

AVALIAÇÃO DO PROCESSO ELETROLÍTICO EM CORRENTE ALTERNADA NO TRATAMENTO DE ÁGUA DE PRODUÇÃO

Alexandre Andrade Cerqueira* e Monica Regina da Costa Marques

Departamento de Química Orgânica, Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rua São Francisco Xavier, 524, 20550-013 Rio de Janeiro – RJ, Brasil

Carlos Russo

Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rua São Francisco Xavier, 524, 20550-013 Rio de Janeiro – RJ, Brasil

Recebido em 05/01/10; aceito em 20/7/10; publicado na web em 9/11/10

EVALUATION ELECTROLYTIC PROCESS IN ALTERNATE CURRENT IN TREATMENT OF WATER PRODUCTION. The main objective was to study the treatment of wastewater generated by the oil industry. This work consisted of tests of electroflocculation with alternate current (AC), and chemical coagulation. The removal efficiencies of organic load were evaluated by the removal of oils and greases, color and turbidity. The parameters investigated were the change in alternate current frequency, the initial pH, the distance between electrodes, the applied potential and time lapse. From the results, one may conclude that the electroflocculation process is potential applicability to the effluent studied, while chemical coagulation was not successful.

Keywords: electroflocculation; offshore platforms; water production.

INTRODUÇÃO

As atividades de exploração de petróleo, devido à crescente preocupação com o meio ambiente e ao surgimento de novas leis e resoluções ambientais mais restritivas, precisam se enquadrar dentro das novas exigências. Uma das questões mais preocupantes envolve a água de produção gerada nessa atividade, a qual aumenta gradativamente em volume à medida que os poços vão envelhecendo e que novos poços são perfurados.¹

Normalmente, essa água corresponde a mais de 90% de todos os efluentes gerados na indústria do petróleo: em média, para cada m³/dia de petróleo produzido são gerados de 3 a 4 m³/dia de água, podendo chegar a 7 ou mais, nas atividades de exploração, perfuração e produção.² No Brasil, o volume de água de produção descartado no mar vem aumentando gradativamente ao longo dos anos, tendo sido registrados volumes de 58,3 milhões de m³ em 2004, 66 milhões de m³ em 2005 e 73,3 milhões de m³ em 2006.³

Para que a água produzida possa ser descartada em corpos receptores ou utilizada na reinjeção em poços de petróleo, é necessário o seu tratamento prévio para enquadrá-la na legislação vigente. A Resolução CONAMA 357/2005,⁴ estabelece que para o descarte em corpos receptores, o limite de óleos e graxas na água produzida é de até 20 mg/dm³. Especificamente, para descarte em plataformas *off-shore*, aplica-se a Resolução CONAMA 393/2007,⁵ que estabelece a média aritmética simples mensal do teor de óleos e graxas de até 29 mg/dm³, com valor máximo diário de 42 mg/dm³. Para reinjeção em poços de petróleo, a água deverá ter no máximo 5 mg/dm³ de óleos e graxas.

Uma parte do óleo presente na água de produção está na forma de emulsão devido às partículas sólidas finamente divididas oriundas da perfuração, assim como os produtos químicos residuais utilizados na desestabilização de emulsões óleo/água (O/A) e as moléculas surfactantes naturais do petróleo.⁶ Neste caso, o diâmetro das gotas situa-se abaixo de 50 µm, o que dificulta a sua separação por meios gravitacionais. A separação do óleo emulsificado requer a desestabilização da emulsão O/A, a qual é governada por quatro diferentes fenômenos:

coagulação, floculação, sedimentação (*creaming*) e coalescência.⁷

O *creaming* é o deslocamento gravitacional das gotas para a superfície da fase contínua em função da diferença de densidade entre as duas fases, não necessariamente após a coagulação e/ou floculação das gotas.

A colisão entre as gotas pode levar à coalescência com a formação de grandes agregados até se tornar novamente uma fase contínua separada do meio dispersante por uma simples interface.

A coagulação, seguida ou não da floculação, tem por objetivo aumentar a quantidade de material suspenso que será removida por sedimentação. Consiste essencialmente na introdução no meio líquido de um produto capaz de anular as cargas geralmente eletronegativas dos colóides presentes, de forma a gerar um precipitado.

A floculação é a aglomeração dos colóides sem carga eletrostática causada, normalmente, por um processo de agitação mecânica. Um floculante é, portanto, um estimulante de coagulação que acelera a formação, a coesão e a densidade do floco.⁷

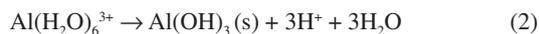
A técnica de eletrofloculação (EF) é um processo que envolve a geração de coagulantes *in situ* a partir de eletrodos de ferro e/ou alumínio, pela ação da corrente elétrica aplicada a esses eletrodos. A EF tem se mostrado uma alternativa promissora para o atendimento à legislação ambiental, além de ser versátil e competitiva para instalações em tanques que requerem grandes volumes de água a ser tratada. As unidades de EF são pequenas e compactas, além de requererem pouca manutenção e custos operacionais menores quando comparados a outras unidades de flotação.^{8,9}

Além disso, a EF tem despertado bastante interesse, devido à sua simplicidade de operação e aplicação para o tratamento de diversos tipos de efluentes, dentre os quais se destacam: a indústria de processamento de coco,⁹ de esgotos sanitários,¹⁰ de restaurantes,¹¹ de siderurgias,¹² de indústrias têxteis,^{13,14} de curtumes,¹⁵ além de facilitar a remoção de íon fluoreto,¹⁶ de boro¹⁷ e de óleos.¹⁸⁻²³

Tipos de reações envolvidas no processo de EF

Quando se utiliza o eletrodo de alumínio, ocorre a sua oxidação no anodo (1), o qual, após solvatação, sofre hidrólise (2) com a formação do agente de floculação – Al(OH)₃.²⁴

*e-mail: alexandrecerq@ig.com.br



Dependendo do pH do meio e da concentração de alumínio, outras espécies iônicas monoméricas de alumínio - $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$, $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ - ou poliméricas - $\text{Al}_6(\text{OH})_{15}^{3+}$, $\text{Al}_7(\text{OH})_{17}^{4+}$, $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$, $\text{Al}_{13}\text{O}_4(\text{OH})_{24}^{7+}$, $\text{Al}_{13}(\text{OH})_{34}^{5+}$ - podem ser formadas.²⁴ Estes complexos, responsáveis por adsorverem os contaminantes, originando coágulos maiores (flocos), quando presentes em solução aquosa conferem uma característica gelatinosa ao meio.²⁵ Entretanto, com o aumento do pH, sofrem hidrólise e formam principalmente $\text{Al}(\text{OH})_4^-$, que é solúvel.²⁴ Assim, o pH ideal para formação do agente de floculação, $\text{Al}(\text{OH})_3$, está entre 6,5 e 7,0.⁹

Além da formação do agente coagulante, a EF pode gerar microbolhas de gases (3) que são responsáveis pela flotação de óleos, graxas e outros compostos particulados.²⁶⁻²⁸



Em efluentes contendo íons cloreto, reações secundárias, como a oxidação do cloro no anodo, também ocorrem no meio, tornando o processo eletrolítico bastante complexo. O gás cloro gerado, em meio básico, pode formar íons hipoclorito. A geração deste ânion pode representar uma das grandes vantagens da EF, uma vez que estes processos podem ser otimizados para desinfecção da água ou eliminar odores indesejáveis.²⁹

De acordo com Kim e colaboradores,³⁰ na EF utilizando eletrodos de Al, o principal mecanismo de coagulação na faixa de pH entre 2 e 3 é por compressão da dupla camada. Quando o pH inicial está na faixa de 4 a 9, a coagulação ocorre por adsorção ou neutralização das cargas.

A corrente contínua (CC) amplamente utilizada na tecnologia da EF causa a formação de uma camada impermeável no catodo, que aumenta da resistividade do eletrodo,²⁴ assim como o desgaste oxidativo do anodo. Isso produz, com o tempo, perdas na eficiência na EF. As limitações no uso da CC podem ser minimizadas pela adição de eletrodos de sacrifício em paralelo na configuração da célula eletrolítica.³¹ Além disso, para se reduzir o efeito de passivação do catodo e aumentar a vida útil do eletrodo, pode-se inverter, manualmente, o sentido da corrente em intervalos regulares de tempo. Assim, o catodo torna-se anodo e vice-versa.²⁴

Este trabalho teve como objetivo avaliar o tratamento de água produzida pela indústria do petróleo por meio do processo de EF com corrente elétrica alternada (CA) de frequência variável. Esperava-se que a CA fosse mais eficiente do que a EF com inversão manual de polaridade.

PARTE EXPERIMENTAL

Preparo da água oleosa sintética

Foi desenvolvida uma metodologia, em escala de bancada, que permite o preparo, com boa reprodutibilidade, de uma emulsão O/A contendo 0,1 mg/dm³ de óleo cru da Bacia de Campos, densidade 0,89 g/dm³ e grau API 28. O óleo foi previamente acidificado com H₂SO₄ concentrado a pH ≤ 2 e preservado em refrigeração a T ≤ 4 °C.

A água oleosa sintética foi preparada em um bécker de 2 dm³ contendo 0,900 g do óleo cru e 0,10 g/dm³ dos emulsificantes SP 60® e TW 60® (proporção 1:1 – procedência Oxiten); foram adicionados 0,90 dm³ de água destilada salinizada com sal marinho (60 g/dm³ - procedência Coralife). A emulsão O/A sintética foi, então, obtida após agitação mecânica vigorosa de aproximadamente 10.000 rpm (Homogeneizador Wigen Hauser D-500) por 20 min.

Unidade de bancada de corrente alternada de frequência variável

Em um reator de vidro com capacidade de 1 dm³ com uma torneira situada a 3 cm da base, munido de um agitador magnético, adiciona-se 0,90 dm³ da emulsão O/A sintética e insere-se verticalmente o eletrodo do tipo colmeia. Este eletrodo foi construído com 4 placas de alumínio intercaladas de 10 cm de altura, 5 cm de largura e 3 mm de espessura, separadas por espaçadores de diferentes tamanhos.

A corrente alternada de tensão inferior a 15 V e frequência variável entre 1 e 120 Hz foi obtida a partir de um conversor CA/CA (marca Weg mod. CFW0800) e um transformador abaixador isolador de tensão (marca Tecnopeltron mod. PLTN 100/15) onde o potencial de entrada em 60 Hz é retificado e, novamente oscilado para se obter um potencial também em corrente alternada, porém, nos níveis desejados.

Depois de transcorrido o intervalo de tempo pré-determinado de eletrólise, aguardava-se 30 min para que ocorresse a flotação completa da emulsão. Através da torneira, o efluente tratado era retirado para avaliação da eficiência da EF, a qual foi acompanhada pelo monitoramento, em triplicata, dos seguintes parâmetros: pH, condutividade, turbidez, cor e óleos e graxas (O&G).

Ensaio de floculação (Jar Test)

Determinação da dosagem mínima aproximada de coagulante

A uma amostra de 0,50 dm³ da água oleosa sintética, sob leve agitação, foram adicionados pequenos volumes, em incrementos de 0,01 dm³, de uma solução do sulfato de alumínio (200 g/dm³), até que fossem observadas as primeiras evidências de formação dos flocos.

Determinação do pH ideal

Amostras de 1 dm³ de água oleosa sintética foram colocadas nos 6 jarros do equipamento de *Jar Test*. Após adição da dosagem mínima de sulfato de alumínio, o pH de cada jarro foi ajustado com H₂SO₄ (49 g/dm³) NaOH (40 g/dm³) com diferentes valores de pH (4-9). Cada amostra foi, então, intensamente agitada por 4 min e, em seguida, lentamente por mais 20 min, evitando o rompimento dos flocos. Após a floculação, a agitação foi suspensa e o sistema ficou em repouso por 1 h. A condição ideal foi aquela em que ocorreu a melhor eficiência na remoção de cor, turbidez e O&G.

Determinação da dosagem ótima de coagulante

Amostras de 1 dm³ de água oleosa sintética foram colocadas nos 6 jarros do *Jar Test* e adicionadas, em cada um deles, diferentes concentrações de sulfato de alumínio (entre 25 e 200% sobre a dosagem mínima de coagulante). Após ajuste do pH ideal, iniciou-se o processo de floculação. A melhor condição foi aquela em que ocorreu a melhor eficiência na remoção de cor, turbidez e O&G.

Parâmetros analisados

O pH foi determinado com pHmetro Oakton Ion 6 Acorn Séries. A condutividade foi medida através do condutivímetro Digimed, modelo DM 3. A turbidez foi analisada em turbidímetro TB1000. O monitoramento da cor foi realizado em espectrofotômetro Femto 600 S no comprimento de 400 nm. A determinação dos O&G foi realizada pela técnica de extração em Soxhlet, segundo a metodologia FEEMA – MF 412.³²

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com o objetivo de se avaliar a potencialidade e reprodutibilidade da técnica de EF com CA, foram realizados diversos ensaios utilizando uma água de produção simulada (emulsão O/A sintética, Tabela

1) variando-se os seguintes parâmetros: tempo e pH da eletrólise, distância entre eletrodos, potência e frequência das correntes alternadas aplicadas, desgaste de eletrodo e consumo de energia elétrica.

Tabela 1. Caracterização da emulsão O/A sintética

Parâmetro	Valores médios
Cor (Absorbância)	2,3
Turbidez (NTU)	4.100
pH	9
Temperatura (°C)	± 25
Condutividade (mS/cm)	100,7
O&G (mg/L)	690

Avaliação da variação da frequência da CA aplicada na eficiência da EF

A Figura 1 apresenta a variação na remoção dos parâmetros estudados (turbidez, cor e O&G) nos ensaios realizados variando-se a frequência da CA aplicada – $f = 10, 20, 30, 40, 50$ ou 60 Hz. Observa-se que, independente da variação da frequência aplicada, a capacidade de remoção dos parâmetros avaliados foi elevada. Entretanto, nas condições experimentais (distância entre eletrodos = $0,5$ cm; intensidade de corrente = 3 A) a voltagem medida *on-line* aumentou com a diminuição da frequência (com 10 Hz, teve-se uma tensão de $2,25$ V; com 20 a 30 Hz a tensão foi de $1,85$ V; entre 40 e 60 Hz, a tensão foi de $1,75$ V). Como a redução da frequência acarreta um ligeiro aumento do consumo de energia, aliado ao fato da frequência de CA brasileira ser 60 Hz, optou-se por utilizar sempre a frequência de 60 Hz nos ensaios de EF com corrente alternada.

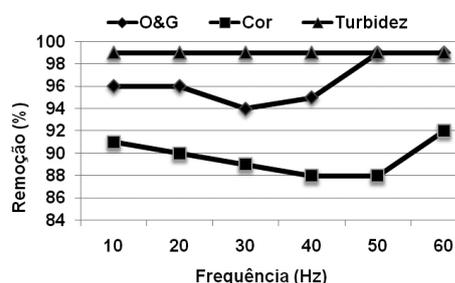


Figura 1. Efeito da variação de frequência (Hz) na remoção de cor (■), turbidez (▲) e O&G (◆) de uma emulsão O/A sintética pelo processo de EF. Condições experimentais: $pH_i = 9,0$; $t = 3$ min; distância entre eletrodos = $0,5$ cm; $i = 3$ A

Os ensaios preliminares para otimização da frequência de operação foram realizados na emulsão O/A sintética sem ajuste de pH (pH_i 9); entretanto, observou-se que, ao final da EF, o efluente se tornou ligeiramente ácido (entre 5 e 6). Este pode ser um indicativo que esteja ocorrendo oxidação de impurezas presentes no meio com geração de HCl.³³ Por outro lado, segundo Chen e colaboradores,³⁴ em pH_i elevado, se estiverem presentes nas águas sais de Ca^{2+} e Mg^{2+} , como foi o caso, estes elementos podem precipitar juntamente com $Al(OH)_3$, sob a forma de hidróxidos, levando também a uma diminuição do pH.

Avaliação da variação do pH inicial da emulsão O/A na eficiência da EF

Como o pH ideal para formação do hidróxido de alumínio deve estar entre $6,5$ e $7,0$,⁹ foram feitos ensaios ajustando o pH da emulsão

O/A ($pH_i=9$) usando ácido sulfúrico. A Figura 2 demonstra as eficiências de remoção de cor, turbidez e óleos e graxas em função do pH inicial do meio. Semelhante ao resultado relatado por Crespilho e colaboradores,³³ a EF não foi eficiente para o tratamento de emulsão O/A em pH abaixo de $6,5$. No entanto, observou-se que a capacidade de remoção dos parâmetros estudados foi também eficiente para valores de pH acima de 7 . Este resultado é mais uma vantagem da EF para tratamento de água de produção, considerando que a maioria deste tipo de efluente possui faixa de pH entre 7 e 9 .¹⁸

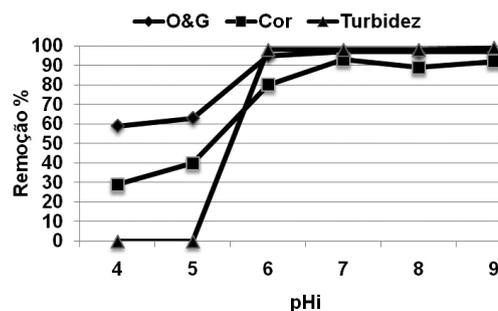


Figura 2. Efeito da variação do pH inicial na remoção de cor (■), turbidez (▲) e O&G (◆) de uma emulsão O/A sintética pelo processo de EF. Condições experimentais: $t = 3$ min; distância entre eletrodos = $0,5$ cm; $f = 60$ Hz; $i = 3$ A

Variação da intensidade de corrente aplicada sobre a eficiência da EF

Como os resultados descritos na literatura a respeito da influência da intensidade de CC na eficiência da EF são contraditórios,¹⁰⁻¹² foram realizados ensaios com variação da intensidade de CA (de 1 a 5 A) com o objetivo de se avaliar sua influência na remoção de O&G, cor e turbidez pela EF no tratamento de emulsão O/A (Figura 3). Observa-se que a remoção destes parâmetros foi mais eficiente nos experimentos utilizando uma intensidade de corrente acima de 3 A. Um aumento da intensidade de corrente de até 5 A não exerce efeito significativo, pois, mantém somente aumento na eficiência de 5% na remoção da carga poluente.

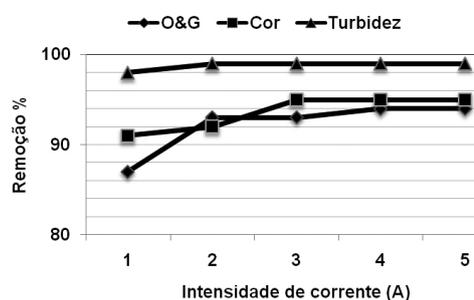


Figura 3. Efeito da variação da intensidade de corrente (A) na remoção de cor (■), turbidez (▲) e O&G (◆). Condições experimentais: $pH_i = 9,0$; $t = 3$ min; distância entre eletrodos = $0,5$ cm; $f = 60$ Hz

O incremento da intensidade de corrente aplicada acarreta o aumento do número de bolhas devido à eletrólise da água, aumentando a probabilidade de colisão do óleo emulsificado.²⁸ No entanto, ocorre também maior gasto de energia e o consumo de eletrodo torna-se mais elevado. Dessa forma, escolheu-se manter a intensidade de corrente na faixa de 2 a 3 A.

Condutividade é uma medida da capacidade de uma solução aquosa em conduzir corrente elétrica, a qual depende da presença de íons; de sua concentração total, mobilidade e valência; e da temperatura

de medição. Dessa forma, o aumento da condutividade do efluente a ser tratado favorece a condução de corrente elétrica, diminuindo a tensão entre os eletrodos e, conseqüentemente, menor energia será requerida no processo de EF. Muitos pesquisadores recorrem à adição de NaCl, para aumentar a condutividade do efluente.³⁵ Adicionalmente, observa-se que a adição de íons cloreto reduz significativamente o efeito adverso dos ânions HCO_3^- e SO_4^{2-} em águas duras.³⁴ A precipitação de carbonatos e/ou sulfatos de cálcio e/ou magnésio forma uma camada isolante na superfície dos eletrodos, aumentando drasticamente o potencial entre os eletrodos.

A adição de cloreto de sódio (3,5% em peso) a uma emulsão O/A acarretou na remoção de 75% do óleo, em comparação com a remoção de 65% sem a adição do sal.²⁸ Além disso, foi observado que em uma intensidade de corrente de 2,4 A, a voltagem foi de 8,6 V no meio salino e de 10,0 V no meio sem a adição do sal.

Neste trabalho, a elevada condutividade da emulsão O/A sintética (100,7 mS/cm), que deve ser semelhante à da água de produção, acarretou uma voltagem bem menor (~ 2,0 V) para uma intensidade de corrente de 3,0 A. Entretanto, a EF pode conduzir a oxidação dos íons cloreto em gás cloro e em íons hipoclorito, que são fortes oxidantes capazes de oxidar moléculas orgânicas presentes no efluente.³⁶

Efeito da distância entre eletrodos

De acordo com a Figura 4, a distância entre eletrodos não teve um efeito significativo sobre a eficiência de separação do óleo da emulsão O/A estudada, aplicando-se uma intensidade de corrente de 3 A. A distância entre os eletrodos considerada ideal foi de 0,5 cm, devido ao menor consumo de energia. Quando a distância aumenta, aumenta o consumo de energia, por aumentar a resistividade do meio.³⁷

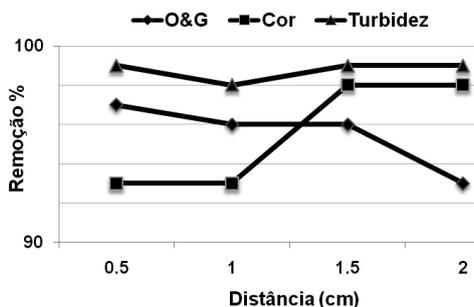


Figura 4. Efeito da variação da distância entre eletrodos na remoção de cor (■), turbidez (▲) e O&G (◆). Condições experimentais: pH inicial = 9,0; t = 3 min; i = 3 A; f = 60 Hz

Efeito do tempo de eletrólise

Os resultados apresentados na Figura 5 mostram que em apenas 2 min de eletrólise foi obtido o máximo de remoção dos parâmetros avaliados (O&G, turbidez e cor).

Durante a eletrólise, o eletrodo positivo sofre reações anódicas, enquanto as reações catódicas ocorrem no eletrodo negativo. Os íons liberados neutralizam as cargas das partículas e, assim, iniciam a coagulação. A eficiência de remoção de cor, turbidez e óleos e graxas depende diretamente da concentração de íons produzidos pelos eletrodos. Com o aumento do tempo de eletrólise, ocorre um aumento na concentração de íons e seus flocos de hidróxido. Como mostrado acima, um aumento do tempo de eletrólise de 2 a 3 min produz um aumento na eficiência de remoção de cor de 93%, turbidez 99% e óleos e graxas 98%. Sendo assim, não é necessário um tempo de retenção maior da eletrofloculação, ocorrendo um maior consumo de eletrodos e de energia.

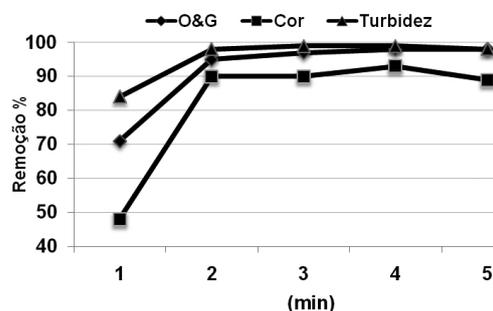


Figura 5. Efeito da variação de tempo na remoção de cor (■), turbidez (▲) e O&G (◆). Condições experimentais: pH inicial = 9,0; i = 3 A; distância entre eletrodos = 0,5 cm; f = 60 Hz

De acordo com Kobya e colaboradores,³⁸ o consumo de energia em um reator batelada é expresso como na Equação 1:

$$C_{\text{energia}} = U \cdot i \cdot t / V \quad (1)$$

sendo: C_{energia} = consumo de energia, em W h/m³; U = tensão elétrica aplicada no sistema, em V; i = corrente elétrica aplicada, em A; t = tempo de aplicação da corrente, em h; V = volume de efluente tratado, em m³.

Nas condições ideais determinadas (i = 3 A, U = 1,75 V, tempo = 2 min), o tratamento de uma emulsão O/A utilizando-se um reator de eletrofloculação com corrente alternada (frequência 60 Hz) e distância entre eletrodos de 0,5 cm, obteve-se um consumo de corrente alternada de 0,175 k W h/m³.

Por outro lado, de acordo com a Lei de Faraday, a massa do eletrodo consumida está diretamente relacionada com a corrente aplicada e é definida pela Equação 2.³³

$$\text{Mel} = i \cdot t \cdot M / F \cdot z \quad (2)$$

sendo: Mel = quantidade máxima de eletrodo consumida, g; i = corrente aplicada, em A; t = tempo de eletrólise, em s; M = massa molar do elemento predominante no eletrodo, g/mol; z = número de elétrons envolvidos na reação de oxidação do elemento do anodo; F = constante de Faraday, 96500 C/mol.

Em todos os ensaios, este parâmetro não foi quantificado experimentalmente, através de pesagem. Todavia, aplicando-se a Lei de Faraday os resultados da eletrofloculação em corrente alternada na melhor condição de estudo foram de 0,05 g de Al/dm³ ou 50 g Al/m³.

Ensaio de Jar Test

Determinação de pH ótimo e dosagem ótima de coagulante

A utilização da dosagem fixa de coagulante, com concentrações de 60 g $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3/\text{L}$ em cada *becker*, mostrou ser a dosagem mínima encontrada para evidências de coagulação. A Figura 6 demonstra que o pH 6 apresenta melhor eficiência de coagulação química.

Na concentração de 45 a 90 g de sulfato de alumínio, como observado na Figura 7, obtém-se resultados de eficiência de remoção de poluentes. Entretanto, estas altas concentrações de coagulante tornam-se inviáveis para aplicação no efluente em estudo, devido a sua elevada quantidade.

Os ensaios de tratabilidade em Jar Test, utilizando com agente floculante o policloreto de alumínio (PAC) comercial na concentração de 22%, não apresentaram floculação até mesmo em altas concentrações do agente, o que torna este produto inviável para este tipo de efluente.

CONCLUSÃO

Os resultados obtidos mostraram que o tratamento do efluente

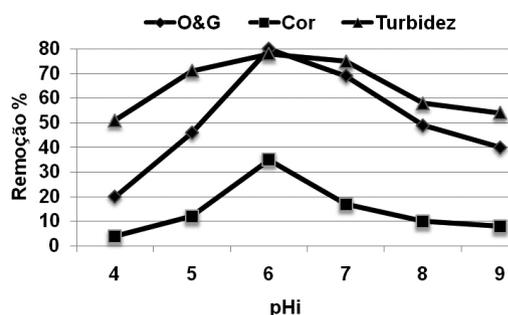


Figura 6. Determinação do pH ótimo de coagulação (Condições iniciais: concentração de $Al_2(SO_4)_3 = 60$ g/L)

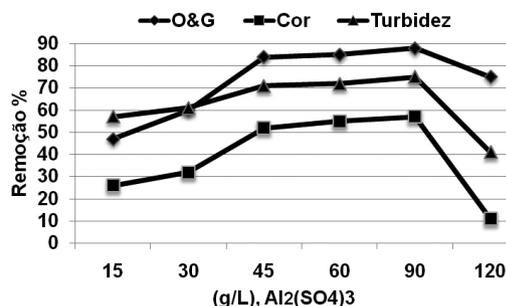


Figura 7. Determinação da dosagem de coagulante no pH de coagulação. Condições: $pH_i 6,0$

sintético emulsionado de água produzida através da eletrofloculação produziu melhores resultados quando se utilizou frequência de 60 Hz em corrente alternada, $pH = 9$, distância entre eletrodos de 0,5 cm, tempo de eletrólise de 3 min e aplicação de intensidade de corrente de 3 A. Foram atingidos valores da ordem de 97% de remoção de O&G, 99% de remoção de cor e 99% de remoção de turbidez.

Comparando com os ensaios de floculação utilizando Jar Test, a eletrofloculação demonstrou maior eficiência para o tratamento de efluentes de água de produção com a finalidade de remover óleos e graxas emulsionados, cor e turbidez sem adição de reagentes químicos ou ajuste de pH.

A técnica de eletrofloculação com corrente alternada parece ser uma alternativa promissora no tratamento de efluentes oleosos da indústria do petróleo.

MATERIAL SUPLEMENTAR

Contém a Figura 1S, que apresenta o aspecto visual do efluente bruto (sem tratamento) e após o tratamento pela técnica de EF com ajuste do pH, da emulsão O/A sintética. Observa-se sua clarificação completa a partir do pH inicial 6 até o 9. Este material está disponível gratuitamente em <http://quimicanova.s bq.org.br>, na forma de arquivo PDF.

REFERÊNCIAS

- Ray, J. P.; Engelhardt, F. R., eds.; *Produced Water: Technological Environmental Issues and Solutions*, Plenum Press: New York, 1992.
- Thomas, J. E.; *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*, Editora Interciência: Rio de Janeiro, 2ª ed.; 2004.
- Gabardo, I. T.; *Tese de Doutorado*, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Brasil, 2007.

- CONAMA; *Resolução nº 357/05*; <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res05/res35705.pdf>, acessada em Setembro 2009.
- CONAMA; *Resolução nº 393/07*; <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=541>, acessada em Setembro 2009.
- Santander, M.; *Tese de Doutorado*, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 1998.
- Shaw, D. J.; *Introduction to Colloid and Surface Chemistry*, Butterworths: London, 2ª ed., 1975.
- Mollah, M. Y. A.; Schennach, R.; Parga, J. R.; Cocke, D. L.; *J. Hazard. Mat.* **2001**, *1*, 84.
- Crespilho, F. N.; Santana, C. G.; Rezende, M. O.; *Quim. Nova* **2004**, *27*, 387.
- Wiendl, G. W.; *Processos eletrolíticos no tratamento de esgotos sanitários*, Rio de Janeiro: Ed. ABES: Rio de Janeiro, 1ª ed., 1998.
- Xu, X.; Zhu, X.; *Chemosphere* **2004**, *56*, 10.
- Kumar, P. R.; Chaudhari, S.; Khilar, K. C.; Mahajan, S. P.; *Chemosphere* **2004**, *9*, 55.
- Zongo, I.; Maigab, A. H.; Wéthé, J.; Valentina, G.; Leclerca, J. P.; Paternottea, G.; Lapiquea, F.; *J. Hazard. Mater.* **2009**, *169*, 1.
- Cerqueira, A. A.; Russo, C.; Marques, M. R. C.; *Braz. J. Chem. Eng.* **2009**, *26*, 659.
- Murugananthan, M.; Raju, G. B.; Prabhakar, S.; *J. Hazard. Mater.* **2004**, *109*, 1.
- Hu, C. Y.; Lo, S. L.; Kuan, W. H.; Lee, Y. D.; *Water Res.* **2005**, *39*, 5.
- Yilmaz, A. E.; Boncukcuoglu, R.; Kocakerin, M. M.; Keskinler, B.; *J. Hazard. Mater.* **2005**, *125*, 1.
- Queiroz, M. S.; Souza, A. D.; Abreu, E. S. V.; Gomes, N. T.; Neto, O. A. A.; *Aplicação do Processo Eletrolítico ao Tratamento de Água de Produção*, CENPES-DITER-SEBIO, RT: Rio de Janeiro, 1996.
- Rubach, S.; Saur, I. F.; *Filtration Separation* **1997**, *34*, 8.
- Khemis, M.; Tanguy, G.; Leclerc, J. P.; Valentin, G.; Lapique, F.; *Proc. Saf. Environ. Prot.* **2005**, *83*, 50.
- Un, U. T.; *Fresenius Environ. Bull.* **2007**, *16*, 9.
- Can, O. T.; Kobya, M.; Demirbas, E.; Bayramoglu, M.; *Chemosphere* **2006**, *2*, 62.
- Bensadok, K.; Benammar, S.; Lapique, G. F.; *J. Hazard. Mater.* **2008**, *152*, 1.
- Mollah, M. Y. A.; Paul Morkovsky, P.; Gomes, J. A. G.; Kesmez, M.; Parga, J.; Cocke, D. L.; *J. Hazard. Mater.* **2004**, *114*, 1.
- Chen, X.; Chen, G.; Yue, P. L.; *Sep. Purif. Technol.* **2000**, *1-2*, 19.
- Kobya, M.; Can, O. T.; Bayramoglu, M.; *J. Hazard. Mater.* **2003**, *1-3*, 100.
- Wang, S.; Wang, Q.; *Desalination* **1987**, *66*.
- Hosny, A. Y.; *Sep. Purif. Technol.* **1996**, *6*, 9.
- Vlyssides, A. G.; Karlis, P. K.; Zorpas, A. A.; *Environ. Int.* **1999**, *5*, 25.
- Kim, T. H.; Park, C.; Shin, E. B.; Kim, S.; *Desalination* **2002**, *1-2*, 150.
- Holt, P. K.; Barton, G.; Mitcheli, C.; *Chemosphere* **2005**, *59*, 3.
- Manual do Meio Ambiente, Sistema de Licenciamento de Atividades Poluidoras, SLAP - Métodos FEEMA, 1979, vol. II.
- Crespilho, F. N.; Rezende, M. O. O.; *Eletroflotação: princípios e aplicações*, Rima: São Carlos, 2004.
- Chen, X.; Chen, G.; Yue, P. L.; *Sep. Purif. Technol.* **2000**, *1-2*, 65.
- Golder, A. K.; Hridaya, N.; Samanta, A. N.; Ray, S.; *J. Hazard. Mater.* **2005**, *1-3*, 127.
- Ge, J.; Qu, J.; Lei, P.; Liu, H.; *Sep. Purif. Technol.* **2004**, *36*, 1.
- Den, W.; Huang, C.; *Colloids Surf., A* **2005**, *254*, 1.
- Kobya, M.; Hiz, H.; Senturk, E.; Aydinler, C.; Demirbas, E.; *Desalination* **2006**, *190*, 1.