

ELETROCOAGULAÇÃO E ELETROFLOTAÇÃO APLICADOS NO TRATAMENTO DE EFLUENTE INDUSTRIAL

Amanda Bessa Freitas⁽¹⁾

Graduanda em Engenharia Ambiental e Sanitária pela Universidade Federal de Uberlândia. Bolsista de Iniciação Científica PIBIC / CNPq na área de Ciências Exatas e da Terra (2020), desenvolvendo estudo sobre síntese de coagulante natural a partir de resíduos agrícolas para aplicação no tratamento de efluente industrial no Laboratório de Armazenamento de Energia e Tratamento de Efluentes (LAETE).

Ana Gabriela Tomé Alves⁽²⁾

Graduanda em Engenharia Ambiental e Sanitária pela Universidade Federal de Uberlândia. Bolsista de Iniciação Científica PIBIC / CNPq na área de Ciências Exatas e da Terra desde 2016, desenvolvendo estudo sobre síntese de coagulante natural a partir de resíduos agrícolas para aplicação no tratamento de efluente industrial no Laboratório de Armazenamento de Energia e Tratamento de Efluentes (LAETE).

Elaine Angélica Mundim Ribeiro⁽³⁾

Doutora em Biocombustíveis pela Universidade Federal de Uberlândia com ênfase em físico-química e biorrefinaria para o desenvolvimento de polímeros e coagulantes para tratamento de água e efluentes. Graduada e Mestre em Química pela Universidade Federal de Uberlândia. Atuou no ensino de Química para o ensino médio, técnico e superior, como docente no Instituto Federal do Triângulo Mineiro, Universidade Federal de Uberlândia, e atualmente professora substituta na Universidade Federal de Catalão.

Sheila Cristina Canobre⁽⁴⁾

Doutora em Ciências, ênfase em Eletroquímica pela Universidade Federal de São Carlos (2004). Atualmente, é professora associada nível 2 da Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

Fábio Augusto do Amaral⁽⁵⁾

Doutor em Ciências, ênfase em Eletroquímica pela Universidade Federal de São Carlos (2005). Atualmente é professor da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e Diretor do Instituto de Química.

Endereço⁽¹⁾: Rua Rio Xingu, 409 – Bairro Mansour – Uberlândia – MG – 38414-482 – Brasil – Tel: +55 (34) 99240-4208 – e-mail: amandabessa2803@gmail.com

RESUMO

A eletrocoagulação/eletroflotação consistiu na aplicação de uma diferença de potencial em uma determinada corrente em placas de alumínio, para promover uma célula eletrolítica em que, por meio da oxidação, ocorreu a formação do agente coagulante $Al(OH)_3$, e pela eletrólise da água houve a geração de hidrogênio e oxigênio que promoveram a flotação dos coágulos, do efluente industrial da produção de biodiesel, com turbidez superior a 1200 NTU. As variáveis investigadas foram diferença de potencial (ΔE), corrente elétrica (A), condutividade do eletrólito (mS/cm) tendo como parâmetros de controle: remoção de turbidez (%), volume de lodo e tempo de operação (h). As dimensões da placa de alumínio foram de 12x5x3 mm e o volume de efluente de biodiesel tratado foi de 0,4 L, com parâmetros avaliados de ΔE 3,5 V para correntes elétricas de 100 mA e $8,25 \cdot 10^{-3}$ A e para ΔE 5,0 V para correntes de 200 mA e $9,37 \cdot 10^{-3}$ A. Em relação à ΔE , as maiores remoções de turbidez foram alcançadas a 5 V. Neste ΔE , a eletrocoagulação/eletroflotação foi mais eficiente aplicando-se $9,37 \cdot 10^{-3}$ A e condutividade iônica de 4,6 mS/cm, por um tempo de 0,66 h, fornecendo uma remoção de turbidez de 96,2% e volume de lodo de 375 mL.

PALAVRAS-CHAVE: Eletrocoagulação. Eletroflotação. Efluente de Biodiesel.

INTRODUÇÃO

Desde as Revoluções Industriais entre os séculos XVIII e XIX, a humanidade muito progrediu em torno da exploração dos recursos naturais sem a preocupação necessária com as consequências proporcionadas aos ecossistemas e à saúde humana. No entanto, ao longo das décadas e com o desenvolvimento intenso das cidades, tornou-se necessário adotar algumas medidas para garantir o bem-estar da população e preservação do meio ambiente.

Sendo assim a Organização das Nações Unidas (ONU) declarou que é um direito do homem o acesso à água potável e saneamento básico sendo de responsabilidade do Estado garantir a realização plena deste e de todos

os outros direitos humanos básicos. Segundo dados da ONU, 2,2 bilhões de pessoas no mundo não possuem acesso à água potável e 4,2 bilhões de pessoas não têm acesso a saneamento básico.

Dessa forma, umas das problemáticas atuais são os efluentes gerados pelas indústrias como de laticínio, têxtil, petróleo, biodiesel entre tantas outras, devido ao grau de contaminação dos corpos receptores quando não há um tratamento adequado, sendo assim, diversas metodologias de tratamento vêm sendo pesquisadas envolvendo processos químicos, físicos e biológicos.

Os processos físicos caracterizam-se em geral pela separação sólido-líquido, destacando-se atualmente: sedimentação, filtração, centrifugação e flotação. Já os métodos químicos são: oxidação, processos de troca iônica, e processos biológicos como processos adsorptivos (Menezes *et al.*, 2011). Dessa forma, o tratamento de efluentes, em geral, envolve etapas de coagulação/floculação seguido de uma etapa de separação sólido-líquido.

Muitos dos processos utilizados em estações de tratamento de efluentes envolvem a adição de agentes coagulantes e floculantes, como, por exemplo, polímeros e sais de ferro e de alumínio. Estes agentes podem causar impactos ambientais devido à toxicidade de algumas moléculas usadas, podendo, mesmo em baixas concentrações, desequilibrar o meio ambiente em relação aos organismos aquáticos do corpo receptor (Menezes *et al.*, 2011).

Sendo assim, alguns pesquisadores e indústrias estão investindo nos processos de eletrocoagulação (EC) e eletroflotação (EF), por envolverem as etapas tanto de coagulação quanto de separação sólido-líquido via flotação. A EC consiste na aplicação de diferença de potencial em placas de alumínio que em um processo de oxidação irá liberar Al^{3+} no eletrodo chamado de “eletrodo de sacrifício, como mostra na Equação 1. Este cátion trivalente será hidrolisado para formar o agente coagulante ($Al(OH)_3$), responsável pelo processo de coagulação das partículas coloidais do meio, conforme as Equações 2 e 3.

Já a EF depende da geração dos gases de hidrogênio e oxigênio durante a eletrólise da água, como mostram as Equações 4, 5 e 6. As bolhas de gás formadas na superfície dos eletrodos imersos na solução entram em contato com as partículas coloidais que, por interações, serão arrastadas para a superfície gerando um lodo que poderá removido na parte superior por raspagem, sucção. (HOSNY, 1996).



A Figura 1 ilustra a célula eletroquímica utilizada, em escala de bancada, para os processos de eletrocoagulação e eletroflotação.

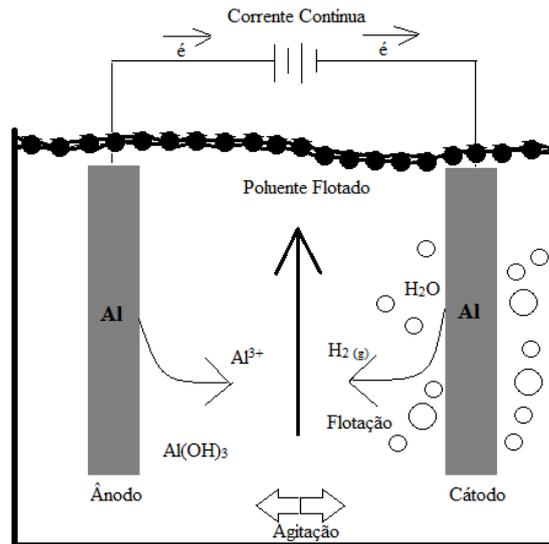


Figura 1: Diagrama esquemático de uma célula de EC/ EF em escala de bancada.
Fonte: Adaptado de Mollah *et al.* (2004).

Dessa forma, já que o eletrodo de sacrifício será corroído seguindo as leis de Faraday, é possível calcular o consumo de elétrons associado ao desgaste do eletrodo. Particularmente, na eletrocoagulação, este fato implicará diretamente no processo de geração do agente coagulante (cátion trivalente em solução), que será proporcional à carga aplicada, a qual poderá ser controlada pela densidade de corrente elétrica, j , aplicada na célula ($j = i/A$), já que corrente é a razão entre quantidade de carga por unidade de tempo ($Q = it$). Assim, teoricamente, a quantidade de alumínio trivalente gerada em solução será proporcional à corrente, portanto, a massa do eletrodo consumida (m_{el}) ou massa teórica (m_{teo}), em gramas, durante a eletroflotação poderá então ser calculada pela Equação 1.

$$M_{teo} = \frac{i \cdot t \cdot M}{F \cdot n} \quad (\text{Eq. 7})$$

Sendo que i será a corrente em Ampere, t o tempo de aplicação da corrente em segundos, M é a massa molar do elemento predominante do eletrodo (g/mol), n é o número de elétrons envolvidos na reação de oxidação (neste caso $n=3$) e F é a constante de Faraday ($9,65 \times 10^4$ C/mol) [2].

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo principal analisar o efeito das variáveis: corrente elétrica aplicada, diferença de potencial, condutividade do eletrólito e tempo de tratamento sobre o processo de eletrocoagulação/flotação de um efluente de biodiesel, além de investigar a implicação das Leis de Faraday sob as placas de alumínio.

MATERIAL E MÉTODOS

Dentre as variáveis temos: temperatura (°C), tempo de tratamento (h), faixa de pH, condutividade do eletrólito (mS/cm), diferença de potencial (V), corrente elétrica (A) e material dos eletrodos. Para este trabalho, o material dos eletrodos foi fixado sendo este de alumínio, pelo menor custo comparado ao ferro e por não deixar cor residual no efluente tratado e a alta capacidade de adsorção. Sendo assim, as dimensões da placa de alumínio foram de 12x5x3mm e o volume de efluente tratado foi de 0,4L.

Ademais, os experimentos foram conduzidos em um becker com capacidade de 0,6L, para um efluente de biodiesel. A célula eletrolítica foi montada pela montagem de um par de eletrodos de alumínio com área de 60cm² verticalmente, ligado a uma fonte alimentadora Yihua 1502dd. Além disso, um agitador magnético Fisatom 752A foi utilizado durante a realização do experimento para garantir a agitação constante e NaCl foi adicionado no efluente para melhorar a condutividade iônica do meio (eletrólito suporte) até um valor médio de 4,2 mS/cm conforme estudos realizados por Meneses (2011).

Para averiguação da condutividade iônica e do pH do meio foram utilizados um condutivímetro HannaHI 2030-02e um phmetro Hanna HI 11310, respectivamente. Durante a realização da eletrocoagulação/eletroflotação, o índice de turbidez foi medido por meio do Turbidímetro TD-300, já o volume de lodo flotado foi medido por meio de uma escala no próprio Becker e, posteriormente, comparado com o volume de lodo sedimentado medido em cones *Imhoff*[®]. A faixa de pH, temperatura e a turbidez iniciais das amostras de efluente bruto foram: 4.6, 25°C e >1200 NTU, respectivamente.



Figura 2: Foto ilustrativa do efluente de Biodiesel submerso na célula eletrolítica antes do tratamento de eletrocoagulação/eletroflotação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o tratamento do efluente de biodiesel foram fixadas duas diferenças de potencial (DDP ou ΔE), 3,5V e 5,0 V, sendo variadas a corrente e a condutividade iônica do meio já que para correntes menores o meio deve ser menos resistível para que haja movimento de cargas (Tabela 1).

Inicialmente foi observado em relação às correntes, que para aplicação de 100 e 200 mA não ocorreu o processo de eletrocoagulação de maneira efetiva. A indicação de eficácia do processo, dados em termos dos menores valores de turbidez e maiores valores de volume de lodo formado (de acordo com a figura 3) foram obtidos para menores valores de correntes, $8,25 \cdot 10^{-3}$ A para ΔE de 3,5 V e $9,37 \cdot 10^{-3}$ A para ΔE de 5,0 V, ou seja, em torno de 10 mA.

Estes valores sugerem que menores correntes elétricas devem ser aplicadas para impedir a formação de uma camada passivante sobre a superfície do alumínio durante a realização do experimento. Ressalta-se que as correntes aplicadas foram sempre maiores para o maior valor de ΔE , seja para os maiores valores de corrente ou para os menores valores de corrente aplicados.

Tabela 1: Dados dos parâmetros variados (colunas 1 a 5)

Identificação	Parâmetros variados				
	ΔE (V)	Corrente, <i>i</i> (A)	Densidade de Corrente, <i>j</i> (A/cm ²)	Condutividade (mS/cm)	Tempo (h)
1	3,5	0,1	$1,67 \cdot 10^{-3}$	3,8	1
2	3,5	$8,25 \cdot 10^{-3}$	$1,37 \cdot 10^{-4}$	4,6	1,25
3	5,0	0,2	$3,33 \cdot 10^{-3}$	3,8	0,75
4	5,0	$9,37 \cdot 10^{-3}$	$1,56 \cdot 10^{-4}$	4,6	0,66

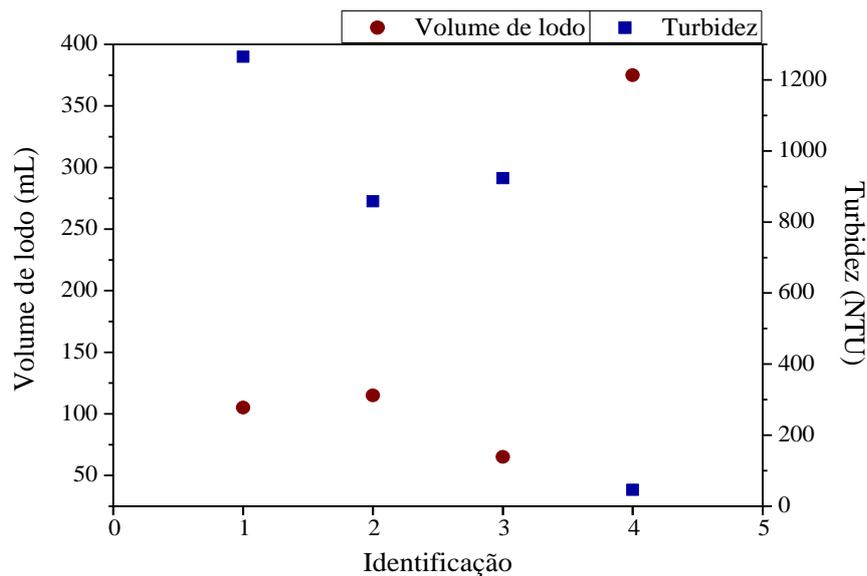


Figura 3: Parâmetros de controle observados para a eletrocoagulação/eletroflotação, considerando que o pH variou de 6,1 a 6,8; e a temperatura variou de 27°C a 30°C.

Já em relação à ΔE , as maiores remoções de turbidez (menores turbidez) foram conseguidas em 5 V, sendo observada a formação de um maior volume de lodo, indicativo da eficiência da eletroflotação. Entretanto, apenas para a ΔE de 5V, densidade de corrente de $9,37 \cdot 10^{-3} \text{ A}$ e condutividade de $4,6 \text{ mS/cm}$, a eletrocoagulação e eletroflotação adequou-se a um dos parâmetros (turbidez) exigidos pela CONAMA 357/2005 que foi escolhido como medida de controle. Além disso as massas de eletrodo de sacrifício consumidas foram superiores às massas teóricas (Tabela 2), possivelmente pelas placas serem ligas metálicas.

Tabela 2: Massas de alumínio consumidas em função das correntes aplicadas.

Identificação	Densidade de Corrente, j (A/cm ²)	Tempo (h)	Massa teórica calculada (g)	Massa consumida real (g)
1	$1,67 \cdot 10^{-3}$	1	0,0335	0,0587
2	$1,37 \cdot 10^{-4}$	1,25	0,0249	0,0327
3	$3,33 \cdot 10^{-3}$	0,75	0,0503	0,0609
4	$1,56 \cdot 10^{-4}$	0,66	$2,0763 \cdot 10^{-3}$	$2,8031 \cdot 10^{-3}$

Também foi observado de maneira visual que o lodo formado para correntes maiores possuía um aspecto mais denso que para correntes menores, o que dificultou as partículas flatarem de maneira mais uniforme, já que a força exercida para deslocar a coluna de lodo durante o procedimento deve ser maior para densidades maiores, assim com mostra as Figuras 4, fator que pode ter influenciado no processo de flotação das partículas e, conseqüentemente, no tratamento.



a)



b)

Figura 4: Representação do aspecto visual do lodo gerado no tratamento de efluentes para aplicação de:
a) ΔE 5V, corrente $9,37 \cdot 10^{-3}A$; b) ΔE 5V, corrente 0.2A;

Já na Figura 5 é mostrada uma foto ilustrativa do efluente após o tratamento para estas condições, resultando numa turbidez final de 46 NTU. As substâncias iônicas, quando estão em soluções liberam íons, proporcionando o fluxo de corrente elétrica, que é de grande relevância e dependência para a coagulação acontecer. Os eletrólitos suportes são soluções que permitem a condução iônica sem participarem das reações eletrolíticas, neste caso sendo adicionado cloreto de sódio (NaCl) ao efluente industrial, para proporcionar um aumento da condutividade iônica do meio, permitindo movimentação de íons.

Ademais, o pH da solução teve uma elevação significativa durante o processo, de pH inicial de 4,6 para um pH final em média de 6,4 para todos os experimentos. Essa elevação indica a perda de cargas de H^+ , formando gás hidrogênio, conforme Equação 4. Como contraponto, o pH no fim do processo encontra-se mais próximo ao ideal, pH 7 (neutro), ou seja, mais apto à destinação final.

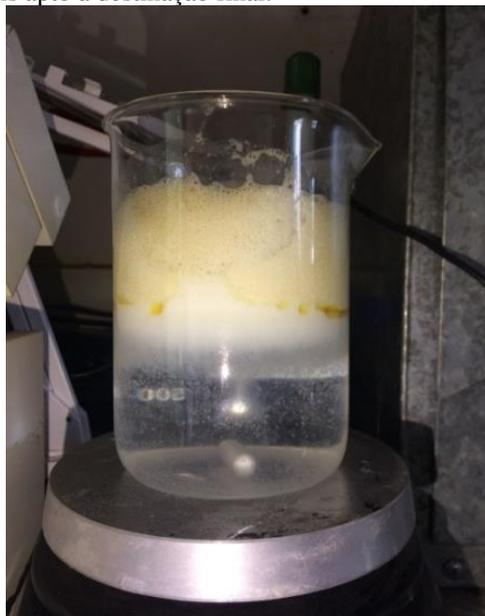


Figura 5: Foto ilustrativa do efluente de biodiesel após eletrocoagulação/eletroflotação.

Ademais, a temperatura tem influência na eficiência do processo eletrolítico (WIENDL, 1998). Segundo Mannarino (1997), com o aumento da temperatura, as microbolhas do gás hidrogênio geradas ascendem mais rapidamente para a camada de lodo, onde esse efeito reduz a passivação dos eletrodos e gera um consequente aumento da eficiência do processo. Assim, as maiores temperaturas (30 °C) promoveram menor turbidez, ou seja, maior eficiência.

APOIO FINANCEIRO

Os autores agradecem à FAPEMIG (processos APQ-02249-14 e APQ-03219), CNPq (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), Rede Mineira e Universidade Federal de Uberlândia.

CONCLUSÕES

A eletrocoagulação e eletroflotação para o tratamento de efluente de biodiesel se mostrou eficiente para a diferença de potencial de 5,0V e corrente de $9,37 \cdot 10^{-3}$ A, com condutividade iônica de 4,6 mS/cm e sendo aplicada por um tempo de 0,66 h, fornecendo uma remoção de turbidez de 96,2% e volume de lodo de 375 mL, indicativos de maior eficácia do método. A aplicação das Leis de Faraday foi mais significativa para acompanhar o processo apenas para menores densidades de corrente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CRESPILO, F. N.; SANTANA, C. G. e REZENDE, M. O. O. Tratamento de efluente da indústria de processamento de coco utilizando eletroflotação. *Quím. Nova* [online]. 2004, vol.27, n.3 [cited 2017-12-08], pp.387-392.
2. ERMANN, A.A.; JHON, D. K.; SOUZA, M. P.; MORAES, M. S. A.; SCHNEIDER, R. C.S.; BAIERLE, F. ROHLFES, A. L.B.; *Otimização da eletroflotação de microalga com eletrodos de ferro e de alumínio*. IV Salão de ensino e extensão, Inovação e Aprendizado, 2013.
3. GIORDANO, G. O processo eletrolítico aplicado ao saneamento ambiental de balneários. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. Porto Alegre - RS, 2000.
4. HOSNY, A. Y. Separating oil from oil-water emulsions by electroflotation technique. *Separations Technology*, v. 6; pp. 9-17, 1996.
5. MANNARINO, J.C. Processo de Eletrocoagulação Aplicada a um Efluente Petroquímico. Projeto de Graduação IV – (Graduação em Engenharia Civil, Habilitação Sanitária) Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ, 1997. p 30.
6. MOLLAH, M. Y. A.; MORKOVSKY, P.; GOMES, J. A. G.; KESMEZ, M.; PARGA, J.; COCKE, D. L.; *J. Hazard. Mater.*2004, *114*, 199.
7. Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e Cultura (UNESCO), UNESCO Etxea - Centro da UNESCO País Basco 2015.7
8. WIENDL, W. G. O Processo Eletrolítico no Tratamento de Esgotos Sanitários, Rio de Janeiro, RJ, ABES, 1998. 368 p.