sua vez, dependem da diferença de potencial aplicada (SILVA *et al.*, 2005).

Araya-Farias *et al.* (2008) definem eletroflotação como um processo de separação sólido/líquido baseado na suspensão de partículas por bolhas de gás (hidrogênio e oxigênio) geradas na superfície de eletrodos. Em processos de flotação por ar dissolvido o diâmetro das bolhas produzidas varia entre 600 – 1000 μm . Essas bolhas, por serem muito largas, não são efetivas para flotar partículas com diâmetros abaixo de 20 μm . Porém, com a eletroflotação é possível a produção de bolhas com diâmetro variando de 15 a 80 μm , que são eficientes na flotação de pequenas partículas (SARKAR *et al.*, 2011).

A pesquisa teve como objetivo avaliar a aplicação da eletroflotação por campo elétrico uniforme na separação de microalgas em efluente de lagoa estabilização, visando à produção de biodiesel.

MATERIAIS E MÉTODOS

Coleta da amostra

A amostra foi coletada em uma estação de tratamento de esgotos (ETE), constituída por uma lagoa aerada facultativa seguida de uma lagoa facultativa secundária e duas lagoas de maturação em série. As amostras foram coletadas na última lagoa de maturação, na saída do efluente.

Configuração do reator de eletroflotação por campo elétrico uniforme

O processo eletrolítico aqui empregado foi baseado na geração de campo elétrico, uniformemente variado, proveniente de uma fonte de tensão elétrica externa. Esta corrente elétrica emite elétrons alternadamente (corrente alternada - CA), aos eletrodos submersos no efluente. Por outro lado, as moléculas de água presentes no efluente possuem também sua faixa de frequência vibratória natural (esticamento simétrico, esticamento assimétrico e dobramento), pois qualquer objeto formado por um material elástico, quando perturbado, vibrará com seu próprio conjunto de frequências particulares, que juntas formam seu padrão de emissão. A isto se denomina de frequência natural da matéria, portanto desde planetas a átomos possui elasticidade própria e vibra em uma ou mais frequência natural (SERWAY, JEWETT; 2011; TIPLER, MOSCA; 2009). Desta forma, buscou-se alcançar o princípio da superposição que, segundo Hewitt (2002), quando duas ou mais ondas ocupam determinado espaço ao mesmo tempo, os deslocamentos causados por cada uma delas se adicionam em cada ponto. Assim, quando a crista de uma onda se superpõe à crista de outra, seus efeitos individuais se somam e produzem uma onda resultante com amplitude maior. Isto se caracteriza como um fenômeno de ressonância e ocorre quando a frequência de vibração forçada, de uma determinada matéria, se iguala à frequência natural desta.

Este efeito só é alcançado quando é empregada uma força capaz de trazer a matéria a sua posição original e energia suficiente para mantê-lo vibrando. Quando duas placas metálicas paralelas são submetidas a uma corrente alternada de baixa frequência, à medida que a tensão se alterna, a carga positiva atribuída a uma das placas é levada a zero, e a carga negativa surge. Enquanto isso ocorre, o campo elétrico desaparece e depois reaparece na direção oposta. A medida que a carga escorre lentamente de um lado para o outro, o campo elétrico segue o mesmo movimento. Em cada instante o campo elétrico é uniforme. (FEYNMAN, LEIGHTON, SANDS; 2008; HEWITT; 2002; SERWAY, JEWETT; 2011; TIPLER, MOSCA; 2009).

Um modelo de reator foi construído com volume aproximado de 3 L, em acrílico, para melhor acompanhamento da evolução do processo de eletroflotação (Figura 2). Os elétrons foram providos diretamente ao efluente por cinco pares de cátodo e ânodo (não consumíveis), feitos de placas de aço inoxidável de 15x5 cm e espessura de 0,2 mm, devidamente espaçadas por 5 mm.

O campo elétrico foi provocado entres os eletrodos submersos no efluente, de modo a exercer um torque nas moléculas polares, com tensão elétrica fornecida por fonte alternada e estabilizada (Hayama, Brasil), de 12 V para uma corrente elétrica de até 6 A. As conexões da fonte aos eletrodos foram realizadas por cabos elétrico do tipo PP 2 x 1,5 mm. Utilizou-se um conversor CC/CA, promovendo corrente alternada em eletrodos metálicos submersos, gerando ondas eletromagnéticas, com número de onda entre 0 e 4000 cm⁻¹ (contemplando o espectro do infravermelho). Segundo Sun *et al.* (2000), pulso de alta tensão pode levar à formação de um forte campo elétrico e radicais livres, tais como: •OH, •O, H⁺ e H₂O₂.

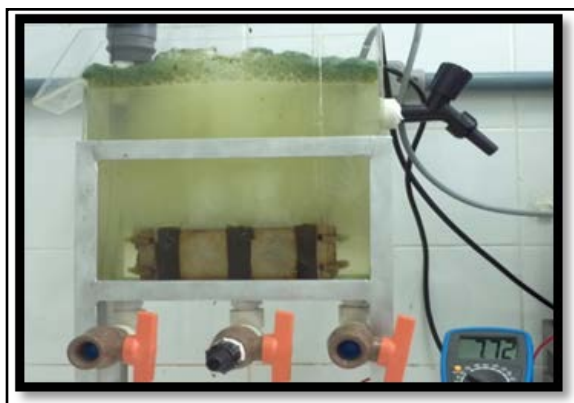


Figura 2 – Reator de eletroflotação em acrílico utilizado nos experimentos.

Condições operacionais do reator de eletroflotação por campo elétrico uniforme

Os experimentos foram realizados em modo contínuo, com vazões de 30, 200 e 500 mL.min⁻¹, mantida por uma bomba dosadora (Watson Marlow, SCI 323). Foram coletadas amostras do reator em 4, 15, 20 e 30 minutos de operação. A otimização do modelo de reator construído foi promovida testando-se duas estratégias para entrada e saída do efluente. Na condição operacional nº 1, a alimentação contínua de efluente foi realizada no sentido ascensional, através de um orifício de ½ polegada de diâmetro localizado no centro inferior do reator. A saída de efluente tratado foi feita por um orifício, também com ½ polegada de diâmetro, localizado na lateral oposta à saída dos flocos eletroflotados. Vale destacar que este canal de saída do efluente tratado, foi posicionado abaixo da faixa que delimita o acúmulo de flocos eletroflotados na superfície do efluente. Na Figura 3, observa-se um esboço da condição operacional nº 1. Para a condição operacional nº 2, a alimentação de efluente foi contínua, sendo realizada através de um orifício, com ½ polegada de diâmetro, localizado na lateral oposta à saída dos flocos eletroflotados posicionado abaixo da faixa que delimita o acúmulo de flocos eletroflotados, conforme está apresentado na Figura 4. A saída de efluente tratado era através do orifício localizado no centro inferior do reator.

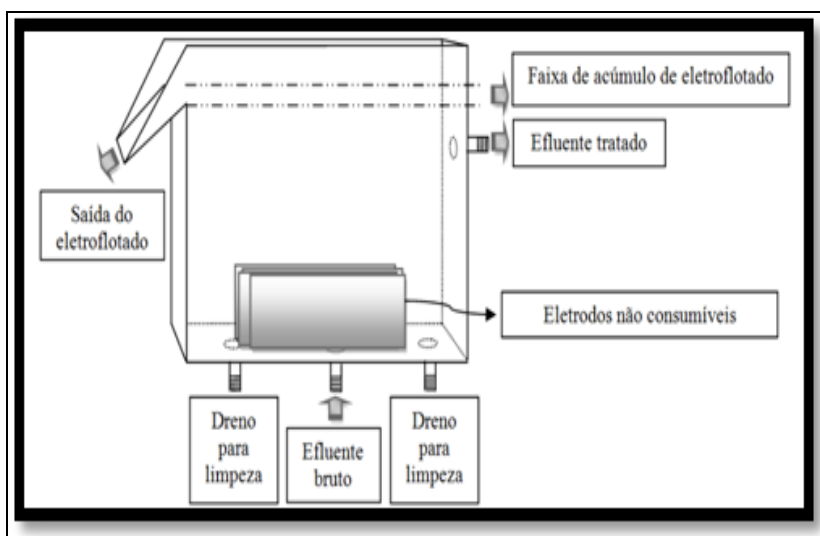


Figura 3 – Esboço da condição operacional nº 1.

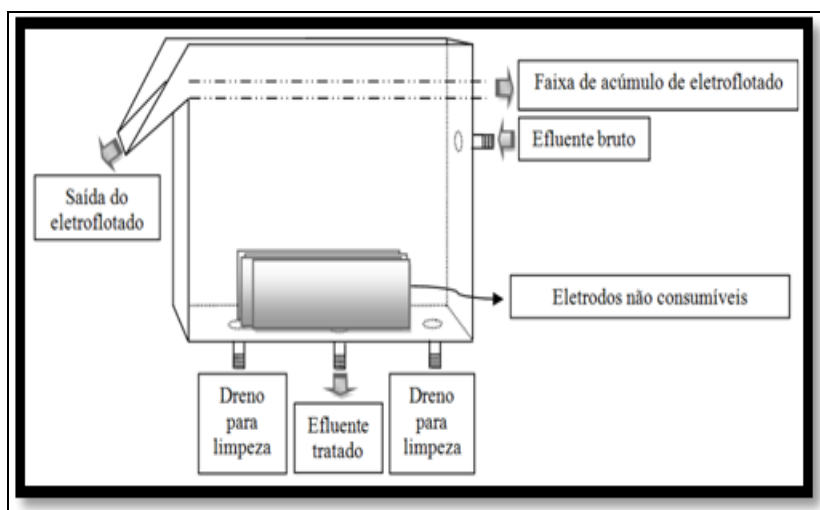


Figura 4 – Esboço da condição operacional nº 2.

Análise dos dados

O monitoramento de pH e temperatura foi realizado com a utilização de uma sonda multiparamétrica (HANNA HI9828). Haja vista o tipo de amostra, efluente tratado a nível primário, secundário e terciário, considerou-se que a maior contribuição para o valor de turbidez do efluente era da presença de microalgas.

Portanto, a separação de microalgas do efluente foi avaliada pela turbidez, determinada em turbidímetro portátil (HACH 2100T).

RESULTADOS

Otimização do modelo do reator de eletroflotação por campo elétrico uniforme

Observou-se à medida que o tempo de experimentação aumentava uma tendência a elevação do pH e temperatura em ambas as condições estudadas. Angelis *et al.* (1998); Giordano e Barbosa (2000) e Sinoti e Souza (2005) reportam que o decréscimo da concentração de H^+ é proporcional ao tempo de eletrólise, o que justifica o aumento do pH do sistema. Para a condição nº 1 os valores de pH variaram de 7,98 a 9,22 nos quatro tempos avaliados. Para a condição nº 2, os valores de pH variaram de 7,98 a 8,47, conforme apresentam as tabelas 1 e 2.

Observou-se ainda no processo eletrolítico, que o consumo de íons H^+ do efluente é uma condição inerente ao processo, pois há formação do hidrogênio no cátodo. Adicionalmente, há também formação de hidroxilas no meio que, devido à alta reatividade, são consumidas de imediato. A temperatura para as duas condições operacionais estudadas, assim como o pH, eleva-se com o prolongamento dos ensaios, ocorrência intimamente ligada com a eficiência do processo. Para Giordano e Barbosa (2000); Wiendl (1998), isto ocorre devido, principalmente, às microbolhas do gás hidrogênio geradas que ascendem mais rapidamente para a camada de espuma, reduzindo a passividade dos eletrodos e gerando um consequente aumento da eficiência do processo.

Tabela 1: Valores de pH e temperatura obtidos para a condição operacional nº 1.

Tempos de ensaios (min.)	Valores obtidos para temperatura (°C) e pH					
	Vazões aplicada					
	30 mL.min ⁻¹		200 mL.min ⁻¹		500 mL.min ⁻¹	
	pH	°C	pH	°C	pH	°C
4	7,98	21,37	8,41	23,48	9,12	21,87
15	8,05	21,96	8,59	24,10	9,26	22,47
20	8,09	22,53	8,79	24,62	9,16	22,99
30	8,12	23,07	9,01	25,11	9,22	23,71

Tabela 2: Valores de pH e temperatura obtidos para a condição operacional nº 2.

Tempos de ensaios (min.)	Valores obtidos para temperatura (°C) e pH					
	Vazões aplicadas					
	30 mL.min ⁻¹		200 mL.min ⁻¹		500 mL.min ⁻¹	
	pH	°C	pH	°C	pH	°C
4	8,24	21,64	8,09	22,48	7,98	23,01
15	8,33	22,18	8,25	23,04	8,04	23,24
20	8,47	22,70	8,38	23,47	8,14	23,44
30	8,29	22,66	8,42	23,55	8,34	23,77

A turbidez inicial do efluente foi de 114 uT. Observou-se que o menor valor para turbidez remanescente na condição operacional nº 1, conforme apresentado na tabela 3, foi de 37,95 uT obtida após 20 minutos de operação na vazão de 500 mL.min⁻¹. Os resultados foram fortemente prejudicados pela hidrodinâmica desenvolvida no reator. Na medida em que o efluente era recalcado no reator, partículas em suspensão presentes no efluente se juntavam aos flocos em ascensão e juntos recebiam o empuxo dos gases gerados pelo processo eletrolítico. Parte destes flocos e partículas foram carregadas até o ponto de saída de efluente tratado. Desta forma, a eficiência de remoção da turbidez tendia a ser baixa e, estabilizava-se após 20 minutos de operação do reator, não importando a vazão aplicada.

Tabela 3: Resultados de turbidez remanescentes obtidos na condição operacional nº 1.

Tempos de ensaios (min.)	Valores obtidos para turbidez remanescentes (uT)		
	Vazões aplicadas		
	30 mL.min ⁻¹	200 mL.min ⁻¹	500 mL.min ⁻¹
	Turbidez (uT)	Turbidez (uT)	Turbidez (uT)
4	79,54	91,30	90,38
15	74,34	69,29	65,91
20	58,51	59,00	37,95
30	51,22	54,98	49,90

Os valores de turbidez remanescente para a condição operacional nº 2, conforme apresentado na tabela 4, alcançaram melhores resultados, quando se compara com os resultados obtidos na condição operacional 1.

Tabela 4: Resultados de turbidez remanescentes obtidos na condição operacional nº 2.

Tempos de ensaios (min.)	Valores obtidos para turbidez remanescentes (uT)		
	Vazões aplicadas		
	30 mL.min ⁻¹	200 mL.min ⁻¹	500 mL.min ⁻¹
	Turbidez (uT)	Turbidez (uT)	Turbidez (uT)
4	69,11	79,72	78,92
15	40,19	29,88	54,81
20	42,61	24,01	44,87
30	39,25	11,66	36,54

Conforme a Figura 5, observou-se que a melhor eficiência de remoção de turbidez foi obtida com o reator operando com vazão de 200 mL.min⁻¹, que correspondia a um tempo de detenção hidráulica de 15 minutos. Para esta condição, as eficiências de remoção das amostras coletadas em 4, 15, 20 e 30 minutos de operação foram 22; 65,02; 70,17; e 81%, respectivamente.

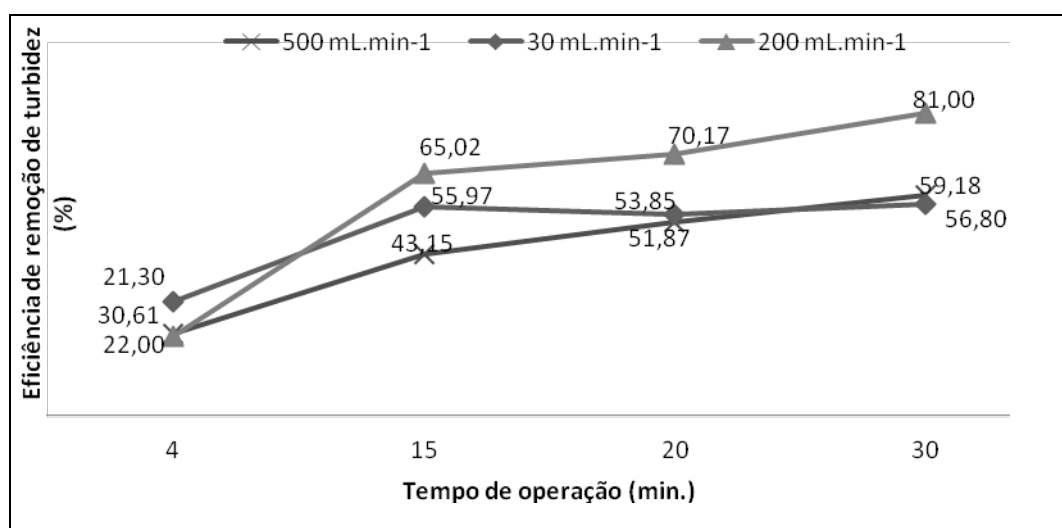


Figura 5 – Turbidez remanescente para a condição de operação nº 2.

O estudo demonstra que a eletroflotação por campo elétrico uniforme pode ser considerada uma boa alternativa de separação microalgal, constatada visualmente pela flotação de biomassa algal e clarificação do efluente e confirmada pelos valores de turbidez obtidos. O consumo de energia verificado foi de 30 KWh.m⁻³.

CONCLUSÕES

A dinâmica de ascensão das bolhas juntamente com o fluxo de entrada e saída de efluente em um reator de eletroflotação, influencia fortemente a capacidade de remoção de turbidez e, por conseguinte, a separação das microalgas contidas no efluente de lagoa estabilização. Os detalhes hidrodinâmicos inerentes aos reatores potencializam ações de flotação e subsequente aumento da eficiência do sistema.

O reator de eletroflotação, por campo elétrico uniforme, mostrou-se como técnica viável para separação de microalgas em efluentes, sendo obtida biomassa algal concentrada para eventual produção de biocombustível ou outros tipos de reusos.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE), pelo financiamento da pesquisa e/ou bolsas de estudos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ANGELIS, D. F.; CORSO, C. R.; BIDOIA, E. D.; MORAES, P. B.; DOMINGOS, R. N. Eletrolise de resíduos poluidores. I - efluente de uma indústria liofilizadora de condimentos, Química Nova, v.21, n.1, p.20-24, 1998.
2. ARAYA-FARIAS, M.; MONDOR, M.; LAMARCHE, F.; TAJCHAKAVIT, S.; MAKHLOUF, J. Clarification of apple juice by electroflotation. Innovative Food Science and Emerging Technologies. n. 9, p. 320 – 327, 2008.
3. CHEN, C. Y.; YEH, K. L.; AISYAH, R.; LEE, D. J.; CHANG, J. S. Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review. Bioresource Technology, v. 102, n. 1, p. 71-81, 2011.
4. CHRISTENSON, L., SIMS, R. Production and harvesting of microalgae for wastewater treatment, biofuels, and bioproducts. Biotechnology Advances, v. 29, p. 686-702, 2011.
5. FEYNMAN, R. P.; LEIGHTON, R. B.; SANDS, M. L. Lições de física de Feynman: mecânica quântica. 2 ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.
6. FORNAZARI, A. L. T.; MALPASS, G. R. P.; MIWA, D. W.; MOTHEO, A. J.; 2nd International Workshop - Advances in Cleaner Production, São Paulo, Brasil, 2009.
7. GAO, S.; YANG, J.; TIAN, J.; MA, F.; TU, G.; MAOAN, D. Electro-coagulation–flotation process for algae removal. Journal of Hazardous Materials, v. 177, p. 336-343, 2010.
8. GIORDANO, G.; BARBOSA FILHO, O. CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 27., 2000. Anais... Porto Alegre, 2000.
9. GRIMA, E. M.; BELARBI, E. H.; FERNÁNDEZ, F. G. A.; MEDINA, A. R.; CHISTIS, Y. Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics, Biotechnol. Adv., v. 20, p. 491-515, 2003.
10. HEWITT, P. G. Física conceitual. 9. ed. Bookman: Porto Alegre – RS, 2002.
11. JÜTTNER, K.; GALLA, U.; SCHMIEDER, H. Electrochemical approaches to environmental problems in the process industry. Electrochimica Acta, v. 45, p. 2575-2594, 2000.
12. MONEGO, M. L. C. D. Degradação eletroquímica de corantes e efluentes da indústria têxtil. 2007. 89 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007.
13. PARMAR, A., SINGH, N. K., PANDEY, A., GNANSOUNOU, E., MADAMWAR, D. Cyanobacteria and microalgae: A positive prospect for biofuels. Bioresource Technology, v. 102, p. 10163-10172, 2011.
14. RAWAT, I.; KUMAR, R. R.; MUTANDA, T.; BUX, F. Dual role of microalgae: Phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. Applied Energy, v. 88, p. 3411-3424, 2011.

15. RAWAT, I.; KUMAR, R.; MUTANDA, T.; BUX, F. Biodiesel from microalgae: A critical evaluation from laboratory to large scale production. *Applied Energy*, v. 103, p. 444-467, 2013.
16. RIBEIRO, M. A.; GUERRA, N. M. M.; BIDOIA, E. D. *Arq. Inst. Biol.* 2004, 71, 255.
17. SARKAR, M.S.K.A.; DONNE, S.W.; EVANS, G.M. Utilization of hydrogen in electroflotation of sílica. *Advanced Powder Technology*, n. 22, p. 482 – 492, 2011.
18. SERWAY, R. A., JEWETT, J. R. *Princípios de Física: Eletromagnetismo* 3.ed., v. 3, Thomson: São Paulo – SP, 2011.
19. SILVA, P. C. F.; MAINIER, F. B. Tecnologia eletroquímica aplicada ao tratamento de efluentes industriais. *In: Semana de Engenharia da Universidade Federal Fluminense*, 7.; Seminário Fluminense de Engenharia, 4., 2005. Trabalhos técnico-científicos. Niterói: UFF, 2005.
20. SINOTI, A. L. L.; SOUZA, M. A. A. de.; *Anais do XXIII Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Campo Grande, Brasil, 2005.
21. SUN, B. C. M.; CLEMENTS, J. S., Oxidative processes occurring when pulsed high voltage discharge degrade phenol in aqueous solution, *Environmental science & technology*, 34 (2000) 5.
22. TICIANELLI, E. A.; GONZALES, E. R. *Eletroquímica: princípios e aplicações*. 2. ed. São Paulo, EDUSP. 2005.
23. TIPLER, P. A.; MOSCA, G. *Física para engenheiros e cientistas*. V. 3, LTC: Rio de Janeiro – RJ, 2009.
24. WIENDL, W. G. *Processos Eletrolíticos no Tratamento de Esgotos Sanitários*. ABES, RJ. 1998.