



Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Centro de Tecnologia e Ciências

Instituto de Química

Bárbara Martins Rodrigues

Utilização da eletrofloculação para tratamento de água de produção

Rio de Janeiro

2008

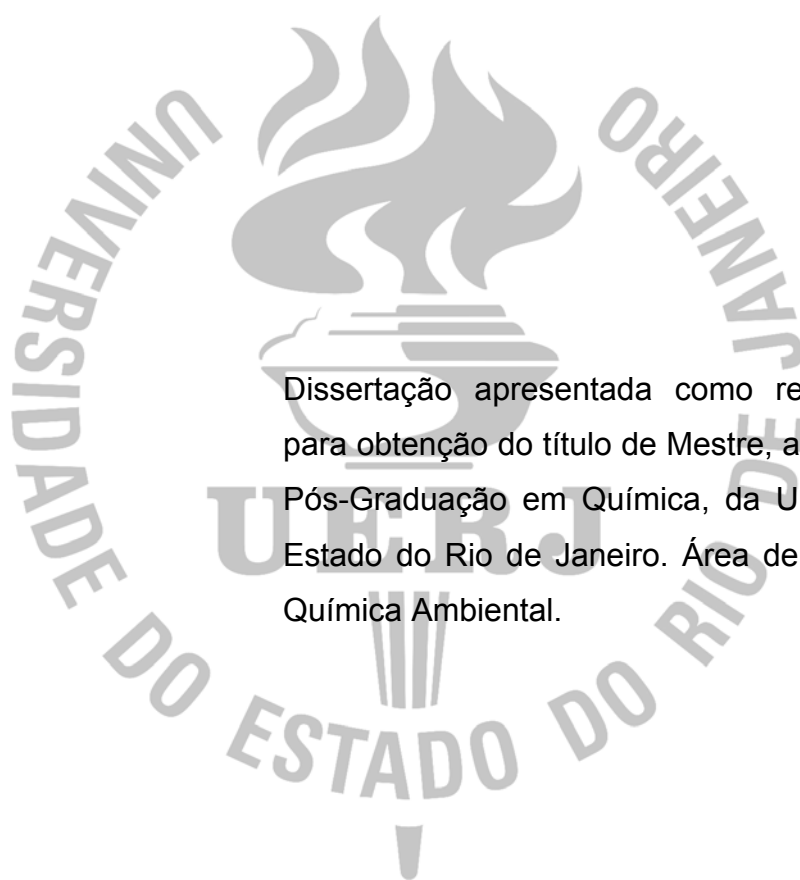
Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Bárbara Martins Rodrigues

Utilização da Eletrofloculação para Tratamento de Água de Produção



Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação em Química, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Química Ambiental.

Orientador: Prof^o. Dr^o. Carlos Russo

Rio de Janeiro

2008

CATALOGAÇÃO NA FONTE
UERJ/REDE SIRIUS/NPROTEC

R696 Rodrigues, Bárbara Martins
Utilização da eletrofloculação para tratamento de água da
produção / Bárbara Martins Rodrigues. – 2008.
107 f.

Orientador: Carlos Russo.
Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado do Rio de
Janeiro, Instituto de Química.

1. Águas residuais - Purificação – Floculação - Teses. I. Russo,
Carlos. II. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Instituto de
Química. III. Título.

CDU628.345

Autorizo, apenas para fins acadêmicos e científicos, a reprodução total ou parcial desta dissertação.

Assinatura

Data

Bárbara Martins Rodrigues

Utilização da eletrofloculação para tratamento de água de produção

Dissertação apresentada como requisito para obtenção do título de Mestre, ao Programa de Pós-Graduação do Instituto de Química, da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Área de concentração: Química Ambiental.

Aprovado em: 06/10/2008_____

Banca examinadora: _____

Prof. Carlos Russo, Ph. D. (Orientador)
Instituto de Química da UERJ

Prof^a. Dr^a. Magali Christe Cammarota
Escola de Química da UFRJ

Prof. Dr. Fábio Merçon
Instituto de Química da UERJ

Rio de Janeiro

2008

DEDICATÓRIA

A Deus, nossa luz maior;

Ao Ricardo, meu marido querido, pelo incansável incentivo ao estudo e
aperfeiçoamento, pelo amor e companheirismo;

Aos meus pais, Rosalba e Marcus, pelo amor incondicional, pelos ensinamentos ao
longo da vida e por serem a razão da minha existência;

A minha irmã Thays, pela imensa alegria em todo momento, pela amizade,
admiração e carinho de sempre.

AGRADECIMENTOS

- À Prof^a. Mônica Regina Marques Palermo de Aguiar - minha co-orientadora, pelo carinho e dedicação com que sempre me tratou, pela presença constante, pela forma como conduziu meu trabalho, permitindo-me aprendizado, liberdade e segurança.
- Ao amigo Alexandre Cerqueira - que algumas vezes foi o meu “guru”, pelo apoio e incentivo.
- Ao Prof. Carlos Russo - meu orientador, por toda sabedoria e competência.
- Aos colegas do CENPES (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo Américo Miguez de Mello), do Laboratório LARA - Oswaldo Aquino, Rafael, Lino, Márcia, Rosana e Silvio, pela total disponibilidade e paciência que me prestaram ao longo de toda etapa experimental do meu trabalho. Obrigada por permitirem que partes importantes da minha dissertação fossem realizadas junto de vocês. Obrigada pela entrega e preparo de amostras, pelos ensinamentos de metodologias, pela disponibilidade de análises químicas. Vocês foram, sem dúvida, essenciais!
- Aos colegas do Terminal de São Sebastião - pelo fornecimento de amostras.
- Aos meus gerentes (José Carlos Gameiro Miragaya, Pedro de Assis e Mauro Silva) na Petrobras - pelo incentivo e apoio.
- Aos colegas do Laboratório de Química Ambiental da UERJ - pelas diversas ajudas, especialmente para a Adriana Azedias.
- Ao aluno de Iniciação Científica, do curso de Engenharia Química do IQ/UERJ, Felipe Gomes Machado - pela participação na realização de alguns ensaios.
- Ao Prof. Ricardo Santelli (UFF – Universidade Federal Fluminense) - pela disponibilidade da análise de boro.

"A vida é como jogar uma bola na parede:

Se for jogada uma bola azul, ela voltará azul;

Se for jogada uma bola verde, ela voltará verde;

Se a bola for jogada fraca, ela voltará fraca;

Se a bola for jogada com força, ela voltará com força.

Por isso, nunca "jogue uma bola na vida" de forma que você não esteja pronto a recebê-la.

A vida não dá nem empresta; não se comove nem se apieda. Tudo quanto ela faz é retribuir e transferir aquilo que nós lhe oferecemos."

"Jamais considere seus estudos como uma obrigação, mas como uma oportunidade invejável para aprender a conhecer a influência libertadora da beleza do reino do espírito, para seu próprio prazer pessoal e para proveito da comunidade à qual seu futuro trabalho pertencer."

Albert Einstein

RESUMO

RODRIGUES, Bárbara Martins. *Utilização da eletrofloculação para tratamento de água de produção, Brasil. 2008. 107f. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.*

A demanda para tratamento de efluentes industriais tem sido maior a cada dia e a indústria tem buscado melhoria constante nos processos para tratamento. Nesse contexto, a eletrofloculação surge como uma técnica promissora, devido à sua eficiência, econômica e ambiental, com possibilidade de reuso da água. O presente trabalho tem como objetivo estudar o tratamento de água de produção de plataforma de petróleo, pelo processo de eletrofloculação, em reator batelada, com eletrodo de alumínio. Foi avaliada a influência de parâmetros como: condutividade, pH, intensidade de corrente aplicada e tempo de operação. O estudo teve foco na remoção de poluentes como óleos e graxas, cor, turbidez e boro. Os resultados alcançados indicam que o processo de eletrofloculação, nas condições operacionais estudadas, é uma alternativa tecnicamente viável para a remoção de óleos e graxas, cor e turbidez, obtendo remoção média de 84%, 83% e 83%, respectivamente. Entretanto, não foi observada eficiência na remoção de boro.

Palavras-chave: eletrofloculação, alumínio, água de produção, óleos e graxas, turbidez.

ABSTRACT

Treatment of industrial wastewaters has grown in the last years and the industry searches continuous improvements in treatment processes. In this context, the electroflocculation comes such as a promising alternative, due to its economic and environmental efficiencies, with possibility to reuse water. This dissertation aims to study the treatment of oil production water, by electroflocculation process, with aluminum electrode, in a batch reactor. The influence of parameters such as conductivity, pH, current density and operation time was evaluated. The study focused on removal oils and greases, color, turbidity and boron. The results indicate that the process of electroflocculation is a technically viable alternative for removal of oils and greases, color and turbidity, obtaining removal average of 84%, 83% and 83%, respectively. However, it wasn't efficient to remove boron.

Keywords: Electroflocculation, aluminum, water production, oils and greases, turbidity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Pilha de Volta (Sardella, 2002).....	25
Figura 2 – Eletrodos (Sardella, 2002).....	25
Figura 3 – Eletrólise (Sardella, 2002).....	26
Figura 4 – Diagrama esquemático de célula de eletrofloculação com dois eletrodos (Mollah <i>et al.</i> , 2004)	28
Figura 5 – Reator monopolar em conexões paralelas (Mollah <i>et al.</i> , 2004)	31
Figura 6 – Reator monopolar em conexões seriadas (Mollah <i>et al.</i> , 2004)	31
Figura 7 – Reator bipolar em conexões paralelas (Mollah <i>et al.</i> , 2004)	32
Figura 8 – Valores de turbidez do efluente bruto e tratado para eletrofloculação. (Crespilho <i>et al.</i> , 2004).....	41
Figura 9 – Eficiência de remoção de DQO e turbidez em função do pH (Kobyta <i>et al.</i> , 2003).....	42
Figura 10 – Efeito do pH na remoção de fluoretos (Shen <i>et al.</i> , 2003).....	43
Figura 11 – Variação da concentração remanescente de nitrato (Koparal e Ogutveren, 2002)	44
Figura 12 – Curvas de sedimentação (Larue <i>et al.</i> , 2003)	45
Figura 13 – Eficiência de remoção de polifenóis, DQO e cor em função do eletrodo (Adhoum e Monser, 2004).....	47
Figura 14 – Efeito da intensidade da corrente na remoção de espécies sulfurosas com anodo de ferro (Muruganathan <i>et al.</i> , 2004)	48
Figura 15 – Foto aérea do Terminal de São Sebastião.....	56
Figura 16 – Diagrama experimental da eletrofloculação (Cerqueira, 2006)	57
Figura 17 – Eletrodo de alumínio	57
Figura 18 – Unidade piloto de eletrofloculação (Cerqueira, 2006)	58

Figura 19 – Eletrodo utilizado e parafusos de ferro.....	68
Figura 20 – Efluente bruto.....	93
Figura 21 – Eletrofloculação de A3, em t = 5 min.....	96
Figura 22 – Lodo em decantação (E) de A3, A4 e A5, em t = 3 min e efluentes eletrofloculados (D) de A3, A4 e A5, em t = 4 min.	100
Figura 23 – Eletrodo antes (E) e depois da eletrofloculação (D), com deposição de sais.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros estabelecidos para o tratamento de efluente da indústria de processamento de coco.....	40
Tabela 2 – Reagentes utilizados nas análises	54
Tabela 3 – Equipamentos utilizados nas análises.....	55
Tabela 4 – Planejamento experimental	59
Tabela 5 – Características do efluente bruto, 1ª etapa.	65
Tabela 6 – Características do efluente bruto, 2ª etapa.	74
Tabela 7 – Características do efluente bruto, 3ª etapa.	82
Tabela 8 – Características do efluente bruto da 4ª etapa (emulsão).....	92

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Comportamento da condutividade do efluente bruto e eletrofloculado, 1º teste.....	66
Gráfico 2 – Comportamento da condutividade do efluente bruto e eletrofloculado, 2º teste.....	66
Gráfico 3 – Remoção de cor do efluente bruto e eletrofloculado, 1º teste.....	67
Gráfico 4 – Remoção de cor do efluente bruto e eletrofloculado, 2º teste.....	68
Gráfico 5 – Comportamento do pH do efluente bruto e eletrofloculado, 1º teste.....	69
Gráfico 6 – Comportamento do pH do efluente bruto e eletrofloculado, 2º teste.....	70
Gráfico 7 – Remoção da turbidez do efluente bruto e dos eletrofloculados, 1º teste.....	71
Gráfico 8 – Remoção da turbidez do efluente bruto e dos eletrofloculados, 2º teste.....	71
Gráfico 9 – Comportamento da tensão elétrica dos efluentes eletrofloculados, 1º teste.....	72
Gráfico 10 – Comportamento da tensão elétrica dos efluentes eletrofloculados, 2º teste.....	72
Gráfico 11 – Remoção de boro do efluente bruto e dos eletrofloculados, 1º teste.....	75
Gráfico 12 – Remoção de boro do efluente bruto e dos eletrofloculados, 2º teste.....	75
Gráfico 13 – Remoção de óleos e graxas do efluente bruto e dos eletrofloculados, 1º teste.....	77
Gráfico 14 – Remoção de óleos e graxas do efluente bruto e dos eletrofloculados, 2º teste.....	77
Gráfico 15 – Comportamento da tensão elétrica dos efluentes eletrofloculados, 1º teste.....	78
Gráfico 16 – Comportamento da tensão elétrica dos efluentes eletrofloculados, 2º teste.....	78

Gráfico 17 – Remoção da turbidez do efluente bruto e dos eletrofloculados, 1º teste.	79
Gráfico 18 – Remoção da turbidez do efluente bruto e dos eletrofloculados, 2º teste.	79
Gráfico 19 – Evolução do volume de lodo decantado dos efluentes eletrofloculados, 1º teste.	80
Gráfico 20 – Evolução do volume de lodo decantado dos efluentes eletrofloculados, 2º teste.	81
Gráfico 21 – Condutividade do efluente bruto e dos eletrofloculados, 1º teste.	83
Gráfico 22 – Condutividade do efluente bruto e dos eletrofloculados, 2º teste.	84
Gráfico 23 – Remoção de cor do efluente bruto e dos eletrofloculados, 1º teste.	84
Gráfico 24 – Remoção de cor do efluente bruto e dos eletrofloculados, 2º teste.	85
Gráfico 25 – Remoção de óleos e graxas do efluente bruto e dos eletrofloculados, 1º teste.	86
Gráfico 26 – Remoção de óleos e graxas do efluente bruto e dos eletrofloculados, 2º teste.	86
Gráfico 27 – Comportamento do pH do efluente bruto e dos eletrofloculados, 1º teste.	87
Gráfico 28 – Comportamento do pH do efluente bruto e dos eletrofloculados, 2º teste.	87
Gráfico 29 – Comportamento da tensão elétrica dos efluentes eletrofloculados, 1º teste.	88
Gráfico 30 – Comportamento da tensão elétrica dos efluentes eletrofloculados, 2º teste.	89

Gráfico 31 – Remoção da turbidez do efluente bruto e dos eletrofloculados, 1º teste.	90
Gráfico 32 – Remoção da turbidez do efluente bruto e dos eletrofloculados, 2º teste.	90
Gráfico 33 – Evolução do volume de lodo decantado dos efluentes eletrofloculados, 1º teste.....	91
Gráfico 34 – Evolução do volume de lodo decantado dos efluentes eletrofloculados, 2º teste.....	91
Gráfico 35 – Remoção de boro do efluente bruto e dos eletrofloculados da emulsão.	94
Gráfico 36 – Comportamento da condutividade do efluente bruto e dos eletrofloculados da emulsão.....	94
Gráfico 37 – Remoção de cor do efluente bruto e dos eletrofloculados da emulsão.	95
Gráfico 38 – Remoção de óleos e graxas do efluente bruto e dos eletrofloculados da emulsão.....	96
Gráfico 39 – Comportamento do pH do efluente bruto e dos eletrofloculados da emulsão.....	97
Gráfico 40 – Comportamento da tensão elétrica dos efluentes eletrofloculados da emulsão.....	98
Gráfico 41 – Remoção da turbidez do efluente bruto e dos eletrofloculados da emulsão.....	98
Gráfico 42 – Evolução do volume de lodo dos efluentes eletrofloculados da emulsão.	99

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CENPES	Centro de Pesquisa e Desenvolvimento Leopoldo A. Miguez de Mello
CFCs	Cloro-flúor-carbonos
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
PETROBRAS	Petróleo Brasileiro S.A.
PA	Pró-Análise
TOG	Teor de Óleos e Graxas
UV	Ultra-Violeta

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	21
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
1.1. ELETROQUÍMICA	24
1.1.1. <i>Princípio de eletroquímica</i>	24
1.1.2. <i>Pilhas</i>	24
1.1.3. <i>Eletrodos</i>	25
1.1.4. <i>Eletrólise</i>	26
1.1.4.1. <i>Eletrólise por via aquosa com eletrodos inertes</i>	27
1.2. TRATAMENTO DE EFLUENTES VIA ELETROFLOCULAÇÃO	27
1.2.1. <i>Descrição do tratamento de efluentes pelo processo eletrolítico</i>	27
1.2.2. <i>Etapas do tratamento de efluentes pelo processo eletrolítico</i>	29
1.2.3. <i>Eletrodos para eletrofloculação</i>	29
1.2.4. <i>Reatores para eletrofloculação</i>	30
1.2.4.1. <i>Reator monopolar</i>	30
1.2.4.2. <i>Reator bipolar</i>	31
1.2.5. <i>Correntes elétricas empregadas na eletrofloculação</i>	32
1.2.5.1 <i>Corrente contínua (DCE)</i>	32
1.2.5.2. <i>Corrente alternada (ACE)</i>	33
1.2.6. <i>Reações do processo de eletrofloculação</i>	33
1.2.6.1. <i>Reações químicas em presença de alumínio</i>	33
1.2.6.2. <i>Reações químicas em presença de ferro</i>	34
1.2.7. <i>Parâmetros associados à eletrofloculação</i>	35
1.2.7.1. <i>Intensidade da corrente</i>	35

1.2.7.2. Condutividade	36
1.2.7.3. pH.....	36
1.2.7.4. Distância entre eletrodos.....	36
1.2.7.5. Material dos eletrodos	37
1.2.7.6. Passivação dos eletrodos	37
1.2.7.7. Inversão de polaridade.....	37
1.2.7.8. Temperatura.....	37
1.2.8. Vantagens e desvantagens da eletrofloculação.....	38
1.2.9. Aplicações da eletrofloculação.....	39
1.3. ELETROFLOCULAÇÃO APLICADA AO TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS ...	40
1.3.1. Remoção de óleos e graxas na indústria alimentícia	40
1.3.2. Remoção de corantes	42
1.3.3. Remoção de fluoreto e nitrato	43
1.3.4. Remoção de látex	44
1.3.5. Remoção de metais	45
1.3.6. Remoção de partículas ultrafinas.....	46
1.3.7. Remoção de polifenóis de óleo vegetal.....	46
1.3.8. Remoção de substâncias sulfuradas em curtume.....	47
1.3.9. Tratamento de água potável	48
1.3.10. Remoção de boro.....	49
1.4. ELETROFLOCULAÇÃO APLICADA AO TRATAMENTO DE ÁGUA OLEOSA.....	50
1.4.1. Água de produção.....	50
1.4.2. Outras águas oleosas	51
2. MATERIAIS E MÉTODOS	54
2.1. REAGENTES.....	54

2.2. EQUIPAMENTOS	55
2.3. PROCEDIMENTOS	55
2.3.1. Coleta, transporte e armazenagem de amostras de água de produção	56
2.3.2. Procedimento experimental.....	56
2.3.2.1. Planejamento, execução e análise da eletrofloculação.....	56
2.3.2.2. Medição de boro.....	60
2.3.2.3. Medição da condutividade.....	60
2.3.2.4. Medição de cor.....	61
2.3.2.5. Medição de óleos e graxas	61
2.3.2.6. Medição do peso do eletrodo	62
2.3.2.7. Medição de pH	62
2.3.2.8. Medição da tensão elétrica	62
2.3.2.9. Medição de turbidez.....	63
2.3.2.10. Medição do volume de lodo decantado.....	63
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
3.1. PRIMEIRA ETAPA	64
3.1.1. Caracterização do efluente bruto	64
3.1.2. Caracterização do efluente eletrofloculado	65
3.1.2.1. Condutividade	65
3.1.2.2. Cor	67
3.1.2.3. pH.....	68
3.1.2.4. Turbidez	70
3.1.2.5. Tensão elétrica.....	71
3.2. SEGUNDA ETAPA	73
3.2.1. Caracterização do efluente bruto	73

3.2.2. Caracterização do efluente eletrofloculado	74
3.2.2.1. Boro.....	74
3.2.2.2. Óleos e Graxas	76
3.2.2.3. Tensão elétrica.....	77
3.2.2.4. Turbidez	79
3.2.2.5. Volume de lodo decantado.....	80
3.3. TERCEIRA ETAPA.....	81
3.3.1. Caracterização do efluente bruto	82
3.3.2. Caracterização do efluente eletrofloculado	83
3.3.2.1. Condutividade	83
3.3.2.2. Cor	84
3.3.2.3. Óleos e Graxas	85
3.3.2.4. pH.....	87
3.3.2.5. Tensão elétrica.....	88
3.3.2.6. Turbidez	89
3.3.2.7. Volume de lodo decantado.....	90
3.4. QUARTA ETAPA	91
3.4.1. Caracterização do efluente bruto	92
3.4.2. Caracterização do efluente eletrofloculado	93
3.4.2.1. Boro.....	93
3.4.2.2. Condutividade	94
3.4.2.3. Cor	95
3.4.2.4. Óleos e Graxas	95
3.4.2.5. pH.....	96
3.4.2.6. Tensão elétrica.....	97

3.4.2.7. Turbidez	98
3.4.2.8. Volume de lodo decantado.....	99
3.4.2.9. Peso do eletrodo	100
4. CONCLUSÃO	101
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103

INTRODUÇÃO

A necessidade de água limpa tem-se mostrado cada vez mais crítica ao redor do mundo. Por séculos, a humanidade utilizou o meio ambiente sem restrições, ignorando a possibilidade de esgotar os recursos naturais e poluir os ecossistemas. Acreditava-se na capacidade de reciclagem infinita da natureza, bem como na total disponibilidade de ar puro, terras férteis, clima ameno e, sobretudo, água potável.

As fontes de água são constantemente poluídas por descargas de efluentes industriais e domésticos ou por outras atividades antropogênicas, tornando o tratamento e o reuso de água totalmente necessário (Kunz e Zamora, 2002). Foi somente nos últimos trinta anos, depois de mais de um século de grande progresso científico e tecnológico, que a idéia de que o uso irrestrito e indiscriminado dos recursos naturais poderia levar à destruição da vida no planeta ganhou força. As florestas, os oceanos, os rios e a atmosfera passaram a ser objeto de preocupações e cuidados por parte de todos (Silva *et al.*, 2003).

Não obstante, os problemas ambientais têm se tornado cada vez mais críticos e freqüentes, principalmente devido ao exponencial crescimento populacional e ao aumento da atividade produtiva. Além disso, devido à ação antrópica, esses problemas têm atingido dimensões catastróficas, que podem ser constatadas através de alterações na qualidade do solo, do ar e da água (Kunz e Zamora, 2002).

Assim, há pelo menos três décadas, um tema amplamente discutido e de elevada importância é o dos recursos hídricos, onde a exploração econômica, regulação da utilização, poluição e escassez, têm ocupado relevante destaque nas diferentes classes da sociedade e ordenamentos jurídicos.

A quantidade de água doce no mundo, estocada em rios e lagos, pronta para o consumo, é suficiente para atender de 6 a 7 vezes o mínimo anual que cada habitante do planeta precisa. Apesar de parecer abundante, esse recurso é escasso: representa apenas 0,3% do total de água no planeta. O restante dos 2,5% de água doce está nos lençóis freáticos e aquíferos, nas calotas polares, geleiras, neve permanente e outros reservatórios, como pântanos, por exemplo (www.socioambiental.org).

De 1940 a 1980, a extração de água doce dos rios, lagos e fontes subterrâneas quadruplicaram-se. Estima-se que no ano 2050 entre $1,0 \times 10^9$ e

$2,4 \times 10^9$ pessoas viverão em países com recursos de água escassos. A água limpa do planeta caminha para assumir o papel que tinha o petróleo em 1973: uma *commodity* em crise, com potencial para lançar a economia mundial num estado de choque. Nem o Brasil, privilegiado com 12% da água doce corrente mundial, vai escapar do estresse hídrico do planeta (Lora, 2002).

Aliadas à falta de água estão a má distribuição e a contaminação deste recurso. Hoje cerca de 1,4 bilhão de pessoas não têm acesso à água limpa, a cada 8 segundos morre uma criança por doença relacionada à qualidade da água, como disenteria ou cólera, e 80% das enfermidades no mundo são contraídas por causa da água poluída (Lora, 2002).

A produção de petróleo e gás é geralmente acompanhada pela produção de água. Esta "água produzida" consiste em água de formação, que está naturalmente presente na água do reservatório, em água de inundação, previamente injetada na água de formação, e em água condensada, resultante da produção de gás. Como a água do mar é injetada no reservatório para manter a pressão na formação para o transporte do petróleo, ocorre uma mistura entre a água do mar e a água de formação (Vegueria *et al.*, 2001).

Uma vez que a água de formação normalmente tem maior concentração de sal e pH menor que da água do mar, o equilíbrio químico é modificado com conseqüente precipitação de sulfatos (BaSO_4 e SrSO_4) e carbonatos (CaCO_3). O volume de água de produção (2000 - 40000 m^3/d) em plataformas petrolíferas offshore é geralmente maior que o volume de óleo. A água de produção em plataformas offshore de gás gira em torno de 2-30 m^3/d . No Brasil, em 1998, um volume estimado de $9,3 \times 10^6 \text{ m}^3$ de água de produção foi descarregado no mar por sete plataformas da Bacia de Campos (Vegueria *et al.*, 2001).

A água de produção é um subproduto da produção de poços de petróleo, a qual fica em contato com óleo *in situ* e posteriormente é separada do petróleo bruto no solo, em um separador de água/óleo.

Após a separação, uma fração da água produzida é re-utilizada para a produção adicional de petróleo, sendo re-injetada no poço. O excesso deve ser tratado e eliminado.

Muitas vezes, a decisão de reutilização depende da qualidade da água produzida após o tratamento. Dependendo de fatores como localização geográfica, método de extração, tratamento químico e tempo de contato com o óleo na

formação, a composição físico-química da água produzida pode variar suas características como salinidade, percentual de sólidos, quantidade de compostos orgânicos e inorgânicos (incluindo minerais), pH, oxigênio dissolvido e condutividade (Ma e Wang, 2005).

Devido à grande produção mundial de petróleo, grande volume de água de produção tem sido produzido a partir da etapa de separação água/óleo, em um percentual de 10% de óleo e 90% de água, os quais precisam ser tratados para reutilização ou re-injeção, por exemplo.

Atualmente, são utilizados, predominantemente, dois processos de tratamento de água produzida: (1) processos químicos, incluindo floculação, filtração e desinfecção; (2) processos físicos, como membrana de separação e nanofiltração. Esses últimos, apesar dos custos mais elevados, podem ser utilizados para remoção de sólidos produzidos e para diminuir as concentrações de orgânicos e inorgânicos. No entanto, sem tratamento primário, como a floculação, muita matéria orgânica e inorgânica, com baixo peso molecular, não é efetivamente retirada e um tratamento adicional da água produzida será necessário para atender as características necessárias à reutilização (Ma e Wang, 2005).

O presente trabalho tem como principal objetivo estudar a utilização da eletrofloculação para o tratamento de água de produção, proveniente de plataformas de produção de petróleo, avaliando diversos parâmetros e suas melhores condições.

Os parâmetros analisados serão pH, condutividade, intensidade de corrente, tempo de reação, desgaste de eletrodo de alumínio (Al).

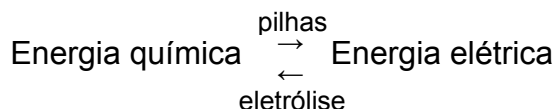
Assim, o efluente será caracterizado, através do monitoramento de óleos e graxas, turbidez, pH, cor, condutividade, volume de lodo decantado, boro.

1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

1.1. Eletroquímica

1.1.1. Princípio de eletroquímica

A eletroquímica é a parte da Química que estuda a relação entre a corrente elétrica e as reações químicas. Os principais fenômenos estudados são a produção de corrente elétrica através de uma reação química (pilha) e a ocorrência de uma reação química pela passagem de corrente elétrica (eletrólise) (Sardella, 2002).



1.1.2. Pilhas

Pilha é um dispositivo que aproveita a transferência de elétrons em uma reação de oxidação-redução e propicia o aparecimento de uma corrente elétrica através de um condutor. Dessa forma, a pilha converte energia química em energia elétrica.

A primeira pilha foi construída em 1800, pelo físico italiano Alessandro Volta. Era constituída por um conjunto de placas de zinco e cobre, empilhadas alternadamente e separadas por cartões embebidos em solução de ácido sulfúrico (Figura 1).



Figura 1 – Pilha de Volta (Sardella, 2002)

1.1.3. Eletrodos

O conjunto formado pela barra metálica e pela solução de seus íons chama-se eletrodo. O eletrodo que emite elétrons (onde há oxidação) para o circuito externo é o anodo e constitui o pólo negativo da pilha; o que recebe elétrons (onde há redução) é o catodo e constitui o pólo positivo (Figura 2).

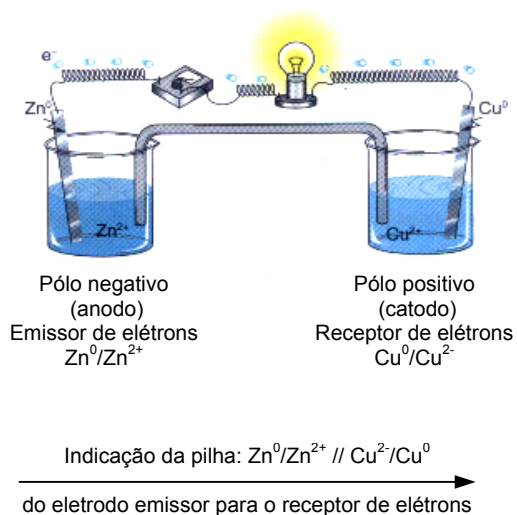


Figura 2 – Eletrodos (Sardella, 2002)

Estabelecendo a conexão entre as duas lâminas através de um fio condutor e colocando a ponte salina, cada equilíbrio desloca-se no sentido do processo, oxidação ou redução.

1.1.4. Eletrólise

O fenômeno de eletrólise é contrário ao da pilha, pois este é espontâneo, enquanto o da eletrólise é não-espontâneo, sendo provocado por corrente elétrica.

Segundo Masterton *et al.* (1990), eletrólise é o processo químico que ocorre quando energia é fornecida a uma célula eletrolítica.

A Figura 3 mostra um esquema geral da eletrólise, supondo um eletrólito genérico CA, e as reações (1) a (4) mostram a eletrólise (Sardella, 2002).

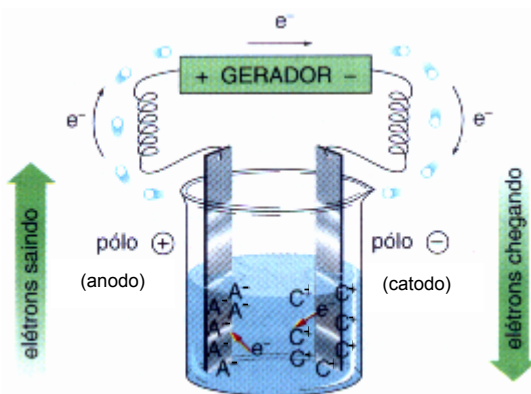


Figura 3 – Eletrólise (Sardella, 2002)

No pólo positivo (anodo) ocorre a oxidação e no negativo (catodo) a redução. Isso mostra que a polaridade inverte da pilha para a eletrólise.



1.1.4.1. Eletrólise por via aquosa com eletrodos inertes

Em uma solução aquosa, além dos íons resultantes da dissociação iônica do eletrólito, há também cátions H^+_3O e ânions OH^- provenientes da auto-ionização da água.

Assim pode-se ter em solução cátions C^+ e H^+_3O e ânions A^- e OH^- , de modo que há uma disputa para descarga nos eletrodos. Entre os cátions, descarrega primeiro aquele com maior tendência em receber elétrons; entre ânions, aquele com maior tendência em doar elétrons.

1.2. Tratamento de efluentes via Eletrofloculação

A eletrofloculação é uma aplicação de reatores eletroquímicos no tratamento de efluentes industriais. Nesse processo são promovidas reações de coagulação a partir da aplicação de corrente elétrica.

1.2.1. Descrição do tratamento de efluentes pelo processo eletrolítico

O tratamento de efluentes através do processo eletrolítico pode ser descrito pelas seguintes etapas:

- A passagem de corrente elétrica gerada pela tensão aplicada, através do conjunto eletrodo-eletrólito, provoca a decomposição das moléculas através de reações de oxi-redução, bem como a quebra da estabilidade coloidal, pela liberação do cátion metálico do eletrodo, ocasionando a coagulação e a floculação, além de gerar gases (H_2 e O_2).
- Os gases gerados aderem à superfície dos flocos diminuindo suas densidades, fazendo-os flotar.

- Um mecanismo de raspagem ou aspiração remove o lodo, rico em gases, para um sistema convencional de secagem, enquanto a fase líquida, já clarificada, pode ser destinada a um decantador e, posteriormente, a um sistema de filtragem, caso seja necessário.

A geração de íons metálicos ocorre no anodo, enquanto o gás hidrogênio surge no catodo, como mostra a Figura 4.

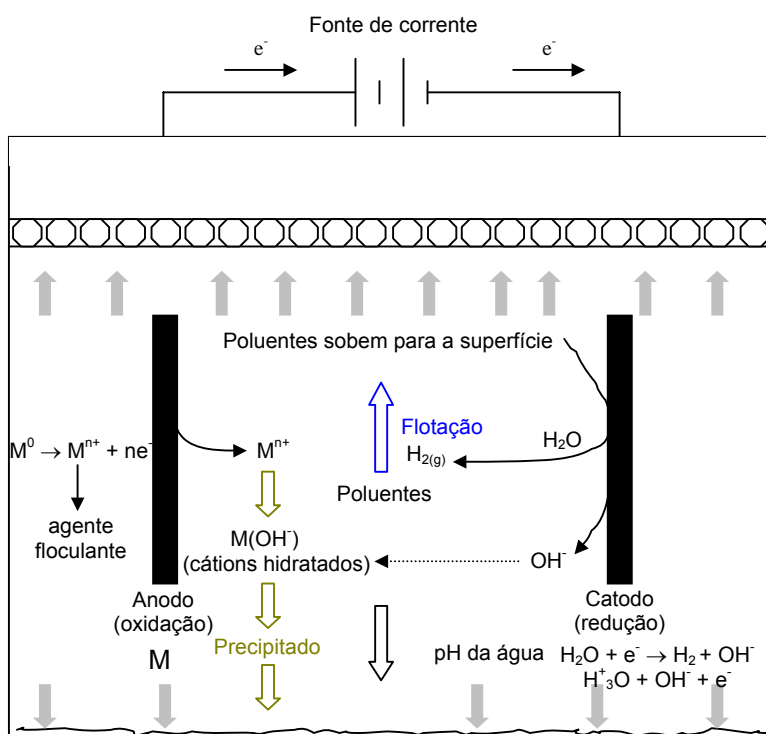


Figura 4 – Diagrama esquemático de célula de eletrofloculação com dois eletrodos (Mollah *et al.*, 2004)

O processo de eletrofloculação oferece uma alternativa para o uso de sais ou polieletrólitos para desestabilizar emulsões e suspensões. A tecnologia remove metais, sólidos coloidais, partículas e poluentes inorgânicos solúveis do meio aquático pela introdução de espécies de hidróxidos metálicos altamente carregadas. Essas espécies neutralizam as cargas eletrostáticas nos sólidos suspensos para facilitar a aglomeração ou coagulação e a separação da fase aquosa (Mollah *et al.*, 2001).

1.2.2. Etapas do tratamento de efluentes pelo processo eletrolítico

Devido à complexidade dos fenômenos envolvidos nos processos eletrolíticos de tratamento de efluentes, há três estágios sucessivos de operação, iniciados por efeito da passagem de corrente elétrica no meio reacional e que ocorrem quase simultaneamente. Por este motivo, é comum a referência ao processo utilizando-se os termos **eletrocoagulação**, **eletrofloculação** ou **eletroflotação** (Silva, 2002):

- Formação de um agente coagulante, geralmente o cátion Al^{3+} ou Fe^{3+} , através da oxidação eletrolítica do eletrodo de sacrifício, geralmente ferro ou alumínio, ocasionando a neutralização das cargas superficiais das partículas coloidais, desestabilizando-as e quebrando emulsões (etapa de coagulação – eletrocoagulação).
- Aglutinação das partículas desestabilizadas pelas hidroxilas formadas no catodo, que favorecem a formação de hidróxidos de ferro e alumínio, que são coagulantes naturais, favorecendo a formação e o crescimento dos flocos (etapa de floculação – eletrofloculação).
- Geração de micro-bolhas de hidrogênio (H_2) no catodo, que sobem à superfície colidindo e sendo adsorvidos pelos flocos, carreando por arraste as partículas e impurezas em suspensão no meio e promovendo dessa forma a clarificação do efluente (etapa de flotação – eletroflotação).

1.2.3. Eletrodos para eletrofloculação

Segundo Silva (2002), a maioria dos eletrodos destinados ao tratamento de efluentes é constituída por materiais idênticos devido, principalmente, a:

- Eletrodos iguais, feitos de mesmo material, têm mesmo potencial. Portanto, teoricamente, $\Delta E^\circ = 0$, o que possibilita a eletrólise com baixa sobre-tensão.
- Eletrodos de alto custo, como os de titânio, tornam o custo do reator mais elevado.

- Eletrodos iguais sofrem desgastes uniformes e simplifica substituição dos mesmos.

1.2.4. Reatores para eletrofloculação

Os dois tipos de reatores destinados ao processo de eletrofloculação são descritos a seguir.

1.2.4.1. Reator monopolar

É a forma mais simples para um reator de eletrofloculação, podendo ser em paralelo ou em série. Neste arranjo, cada par de eletrodos de sacrifício é internamente conectado entre eles, mas não tem interconexões com os eletrodos de fora.

As placas metálicas condutivas utilizadas na eletrofloculação são comumente conhecidas como **eletrodos de sacrifício**. Esses eletrodos abaixam o potencial de dissolução do anodo e minimizam a redução ou deposição do metal elementar no catodo. O eletrodo de sacrifício e o catodo podem ser feitos do mesmo ou de diferentes materiais (Mollah *et al.*, 2004).

A Figura 5 mostra que o arranjo em paralelo consiste em um par de placas metálicas condutivas entre dois eletrodos paralelos e uma fonte de potência, onde o anodo é oxidado e sofre corrosão, enquanto o catodo é reduzido.

A Figura 6 mostra que um reator de eletrofloculação monopolar em série é eletricamente similar a uma célula simples com muitos eletrodos e interconexões. Cada par de eletrodo de sacrifício está internamente ligado entre si e não possui interligações com os eletrodos externos. Esse arranjo é eletricamente similar a uma única célula com vários eletrodos e interconexões.

No arranjo de células em série, uma maior diferença de potencial é exigida para um determinado fluxo de corrente, pois essas células possuem maior resistência. A mesma corrente pode, porém, fluir através de todos os eletrodos. No

arranjo em paralelo, a corrente elétrica é dividida entre todos os eletrodos em relação à resistência das células individuais (Mollah *et al.*, 2001).

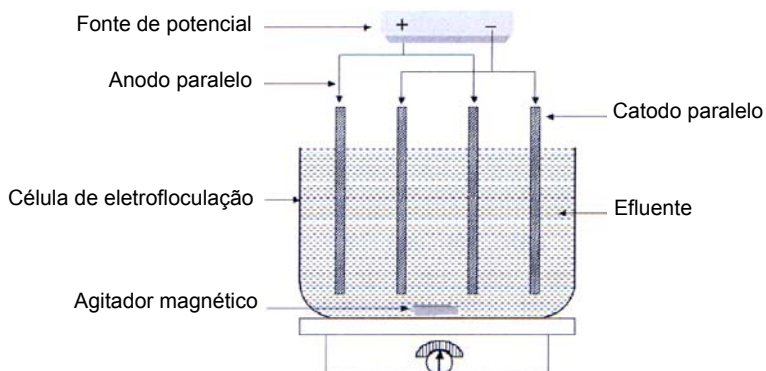


Figura 5 – Reator monopolar em conexões paralelas (Mollah *et al.*, 2004)

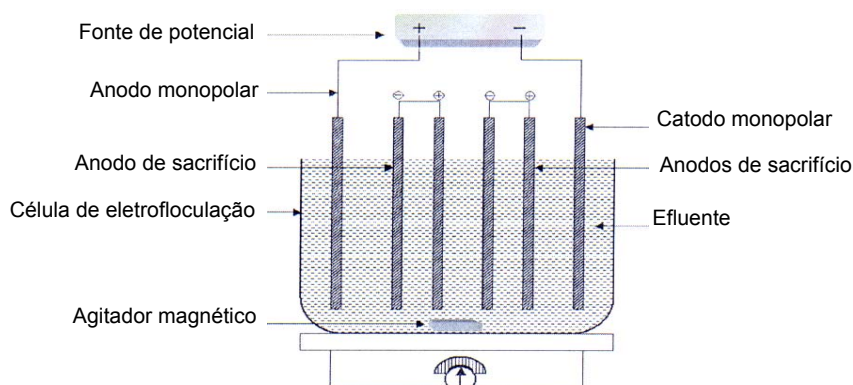


Figura 6 – Reator monopolar em conexões seriadas (Mollah *et al.*, 2004)

1.2.4.2. Reator bipolar

Outro tipo de configuração para reatores de eletrofloculação emprega eletrodos bipolares, com células em paralelo. Neste caso, eletrodos de sacrifício são colocados entre os dois eletrodos em paralelo (denominadas placas condutoras), sem qualquer conexão elétrica, como mostra a Figura 7. Somente os dois eletrodos monopolares são conectados à fonte de energia elétrica, sem interconexão com os eletrodos de sacrifício (Mollah *et al.*, 2004).

Esse arranjo de célula facilita sua manutenção durante o uso. Quando a corrente elétrica atravessa dois eletrodos, os lados neutros da placa adquirem carga oposta à do eletrodo monopolar. Nesse caso, os eletrodos de sacrifício são também conhecidos como eletrodos bipolares.

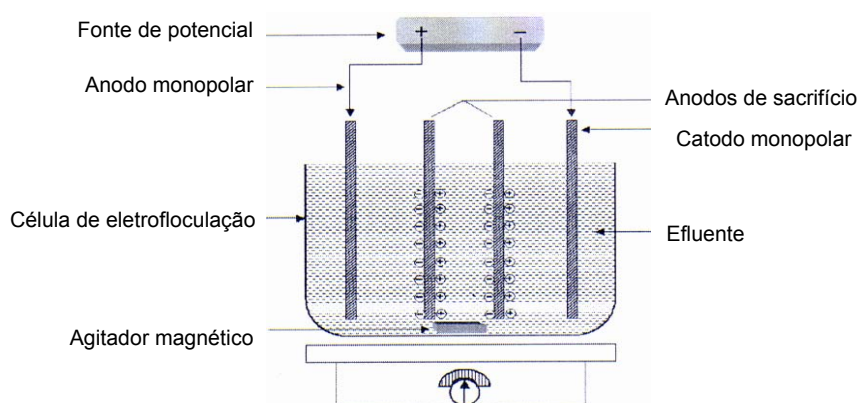


Figura 7 – Reator bipolar em conexões paralelas (Mollah *et al.*, 2004)

1.2.5. Correntes elétricas empregadas na eletrofloculação

Na eletrofloculação podem ser aplicados dois tipos de corrente elétrica, contínua ou alternada, conforme descrito a seguir.

1.2.5.1 Corrente contínua (DCE)

Segundo Mollah *et al.* (2001), no processo de eletrofloculação por corrente contínua há formação de uma camada de óxido impermeável no catodo e uma deterioração no anodo, devido à oxidação. Isso acarreta perda de eficiência na unidade.

Essa limitação do processo tem sido minimizada pela adição de placas de eletrodos de sacrifício paralelas na célula. Devido a essas limitações, muitos têm utilizado o processo de eletrofloculação por corrente alternada (ACE).

1.2.5.2. Corrente alternada (ACE)

A ACE retarda o mecanismo normal do ataque ao eletrodo, que ocorre na DCE e, assim, assegura razoável tempo de vida ao eletrodo.

Além disso, esse processo pode induzir interações dipolo-dipolo no sistema. Como resultado, o campo elétrico pode também interromper a estabilidade do balanço dipolar das estruturas existentes no sistema. Isso não é possível no processo por corrente direta, o que minimiza sua utilização (Mollah *et al.*, 2001).

1.2.6. Reações do processo de eletrofloculação

Segundo Mollah *et al.* (2001), o mecanismo da eletrofloculação é altamente dependente da química do meio aquoso, especialmente a condutividade. Além disso, outras características como pH, tamanho da partícula e concentração dos constituintes, também influenciam a eletrofloculação.

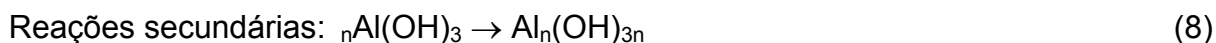
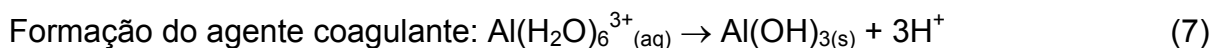
Outro ponto a considerar é a seleção apropriada dos materiais dos eletrodos, sendo alumínio e ferro os mais comuns, por serem baratos, eficazes e prontamente disponíveis.

1.2.6.1. Reações químicas em presença de alumínio

As reações (5) a (8) mostram o que acontece quando alumínio é utilizado como anodo na eletrofloculação.

▪ **Reações de oxidação do anodo de alumínio**





Entretanto, dependendo do pH do meio aquoso, outras espécies iônicas como $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}_2(\text{OH})_2^{4+}$ e $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ também podem estar presentes no sistema.

1.2.6.2. Reações químicas em presença de ferro

O ferro também se oxida através do processo eletrolítico, por dois mecanismos, gerando hidróxido de ferro, conforme apresentado nas reações (9) a (16).

As partículas de $\text{Fe}(\text{OH})_n$ geradas formam uma suspensão gelatinosa que pode remover os poluentes do efluente por complexação ou atração eletrostática, seguida de coagulação. Esse processo pode ocorrer segundo mecanismos distintos.

Mecanismo 1

- **Anodo: oxidação do ferro e formação do hidróxido ferroso**



- **Catodo: redução da água e formação de hidrogênio gasoso**

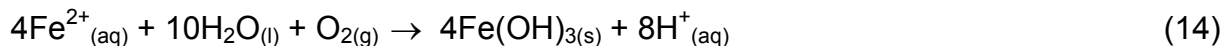


- **Reação global**



Mecanismo 2

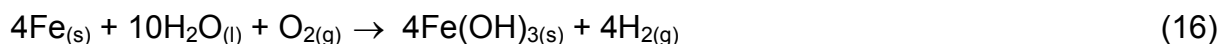
- **Anodo: oxidação do ferro e formação do hidróxido férrico**



- **Catodo: formação do hidrogênio gasoso**



- **Reação global**



1.2.7. Parâmetros associados à eletrofloculação

Alguns parâmetros importantes devem ser considerados no processo de eletrofloculação para que se obtenha a melhor performance da célula eletrolítica.

1.2.7.1. Intensidade da corrente

De acordo com Koren e Kyversen (1995), o aumento na corrente promove aumento no fluxo das bolhas de gás e, conseqüentemente, no efeito de separação. Porém, quando se aumenta a concentração de bolhas de gás, também aumenta a possibilidade de colisão entre as mesmas e isso reduz o efeito de separação de bolhas grandes, as quais são menos eficientes que as bolhas pequenas, pois possuem menor área de contato. As bolhas têm menor condutividade que o eletrólito e isso aumenta o consumo energético.

1.2.7.2. Condutividade

Como descrito por Koren e Kyversen (1995), o eletrólito precisa ter alta condutividade para reduzir o consumo de energia, sem que a corrente seja alterada. Quando a condutividade do efluente é baixa, é usual adicionar sais como, por exemplo, cloreto de sódio (NaCl), para favorecer o aumento da condutividade do eletrólito.

1.2.7.3. pH

Conforme Chen (2004), o pH reflete na eficiência da corrente do eletrodo, pois é mais alta em meio ácido ou alcalino que em meio neutro. Também reflete no consumo de energia, que é maior em pH neutro devido à variação de condutividade; quando a condutividade é alta, o efeito do pH não é significativo.

Segundo Koren e Kyversen (1995), o pH adequado é importante para propiciar a obtenção das substâncias corretas decorrentes das reações dos eletrodos e do eletrólito dentro da célula eletrolítica. A formação de hidrogênio e íons hidroxila no catodo favorece pH adequado no eletrólito.

1.2.7.4. Distância entre eletrodos

De acordo com Koren e Kyversen (1995), a distância entre os eletrodos influencia na otimização dos custos de operação da célula eletrolítica, pois quanto menor for a distância entre os eletrodos, menor será o consumo de energia no processo, sem interferir no grau de separação.

1.2.7.5. Material dos eletrodos

Segundo Chen (2004), os materiais mais comuns nos eletrodos de eletrofloculação são alumínio, utilizado no tratamento de água e no tratamento de efluentes combinado com ferro ou sozinho, devido à alta eficiência de coagulação do íon Al^{3+} , e ferro, devido ao baixo custo.

1.2.7.6. Passivação dos eletrodos

Segundo Mollah *et al.* (2001), um filme de óxido impermeável pode ser formado no catodo, conduzindo à perda de eficiência da unidade e a necessidade de troca dos eletrodos de sacrifício.

1.2.7.7. Inversão de polaridade

Conforme Mollah *et al.* (2004), a inversão de polaridade do eletrodo reduz a formação de óxido impermeável no catodo, o qual interfere na performance da célula.

1.2.7.8. Temperatura

Interfere na eficiência da corrente do eletrodo. Como descrito por Chen (2004), a máxima eficiência de corrente do eletrodo de alumínio é em torno de 60°C no tratamento de águas residuais; se a temperatura for maior, a eficiência cai. A eficiência cresce com a temperatura devido ao aumento da atividade de destruição do filme do óxido de alumínio formado na superfície do eletrodo (passivação).

Quando a temperatura é muito alta, os flocos de $\text{Al}(\text{OH})_3$ se compactam mais e se depositam no eletrodo.

1.2.8. Vantagens e desvantagens da eletrofloculação

Segundo Mollah *et al.* (2001), as principais vantagens do processo de eletrofloculação, quando comparado com o processo de coagulação/floculação convencional são:

- Requer equipamentos simples e de fácil operação.
- Há controle maior na liberação do agente coagulante, em comparação com os processos físico-químicos convencionais.
- Os flocos formados são parecidos com os da floculação química, porém mais estáveis e maiores, podendo ser mais facilmente removidos por simples filtração.
- Produz efluente com menor quantidade de sólido total dissolvido, que, no caso de se buscar o reuso de água, contribui para menor custo.
- Remove as partículas coloidais menores, pois o campo elétrico aplicado promove mais rapidamente o contato entre elas, facilitando a coagulação.
- Afasta o uso de substâncias químicas, minimizando, conseqüentemente, o impacto negativo causado pelo excesso de substâncias químicas lançadas no ambiente, fato que acontece quando a coagulação química, empregando polieletrólitos, é utilizada no tratamento de efluentes.
- O efluente tratado fornece uma água sem cor, sem odor, clara e palatável.
- Tem baixa produção de lodo.
- As bolhas de gás produzidas durante a eletrólise podem levar o contaminante ao topo do reator, onde pode ser concentrado e removido mais facilmente, por raspagem ou sucção, pela técnica de flotação.
- A célula eletrolítica é eletronicamente controlada, não necessitando de dispositivos adicionais, o que requer menos manutenção.

- Pode ser usada convenientemente em áreas rurais onde a eletricidade não é disponível, desde que, evidentemente, haja disponível uma fonte de energia elétrica como, por exemplo, um painel solar.

Mollah *et al.* (2001) também apontam algumas desvantagens da eletrofloculação:

- Os eletrodos de sacrifício precisam ser substituídos regularmente, devido à passivação.
- O uso de eletricidade pode ter alto custo em algumas regiões.
- Um filme de óxido impermeável pode ser formado no catodo, conduzindo à perda de eficiência da unidade.
- Requer alta condutividade do efluente.
- O hidróxido formado pode tender a se solubilizar, em alguns casos.

1.2.9. Aplicações da eletrofloculação

O processo de eletrofloculação tem, há algum tempo, uma ampla gama de aplicações, dentre as quais podem ser citadas:

- Tratamento de água oleosa (Queiroz *et al.*, 1996; [Anon] Autor, 1996; Rubach e Saur, 1997; Ma e Wang, 2005).
- Tratamento de água potável (Vik *et al.*, 1984; Sanfan *et al.*, 1987).
- Tratamento de águas residuárias de restaurantes (Chen *et al.*, 2000).
- Tratamento de efluentes industriais: Recuperação de metais (Chen, 2004), Têxtil (Kobyta *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2003), Semicondutores (Lai e Lin, 2003; Lai e Lin, 2004), Refino de óleo vegetal (Adhoum e Monser, 2004; Inan *et al.*, 2004), Separação de partículas ultrafinas (Matteson *et al.*, 1995), Remoção de fluoretos (Shen *et al.*, 2003), Remoção de nitrato (Koparal e Ogutveren, 2002), Remoção de boro (Yilmaz *et al.*, 2005).
- Tratamento de esgoto sanitário (Wiendl, 1998).

1.3. Eletrofloculação aplicada ao tratamento de efluentes industriais

Neste item serão exemplificadas e discutidas aplicações da eletrofloculação, processo largamente utilizado para remover contaminantes diversos, em diferentes efluentes industriais.

1.3.1. Remoção de óleos e graxas na indústria alimentícia

De acordo com Crespilho *et al.* (2004), efluentes oriundos da indústria de processamento de coco podem ser tratados por eletrofloculação utilizando eletrodos de alumínio. Foram estudados diversos parâmetros como pH, cor, turbidez e óleos e graxas, dentre outros.

As melhores condições estabelecidas são apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros estabelecidos para o tratamento de efluente da indústria de processamento de coco.

Parâmetros	Resultados
Temperatura do efluente	25 °C
ddp aplicada	3,0 V
Tempo total de tratamento	95 min
Vazão de entrada	0,032 L/min
Volume do efluente tratado	3,0 L
Tempo de retenção	0,128 min

Fonte: (Crespilho *et al.*, 2004)

A redução dos valores de turbidez está representada na Figura 8. Como observado, a remoção da turbidez ficou em torno de 93% em relação ao efluente bruto.

Segundo Crespilho *et al.* (2004), uma das maiores vantagens da eletrofloculação é a remoção de óleos e graxas, devido à facilidade de coagulação e flotação dessas moléculas. Como consequência da interação dessas moléculas com o hidróxido de alumínio, formam-se colóides cuja densidade é bem menor que a da água e esses se deslocam naturalmente para a superfície do líquido. Eletrofloculação apresenta eficiência de remoção de óleos e graxas em torno de 96%.

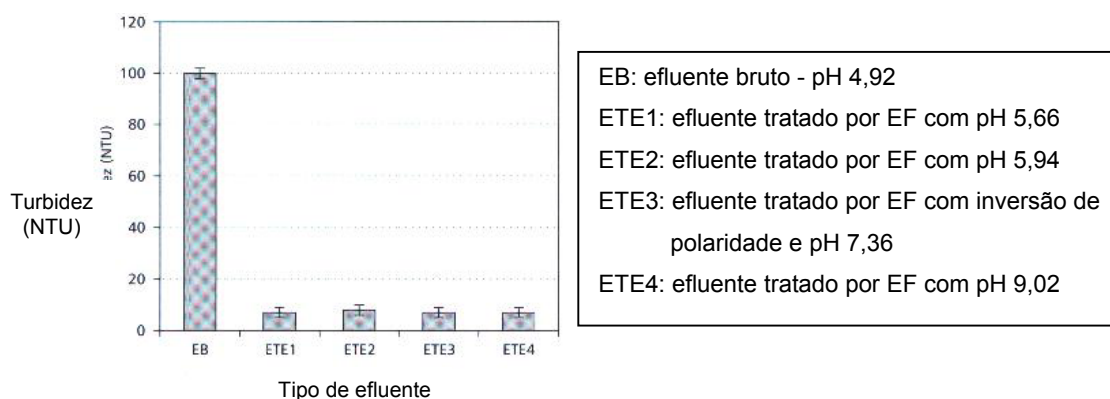


Figura 8 – Valores de turbidez do efluente bruto e tratado para eletrofloculação. (Crespilho *et al.*, 2004)

Estudo realizado por Chen *et al.* (2000) utilizou eletrofloculação com eletrodos de alumínio para tratamento de águas residuárias de restaurante, a fim de remover óleos e graxas. O resultado demonstrou que o pH, a condutividade e a intensidade da corrente elétrica não afetaram significativamente a eficiência de remoção dos poluentes, sendo o carregamento da carga a variável operacional mais importante do processo. A eficiência na remoção de óleos e graxas foi alta (maior que 94%) e a eletrofloculação neutralizou o pH do efluente tratado neste caso.

Trabalho semelhante foi realizado por Xu e Zhu (2004) para tratar águas residuárias de restaurante com altas concentrações de óleos e graxas. Foram monitorados os parâmetros pH, intensidade de corrente, tempo de eletrofloculação, condutividade, distância do eletrodo e concentrações de entrada.

A intensidade de corrente ótima apresentou-se entre 10-14 A/m² e a condutividade teve pouco efeito sobre a eficiência do tratamento. A adição de sais, como NaCl, não melhorou a eficiência de remoção dos poluentes, mas contribuiu

para melhoria do consumo de energia de forma significativa. O aumento da distância dos eletrodos diminuiu a eficiência de remoção de DQO e óleo. O efeito do pH não foi significativo. A eficiência final de remoção de óleo e DQO foi de 95% e 75%, respectivamente.

1.3.2. Remoção de corantes

A aplicação da eletrofloculação em efluentes têxteis ou soluções de amostras contendo corantes foi conduzida em unidades de escala de laboratório por Kobya *et al.* (2003), com boa remoção de cor, turbidez e de sólidos dissolvidos. Geralmente, esses três critérios são selecionados para estudar a eletrofloculação em corantes, além do consumo de energia elétrica.

Os corantes podem interagir com diversas espécies em solução geradas via eletrofloculação. Kobya *et al.* (2003) e Kim *et al.* (2003) afirmam que tanto o $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, quanto as espécies do tipo $\text{Al}_n(\text{OH})_{3n}$, interagem com as moléculas de corantes, promovendo a remoção desses contaminantes e a clarificação do efluente.

Kobya *et al.* (2003) demonstraram que a eficiência de remoção de corantes, através da DQO e da turbidez, foi satisfatória para ambos os parâmetros, para valores específicos de pH, conforme representado na Figura 9.

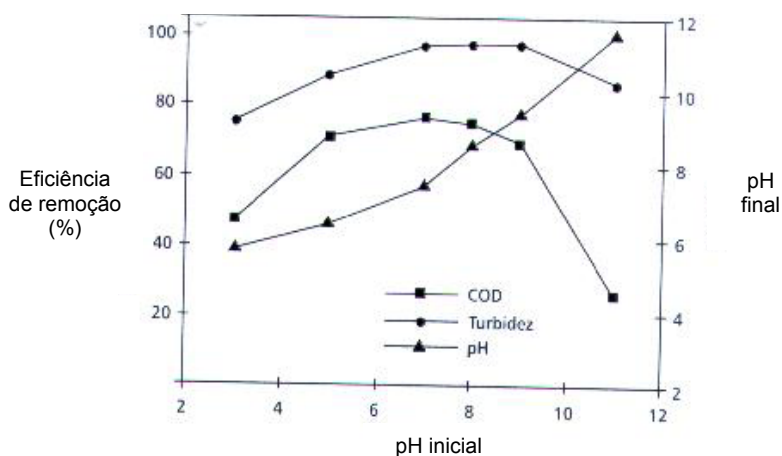


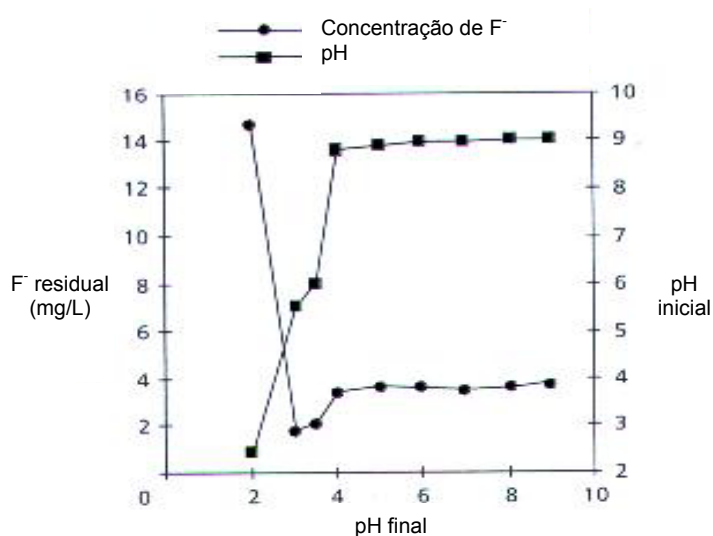
Figura 9 – Eficiência de remoção de DQO e turbidez em função do pH (Kobya *et al.*, 2003)

1.3.3. Remoção de fluoreto e nitrato

Segundo Shen *et al.* (2003) a eletrofloculação utilizando eletrodo de alumínio se destacou na remoção de fluoretos por proporcionar grande eficiência de remoção. Tal fato deve-se, principalmente, a forte interação do fluoreto com o hidróxido de alumínio, de acordo com a reação (17):



Assim, como se pode observar na Figura 10, a remoção de fluoreto está intimamente relacionada ao pH.



Concentração inicial de $\text{F}^- = 15\text{mg/L}$ e tempo de retenção = 32min

Figura 10 – Efeito do pH na remoção de fluoretos (Shen *et al.*, 2003)

Estudo realizado por Mameri *et al.* (1998), utilizando a eletrofloculação com eletrodo de alumínio bipolar para tratamento de água no Saara, também demonstrou a boa eficiência do processo para remoção do ânion fluoreto, sem adição de sais solúveis para tratar a água. O eletrodo bipolar reduziu o tempo do processo e não foi observada contaminação da água por alumínio.

Esse processo de eletrofloculação com eletrodo de alumínio bipolar também pode ser utilizado para remover fluoretos em efluentes industriais.

Estudos realizados por Koparal e Ogutveren (2002) demonstraram que a remoção de nitratos é mais eficiente quando são aplicados altos potenciais por longo tempo, alcançando-se até 85% de remoção. Na Figura 11 observa-se a concentração remanescente de nitrato em uma solução, durante 100 minutos de eletrofloculação, variando-se o potencial aplicado.

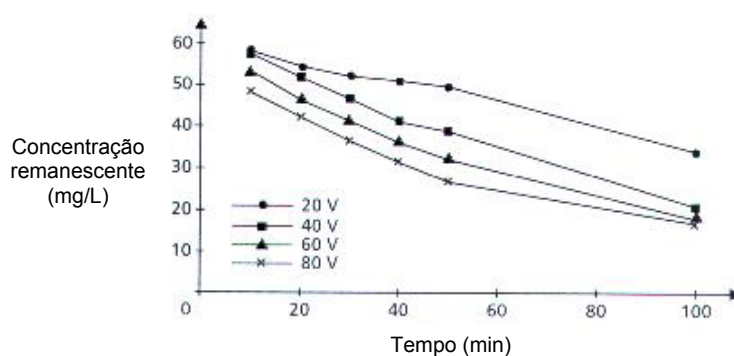


Figura 11 – Variação da concentração remanescente de nitrato (Koparal e Ogutveren, 2002)

1.3.4. Remoção de látex

Segundo Larue *et al.* (2003), efluentes que contêm partículas dissolvidas de látex podem ser tratados por eletrofloculação, utilizando eletrodos de ferro. Com o objetivo de melhorar a filtrabilidade das partículas, bem como a sedimentação das mesmas, foram estudados três processos: o primeiro com adição de cloreto férrico, o segundo com adição de sulfato ferroso e o terceiro por decomposição eletrolítica de eletrodos de ferro.

Os processos químicos e elétricos foram examinados quanto à variação de pH, à concentração de íons metálicos, à minimização do consumo de energia na eletrofloculação, à condutividade e à densidade da suspensão.

No gráfico da Figura 12 são representadas as curvas de sedimentação para estes três processos. Conforme é possível constatar, a eletrofloculação reduziu o

tempo de sedimentação, devido ao tamanho dos flocos formados serem maiores que os obtidos na floculação com sais de ferro. Assim, a eficiência da eletrofloculação foi maior que a da floculação.

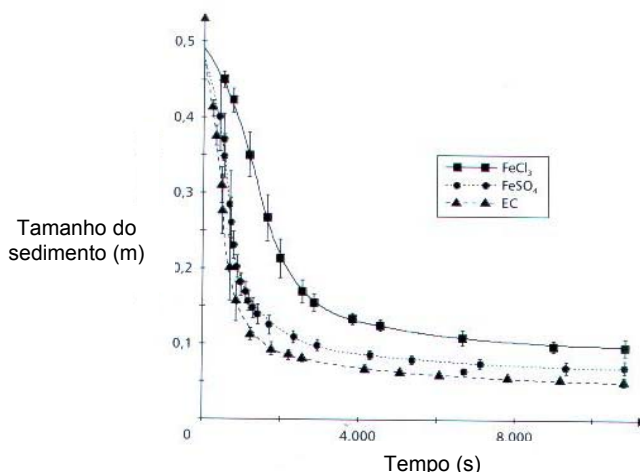


Figura 12 – Curvas de sedimentação (Larue *et al.*, 2003)

1.3.5. Remoção de metais

Estudos realizados por Lai e Lin (2004), utilizando eletrofloculação com par de eletrodos de alumínio e ferro para tratamento de efluente de uma planta de semicondutores, caracterizada por alto teor de sólidos em suspensão (acima de 4000mg/L), alta turbidez, DQO (acima de 500mg/L) e cobre, mostrou alta eficiência para remoção de cobre (99%) e da turbidez (96,5%), em menos de 30 minutos.

A remoção de DQO obtida foi em torno de 85% e o efluente ficou bastante limpo. Além disso, a produção de lodo foi relativamente baixa.

Outro estudo para remoção de cobre foi realizado por Oussedik e Khelifa (2001) no processo de galvanização. A eficiência de remoção do metal foi de 90% e quatro parâmetros foram considerados fundamentais, por terem ação direta na redução da concentração de cobre: concentração do íon, concentração de aditivos, intensidade da corrente e pH.

Kumar *et al.* (2004) estudaram o processo de eletrofloculação para remoção de íons de arsênio (As^{3+} e As^{5+}) da água. Foram conduzidos experimentos em

laboratório utilizando alumínio, ferro e titânio como eletrodos e o ferro apresentou-se como o melhor para a remoção dos íons As^{3+} e As^{5+} . Os resultados mostraram que a alta intensidade da corrente proporcionou rápida remoção de arsênio. Além disso, foi realizada uma comparação da eletrofloculação com o processo de coagulação convencional, utilizando cloreto férrico, na remoção destes íons e a eletrofloculação mostrou-se melhor para remoção do As^{3+} , enquanto o As^{5+} foi removido quase da mesma forma por ambos os processos.

O mecanismo de remoção do As^{3+} por eletrofloculação parece ser a oxidação do As^{3+} a As^{5+} e subsequente remoção por adsorção/complexação com os hidróxidos metálicos gerados no processo.

1.3.6. Remoção de partículas ultrafinas

A eletrofloculação tem sido utilizada para remoção de partículas ultrafinas em efluentes industriais, em substituição ao processo convencional de coagulação-floculação. Estudos realizados por Matteson *et al.* (1995) para remoção de partículas ultrafinas de caolinita $[\text{Al}_4(\text{Si}_4\text{O}_{10})(\text{OH})_8]$, utilizando eletrodo de ferro, demonstram que, sob ação de um campo elétrico, a concentração das partículas em suspensão aquosa diminui, devido à migração eletroforética das partículas em direção ao anodo, onde a carga elétrica é neutralizada pelos íons de ferro, propiciando posterior coagulação das partículas.

Nesse estudo não foi observada redução na remoção das partículas devido à redução de corrente, a qual determina a quantidade de íons de ferro na solução. Esse suprimento é feito mais rapidamente quando comparado à coagulação convencional.

1.3.7. Remoção de polifenóis de óleo vegetal

Os polifenóis são compostos tóxicos que podem causar sério impacto ambiental. Estudos realizados por Adhoum e Monser (2004), aplicando

eletrofloculação em efluentes da indústria de extração de óleo de oliva com eletrodos de alumínio, mostraram uma capacidade de remoção de 76% de DQO, 91% de polifenóis e 95% de cor em apenas 2 minutos. Esse tipo de efluente é característico por apresentar coloração verde escura. Para tratá-lo, o consumo de eletrodo por volume de efluente foi de aproximadamente 2,11 kg/m³.

Neste caso, os eletrodos de alumínio são mais eficientes que os de ferro e a faixa ideal de pH é 4 - 6. A Figura 13 mostra a eficiência de remoção de DQO, polifenóis e cor, em função do tipo de eletrodo.

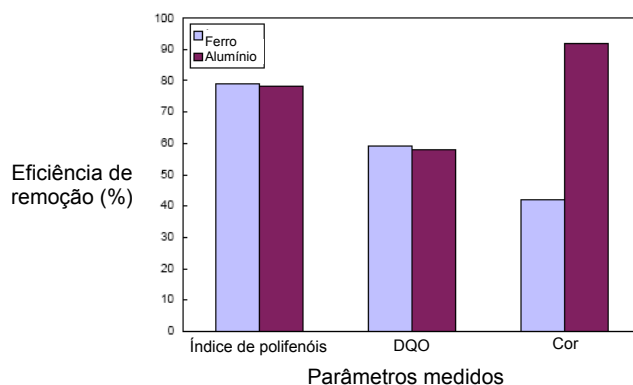


Figura 13 – Eficiência de remoção de polifenóis, DQO e cor em função do eletrodo (Adhoum e Monser, 2004)

Um aumento na corrente melhorou significativamente a velocidade do tratamento, mas foi observado aumento no consumo de energia e do eletrodo. Em seguida, foi encontrada a intensidade de corrente ótima para o tratamento, de 75 mA/cm², o que permitiu um tratamento mais rápido e com menor custo.

Os resultados mostraram que a eletrofloculação pode ser considerada uma alternativa efetiva para o tratamento de efluente contendo óleo de oliva.

1.3.8. Remoção de substâncias sulfuradas em curtume

Estudos realizados por Murugananthan *et al.* (2004) aplicando eletrofloculação, com eletrodos de alumínio e ferro e eletrodo insolúvel de titânio,

para remoção de sólidos em suspensão e compostos sulfurados (sulfeto, sulfato e sulfito) de efluentes de curtume, demonstraram que a eletrofloculação é eficiente com eletrodos de alumínio e ferro.

A etapa de coagulação mostrou-se importante para a efetiva flotação dos sólidos em suspensão. Os íons metálicos gerados “*in situ*” pela oxidação eletrolítica no anodo reagiram com os íons sulfeto dissolvidos e os sulfetos metálicos formados como suspensão coloidal foram coagulados e flotados simultaneamente pelas bolhas de H₂ geradas no catodo.

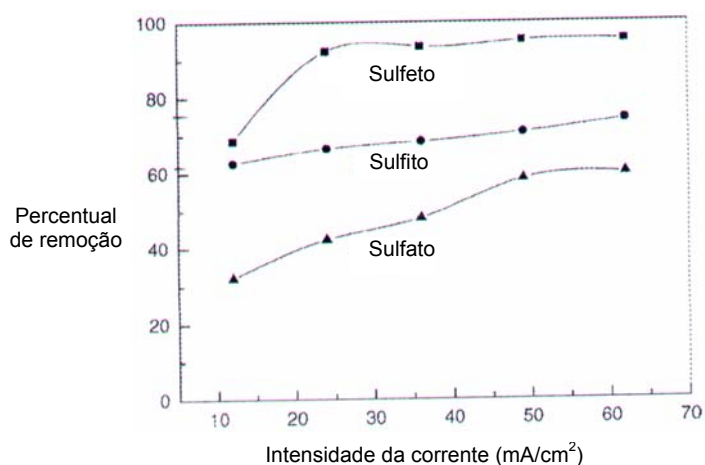


Figura 14 – Efeito da intensidade da corrente na remoção de espécies sulfurosas com anodo de ferro (Muruganathan *et al.*, 2004)

A intensidade da corrente foi um importante parâmetro na remoção das espécies sulfuradas. Como mostrado na Figura 14, o aumento da corrente propiciou aumento no percentual de remoção. O íon sulfeto teve remoção maior que 90%, enquanto sulfato e sulfito tiveram apenas 60% e 75% de remoção, respectivamente.

1.3.9. Tratamento de água potável

Processos eletroquímicos têm sido utilizados no tratamento de água desde 1887, sendo interessante para plantas pequenas e em países em desenvolvimento.

Vik *et al.* (1984) estudaram a aplicação do processo de eletrofloculação para a remoção de húmus aquático. Em relação ao tratamento usual com alumínio, a eletrofloculação mostrou maior concentração residual do mesmo, devido à formação de hidrogênio no catodo conferir alto valor de pH ao meio, mas o processo convencional mostrou maior teor de sulfato e maior condutividade específica.

Além disso, como vantagens da eletrofloculação nesse processo, em relação ao tratamento comum, pode-se considerar: apenas 10% da quantidade de produto químico, troca de eletrodo uma vez ao ano, menor formação de lodo, facilidade de operação e manutenção e isenção de contato com produto químico durante as operações.

1.3.10. Remoção de boro

Pequena quantidade de boro é nutriente para algumas plantas, mas seu excesso afeta de forma negativa o crescimento. O limite máximo permitido de boro em água para consumo humano é de 500 µg/L, segundo CONAMA 396/2008.

Tratamentos biológicos convencionais não são eficazes na remoção de boro de águas residuais, em função da característica anti-séptica dos compostos inorgânicos de boro. Também não são eficientes métodos de coagulação-precipitação. Métodos que utilizam troca iônica podem ser aplicados para a remoção de boro, porém têm alto custo. A eletrocoagulação mostra-se como método simples e eficiente para este caso.

Yilmaz *et al.* (2005) estudaram a remoção de boro de águas residuais através da eletrocoagulação, com eletrodo de alumínio. Foram analisados os parâmetros pH, intensidade de corrente, concentração de boro e tipo e concentração do eletrólito.

O pH da solução foi mantido constante em 8,0, em função do eletrodo de alumínio ter dependência direta do mesmo e da maior capacidade de remoção de boro neste valor. O consumo de energia aumentou com o decréscimo da concentração de boro, uma vez que a condutividade da solução era baixa. A eficiência de remoção de boro foi maior em 100 mg/L que em 1000 mg/L. A intensidade de corrente foi um fator importante para a eficiência de remoção: a eficiência de remoção de boro e o consumo energético aumentaram com o aumento

da intensidade de corrente de 1,2 para 6,0 mA/cm². Com a adição de CaCl₂, houve aumento de condutividade e foi atingida a máxima eficiência de remoção, 97%.

1.4. Eletrofloculação aplicada ao tratamento de água oleosa

Neste item serão mostradas as aplicações da eletrofloculação ao tratamento de diversos tipos de águas oleosas, inclusive água de produção de plataforma de petróleo, tema desta dissertação.

1.4.1. Água de produção

Trabalho realizado pelo Centro de Pesquisas da Petrobras – CENPES (Queiroz *et al.*, 1996) estudou a eletrofloculação para tratamento de água de produção, com alta salinidade, e efluente de refinaria, com baixa salinidade.

O processo mostrou-se eficiente para ambos efluentes, mas o principal foco foi a água de produção, em função da maior salinidade caracterizar maior condutividade, favorecendo o processo de oxidação dos materiais em suspensão (sulfetos, amônia, fenóis) com menor consumo energético e, ainda, significativa redução de materiais dissolvidos (óleos e graxas).

A redução da concentração de sulfetos, fenóis e amônia e o acúmulo do cloro gerado indicam constância nas reações de oxidação em função do tempo, isto é, o pH do meio cai enquanto cloro é gerado. Tal fato reduz os riscos de formação de organoclorados, os quais exigiriam reações mais lentas em presença de concentrações mais altas de cloro.

Rubach e Saur (1997) testaram a eletrofloculação em água de produção onshore em uma planta piloto, em processo contínuo, com capacidade de 1,0 m³/h. Os resultados mostraram eficiência de 98,8% na separação de hidrocarbonetos saturados, 97,8% nos aromáticos e 95,8% nos compostos polares. A separação total foi de 98,4%. O consumo energético diminuiu de 9,0 para 1,5 kWh/m³ em função do aumento da condutividade de 60 para 4800 mS/m. A concentração de óleo na saída

não foi influenciada pela mudança na condutividade. A adição de emulsificador e inibidor de corrosão não influenciou na eficiência.

Uma planta piloto para tratamento de água de produção, utilizando um eletrodo com dois anodos (metal ativo, como Fe, Cu, Zn, e grafite) e ferro no catodo, além de um metal nobre (como Pt, Ru, Rh) contendo um catalisador com grande área superficial, foi estudada por Ma e Wang (2005).

Os poluentes orgânicos, incluindo bactérias, foram oxidados e coagulados através da produção de íons metálicos (M^{n+}). O pH foi elevado de 6,5 para 12, em 10 min, devido à formação de H_2 . DBO e DQO foram reduzidas em 90%, em 6 min, sólidos suspensos em 99%, Ca^{2+} em 22%, bactérias em 99%, em 3 min e 15V, e 98% na taxa de corrosão.

1.4.2. Outras águas oleosas

Estudo datado de 1996, [Anon] autor, descreve sobre a utilização da eletrofloculação para remoção de óleo, metais pesados e compostos orgânicos em emulsões óleo/água.

Os resultados mostram percentual de remoção de óleo para os compostos alifáticos não polares maior que 90% e para os polares, alifáticos e aromáticos, menor que 65%. A remoção de óleo cresceu de acordo com o crescimento da corrente, em função da maior geração de bolhas de gás. A remoção de metais foi boa para zinco (91,2%) e ferro (94%) e satisfatória para chumbo (50%, em função da quantidade inicial já ser muito baixa). Para cromo, cobalto e cobre não houve remoção relevante.

Mostefa e Tir (2004) estudaram a floculação, através da adição de três diferentes floclulantes (poliacrilamida não iônica, sulfato de ferro hidratado e sulfato de alumínio hidratado), agregada à eletroflotação, para tratamento de água residuária oleosa contendo hidrocarbonetos. O processo de eletroflotação é adequado para separação de óleo em água oleosa, mas limita-se à determinada concentração de óleo. Neste estudo, a floculação química torna-se de grande importância devido a sua capacidade de remover organo-colóides.

A emulsão tratada foi constituída de 80% de óleo básico mineral, 10% de surfactantes, 6% de co-surfactantes e 4% de outros aditivos. Além disso, sulfato de sódio foi adicionado para aumentar a condutividade da emulsão. Foram avaliados os parâmetros DQO, turbidez e condutividade. O controle do pH e da concentração de óleo foi necessário para obtenção de baixos valores de DQO e turbidez, uma vez que possuem influência direta sobre esses parâmetros. O valor ótimo da intensidade de corrente foi de 11,15 mA/cm² e a eficiência de remoção de óleo foi de 99%, nas condições ótimas de processo.

Trabalho realizado por Ben Mansour e Chalbi (2006) estudou a eletroflotação para remoção de óleo de águas oleosas, através de uma célula equipada com eletrodos de titânio revestido de óxido de rutênio no anodo e aço inox no catodo. Foram analisados os parâmetros intensidade de corrente, concentração de óleo, tempo de flotação e concentração do coagulante e suas influências na performance da eletroflotação.

Os percentuais de remoção foram de 70% em condições ótimas, 75% em presença de NaCl (3,5% em peso) e 99,5% na presença de NaCl e ótima concentração de coagulante. O consumo energético variou de 0,4 a 1,6 kWh/m³, de acordo com as condições experimentais.

Un (2007) estudou a utilização da eletrocoagulação, com eletrodos de ferro, para o tratamento de águas residuais do refino de óleo vegetal. Foram monitorados os parâmetros pH inicial, intensidade de corrente, distância entre os eletrodos e o tipo de conexão entre eles (paralelo ou série) para analisar a eficiência de remoção de DQO, além do consumo de energia.

A eficiência de remoção de DQO cresceu com a intensidade de corrente aplicada e a distância entre os eletrodos, mas decresceu com o aumento do pH inicial. A eficiência de remoção de DQO foi de 99,3%, após 1h de eletrocoagulação, em pH = 3 e 25 mA/cm².

Outro estudo utilizando processo químico (coagulação com sais de alumínio) e eletroquímico (eletrocoagulação) agrupados, para tratamento de emulsão oleosa, foi realizado por Cañizares *et al.* (2008).

Os resultados mostraram que a eficiência do processo foi obtida em função da concentração total de alumínio e do pH. O pH comportou-se de forma diferente nos processos químico e eletroquímico: cresceu durante os experimentos do processo eletroquímico, devido a formação de hidróxido de alumínio, e decresceu no

processo químico, devido a propriedade ácida dos sais de alumínio adicionados (cloreto e sulfato de alumínio). A quebra das emulsões ocorreu entre pH 5 e 9, sendo a concentração de alumínio necessária para desestabilizar as emulsões diretamente proporcional à concentração de óleo. Os eletrólitos clorados aumentaram a remoção da DQO, quando comparados aos sulfurados.

Bensadok *et al.* (2008) estudaram a eletrocoagulação como pré-tratamento para água residual contendo óleo de corte em um processo de membrana. Foi preparada uma emulsão oleosa com óleo de corte mineral, utilizado para operações de perfuração e em máquinas. O processo ocorreu em batelada e foi monitorado o pH, a DQO e a turbidez. O foco principal do estudo foi o efeito dos parâmetros operacionais (pH inicial, intensidade de corrente, concentração de óleo e taxa de recirculação) na eficiência da des-emulsificação.

Os resultados mostraram que a eficiência do tratamento cresceu com o aumento da intensidade da corrente, mas abaixou com a concentração de óleo. O pH inicial ótimo mostrou-se próximo de 7,0 e a remoção de DQO e turbidez foi de 92% e 99%, respectivamente. A concentração ideal de alumínio foi da ordem de 10 mg/g de óleo.

Dessa forma, em função das vantagens apontadas para o processo de eletrofloculação em comparação ao tradicional, além dos ótimos resultados obtidos na literatura para remoção de diversos poluentes, principalmente óleos e graxas, neste trabalho foram avaliados diversos parâmetros que possuem interferência direta no processo, bem como suas melhores condições, conforme descrito nos capítulos seguintes.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Reagentes

Os reagentes utilizados nas análises químicas desta Dissertação são descritos na Tabela 2.

Tabela 2 – Reagentes utilizados nas análises

Reagente	Fornecedor	Especificação
Ácido nítrico	Vetec	65% PA
Clorofórmio	Vetec	PA (seco)
Hexano	Vetec	PA (mistura de isômeros)
Horiba S-316*	Horiba	100% PA
Solução de calibração padrão do condutivímetro	Digimed	1.412 $\mu\text{S}/\text{cm}$
Solução de calibração padrão do espectrofotômetro IV	Horiba	22 μL de óleo padrão em 100mL de Horiba S-316
Solução de calibração padrão do medidor de pH	Oakton	Solução tampão pH 4,00 $\pm 0,02$ e pH 7,00 $\pm 0,02$
Solução de calibração padrão do turbidímetro	TecnoPON	0,1 a 1000 NTU
Sulfato de sódio	Vetec	98% PA

* Mistura de cloro-flúor-carbonos

2.2. Equipamentos

Os equipamentos mais importantes utilizados nas análises químicas desta Dissertação são descritos na Tabela 3. Além desses, vidrarias e equipamentos tradicionais de análises laboratoriais também foram amplamente utilizadas.

Tabela 3 – Equipamentos utilizados nas análises

Equipamento	Marca	Modelo
Balança	Marte	AS 5500 C
Condutivímetro	Digimed	DM3
Espectrofotômetro ótico com plasma acoplado (ICPOES) ^a	Jobin Yvon	Última 2
Espectrofotômetro visível	Femto	600 S
Espectrofotômetro de Infravermelho ^b	Horiba	OCMA 350
Medidor de pH	Oakton	Acorn, Série 6
Turbidímetro	TecnoPON	TB 100

^a Agradecimento ao Prof. Ricardo Santelli, UFF.

^b Agradecimento ao Oswaldo de Aquino, CENPES, Laboratório LARA.

2.3. Procedimentos

Neste item estão descritos os procedimentos de análise para coleta de amostras, bem como para os parâmetros de monitoramento estabelecidos no estudo, a fim de caracterizar o efluente de água de produção.

2.3.1. Coleta, transporte e armazenagem de amostras de água de produção

As amostras de água de produção de plataformas de petróleo utilizadas nesta Dissertação foram cedidas pela Petrobras, sendo coletadas no Terminal de São Sebastião, no município de São Sebastião, em São Paulo (Figura 15).



Figura 15 – Foto aérea do Terminal de São Sebastião.

O ponto de coleta das amostras foi o tanque “agueiro”, situado entre o tanque de armazenagem de águas residuais e o flutuador da entrada da estação de tratamento de efluentes. A água de produção, bem como outros tipos de água, chega por navio ao Terminal, vinda da Bacia de Campos, no Rio de Janeiro, bem como outras unidades de produção de petróleo.

As amostras foram coletadas a cada dois meses, durante oito meses, em bombonas de polietileno de 20L.

As amostras ficaram condicionadas em temperatura ambiente de 25°C.

2.3.2. Procedimento experimental

2.3.2.1. Planejamento, execução e análise da eletrofloculação

O procedimento experimental consistiu de ensaios de eletrofloculação, em processo batelada, com eletrodo de alumínio, em uma célula eletrolítica, conforme ilustrado na Figura 16.

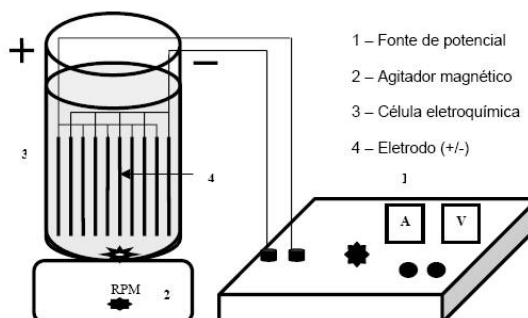


Figura 16 – Diagrama experimental da eletrofloculação (Cerqueira, 2006)

O equipamento de eletrofloculação consistia de uma célula eletrolítica desenvolvida pela Peltron Engenharia Ambiental Ltda (Cerqueira, 2006). O reator de vidro possuía capacidade de 1L e recebia, verticalmente, o eletrodo (monopolar tipo colméia) de alumínio com 7 placas intercaladas. As placas tinham dimensão de 10cm de altura, 5cm de largura e 1,5mm de espessura. O espaço entre as placas era de 5mm (Figura 17).

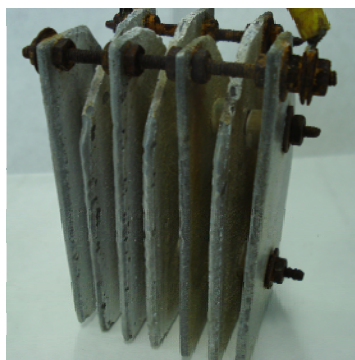


Figura 17 – Eletrodo de alumínio

A Figura 18 mostra a unidade piloto de eletrofloculação utilizada nesta Dissertação. Era composta por uma fonte de corrente contínua variável, um

transformador isolador (com finalidade de separar a rede elétrica alimentadora primária da etapa de retificação secundária), um indicador de leitura de corrente e um de tensão (para orientar quanto aos parâmetros aplicados na colméia de eletrodo).



Figura 18 – Unidade piloto de eletrofloculação (Cerqueira, 2006)

O planejamento dos experimentos foi realizado no início de cada etapa e ao final as repetições realizadas em cada uma delas.

Foram analisadas as amostras não eletrofloculadas, denominadas de bruta, e as eletrofloculadas, nomeadas de acordo com respectiva intensidade de corrente, por exemplo, 2, quando foi utilizada intensidade de corrente igual a 2A.

Foram estabelecidos os tempos de eletrofloculação por etapas, em função dos resultados da etapa anterior. Para as etapas subsequentes à etapa 2, os tempos foram reduzidos e otimizados, em função dos resultados da etapa 1. Também foram estabelecidos tempos de inversão da polaridade do eletrodo, de acordo com o tempo total de eletrofloculação.

Por fim, foram estabelecidos os parâmetros de análise por etapa, também em função dos resultados anteriores. O planejamento geral dos experimentos é mostrado na Tabela 4.

As etapas 1, 2 e 3 consistiram na eletrofloculação de amostra real de água de produção proveniente de plataforma de petróleo, objeto de análise desta Dissertação.

A etapa 4 foi realizada com amostra simulada de água de produção, uma emulsão com água do mar e 176 mg/L de óleos e graxas, preparada no Laboratório

LARA do CENPES. Tal emulsão serviu para comparar com os resultados obtidos com a água de produção utilizada e a literatura.

Após adição do efluente e introdução do eletrodo, a eletrofloculação era iniciada, sendo mantida agitação constante no reator.

As amostras brutas e eletrofloculadas (após filtração) foram analisadas quanto a diversos parâmetros, conforme Tabela 4.

A avaliação de eficiência do processo de eletrofloculação aplicada ao tratamento de água de produção foi feita, principalmente, em função do parâmetro óleos e graxas, uma vez que esse é o maior poluente deste tipo de efluente e a fim de demonstrar a eficácia da eletrofloculação na remoção desse poluente.

Tabela 4 – Planejamento experimental

Etapa	Repetições	Amostra	Origem da Amostra	Intensidade de corrente (A)	Tempo Total (min)	Tempo de Inversão (min)	Parâmetros
1ª	1ª, 2ª	Bruta, 1, 2, 3, 4, 5	Água de produção	1, 2, 3, 4, 5	5 8 12 15	2,5 4 4 5	Condutividade, cor, pH, tensão elétrica, turbidez
2ª	1ª, 2ª	Bruta, 3, 4, 5	Água de produção	3, 4, 5	2 3 4 5	- - 2 2,5	Boro, óleos e graxas, tensão elétrica, turbidez, volume de lodo
3ª	1ª, 2ª	Bruta, 3, 4, 5	Água de produção	3, 4, 5	2 3 4 5	- - 2 2,5	Condutividade, cor, pH, óleos e graxas, tensão elétrica, turbidez, volume de lodo
4ª	1ª	Bruta, 3, 4, 5	Emulsão	3, 4, 5	2 3 4 5	- - 2 2,5	Boro, condutividade, cor, óleos e graxas, peso do eletrodo, pH, tensão elétrica, turbidez, volume de lodo

2.3.2.2. Medição de boro

O elemento boro, um semi-metal, é encontrado em água de produção sob a forma de borato (BO_2^-), a níveis acima de 20mg/L, e tem seu descarte limitado em 5 mg/L, segundo CONAMA 357/05.

O boro é difícil de ser removido como uma forma de-ionizada de ácido bórico, em pH abaixo de 9,5, porém pode ser removido da água produzida com precipitação em pH mais alto (Nascimento *et al*).

As amostras para análise de boro foram coletadas e condicionadas em ácido nítrico, com pH = 2. O elemento boro foi medido por espectrometria de emissão óptica com fonte de plasma, com introdução de amostra usando nebulizador pneumático concêntrico (tipo Mira Mist) e câmara ciclônica, nas amostras brutas e tratadas. A quantificação foi realizada em linha analítica de 249,773 nm e correção do fundo em comprimento de onda adjacente (249,747 nm). Foi realizada calibração externa com curva de cinco pontos, através de soluções-padrão obtidas a partir de diluições do padrão de 1000 mg/L para 2, 10 e 20 mg/L.

2.3.2.3. Medição da condutividade

A condutividade do efluente líquido, ou seja, a capacidade de conduzir corrente elétrica deverá ser diretamente proporcional à quantidade de íons condutores presentes no meio (Cerqueira, 2006).

A medição de condutividade foi realizada nas amostras brutas e eletrofloculadas. Foi necessária a diluição das amostras em 10 vezes, em função da alta condutividade das amostras ultrapassar o limite de leitura do equipamento. Foi realizada calibração do equipamento a cada lote, com respectiva solução padrão, segundo metodologia indicada no próprio equipamento.

2.3.2.4. Medição de cor

A cor, obtida através da absorbância (absorvância ou absorvência), é a capacidade intrínseca dos materiais em absorver radiações em frequência específica. Em espectroscopia, a absorbância (A) é definida como

$$A_{\lambda} = -\log_{10}\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

onde I é a intensidade da luz com um comprimento de onda específico (λ) e que é passada por uma amostra (intensidade da luz transmitida) e I_0 é a intensidade da luz antes que entre na amostra (intensidade da luz incidente).

A medição da remoção de cor foi realizada através da absorbância das amostras, brutas e eletrofloculadas, em um espectrofotômetro, no comprimento de onda de 400nm no UV-visível. Todas as amostras foram lidas em triplicata. Assim como na condutividade, foi realizada calibração do equipamento, sendo utilizada a água como branco, a cada lote, seguindo metodologia indicada no próprio equipamento.

2.3.2.5. Medição de óleos e graxas

Esta nomenclatura é utilizada para nomear as substâncias de característica oleosa, presentes nos diversos tipos de efluentes. Possuem efeito danoso ao meio aquático, em função de suas características e quantidades, e, segundo CONAMA 357/05, seu limite para descarte em meio aquático é de 20 mg/L.

A medição do teor de óleos e graxas (TOG) foi inicialmente experimentada, sem sucesso, com os solventes hexano e clorofórmio. Em função disso, foi selecionado novo solvente, o Horiba S-316, uma solução de cloro-flúor-carbonos, para todos os demais ensaios, conforme descrito abaixo.

O TOG foi medido, nas amostras brutas e eletrofloculadas, através da extração pelo Horiba em funil de decantação. Foram utilizados 100mL de solvente

para extração de cada amostra, em 3 etapas (40 mL, 30 mL e 30 mL). Foi utilizado sulfato de cálcio no papel de filtro para evitar contaminação da fase solvente pela água. A fase solvente, contendo óleos e graxas, foi quantificada por espectrometria de infravermelho. O equipamento foi calibrado, com solução específica, a cada teste.

2.3.2.6. Medição do peso do eletrodo

O peso do eletrodo foi medido em balança analítica na última etapa, para qualificar e quantificar o desgaste do eletrodo de alumínio.

2.3.2.7. Medição de pH

A medição do pH, nas amostras brutas e eletrofloculadas, foi feita com medidor de pH. Foi realizada calibração do equipamento a cada lote, com soluções tampão padrões, seguindo metodologia indicada no próprio equipamento.

2.3.2.8. Medição da tensão elétrica

A tensão elétrica, coloquialmente denominada voltagem, é a diferença de potencial elétrico entre dois pontos.

Foi medida para cada amostra eletrofloculada, em função dos respectivos tempos de reação, não tendo, assim, valores para as amostras brutas.

2.3.2.9. Medição de turbidez

Assim como o pH, a turbidez foi medida nas amostras brutas e tratadas. Fez-se a calibração do turbidímetro, com respectivos padrões, para cada lote de amostra.

Decorre da presença de partículas em suspensão ou em forma coloidal dispersas no efluente. A presença destas suspensões provoca a difração e a absorção de luz, dando uma aparência turva e indesejável ao efluente. O aumento da turbidez reduz a zona eufótica, que é a zona de luz onde a fotossíntese ainda é possível de ocorrer (Cerqueira, 2006).

2.3.2.10. Medição do volume de lodo decantado

As amostras eletrofloculadas foram colocadas em funil de decantação, o lodo foi decantado e, em seguida, drenado para proveta de 1L, onde o volume de lodo foi lido. O tempo médio de decantação das amostras foi medido em 50 minutos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste estudo foi utilizado efluente de água de produção de plataforma de petróleo, proveniente da estação de tratamento do Terminal Aquaviário de São Sebastião (SP).

3.1. Primeira etapa

Nesta etapa, foram realizadas duas repetições para cada ensaio estabelecido na Tabela 4, sendo analisadas a amostra bruta de água de produção e cinco respectivas amostras tratadas por eletrofloculação. A intensidade de corrente da célula eletrolítica foi variada de 1 – 5 A, para cada amostra. O tempo dos ensaios variou de 5 – 15 min, para cada uma das cinco amostras, e em função das cinco intensidades de corrente aplicadas, sendo o tempo de inversão da polaridade do eletrodo proporcional aos respectivos tempos totais de eletrofloculação.

Essa etapa foi considerada exploratória, isto é, para conhecimento do equipamento, dos processos e das análises dos parâmetros. Seus resultados podem não refletir a realidade, em comparação aos resultados das demais etapas. Porém, tais resultados e parâmetros de processo e sua respectiva análise nortearam o planejamento e execução das etapas seguintes.

3.1.1. Caracterização do efluente bruto

As maiores variações foram observadas na turbidez e na cor, as quais podem ser explicadas em função dos diferentes dias de análise, ao longo de um mês, e prováveis transformações no efluente bruto, bem como nos procedimentos de eletrofloculação (Tabela 5).

Os parâmetros condutividade e pH tiveram valores próximos em ambas as repetições.

Tabela 5 – Características do efluente bruto, 1ª etapa.

Parâmetros	Faixa de valores	
	Teste 1	Teste 2
Condutividade (mS/cm)	152,1 – 162,3	137,0 – 145,3
Cor (Abs 400nm)	0,195 – 0,320	0,161 – 0,422
pH	6,8 – 7,5	7,0 – 7,4
Turbidez (NTU)	22,7 – 69,1	8,1 – 401,0

3.1.2. Caracterização do efluente eletrofloculado

Na etapa 1, a caracterização do efluente eletrofloculado deu-se através dos mesmos parâmetros descritos para o efluente bruto, além do controle da tensão elétrica em cada eletrofloculação.

3.1.2.1. Condutividade

Como descrito acima, a etapa foi realizada em duplicata. Os resultados de condutividade do efluente bruto e dos eletrofloculados nas diferentes condições são apresentados nos Gráficos 1 e 2.

Após eletrofloculação, a condutividade do 1º teste mostrou-se constante, com pequenas variações, porém em valores elevados, em função da alta salinidade do efluente, a água de produção. Em relação às amostras brutas, pouca redução foi observada nas amostras tratadas. Isso pode ser atribuído à constante formação de sais ao longo do processo de eletrofloculação, por exemplo, de bário, cálcio, magnésio e outros metais presentes na água de produção, promovendo a manutenção da salinidade das amostras. A maior variação pôde ser observada em t = 15 min.

Na condutividade do 2º teste, os valores são menores para as maiores intensidades de corrente (4A e 5A), provavelmente em função da diminuição dos íons presentes, seja de Al^{3+} ou da matéria orgânica oxidada.

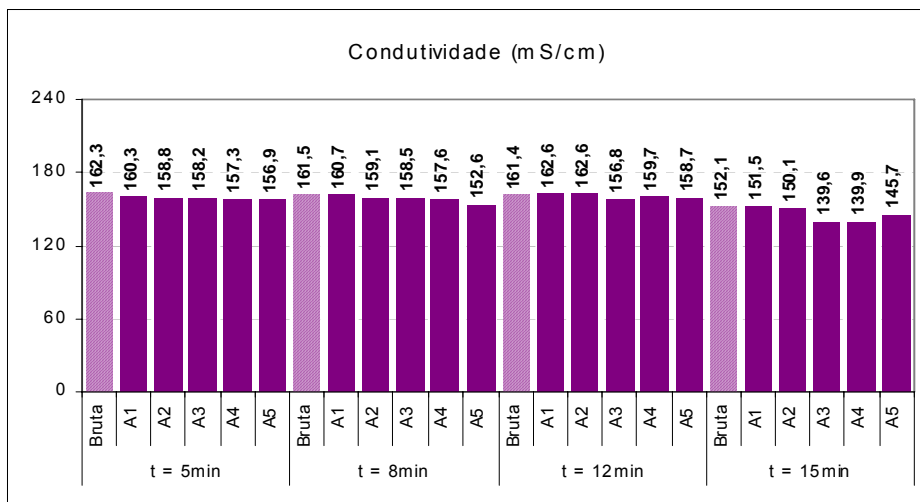


Gráfico 1 – Comportamento da condutividade do efluente bruto e eletrofloculado, 1º teste.

Intensidade de corrente nas amostras: A1 = 1A, A2 = 2A, A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

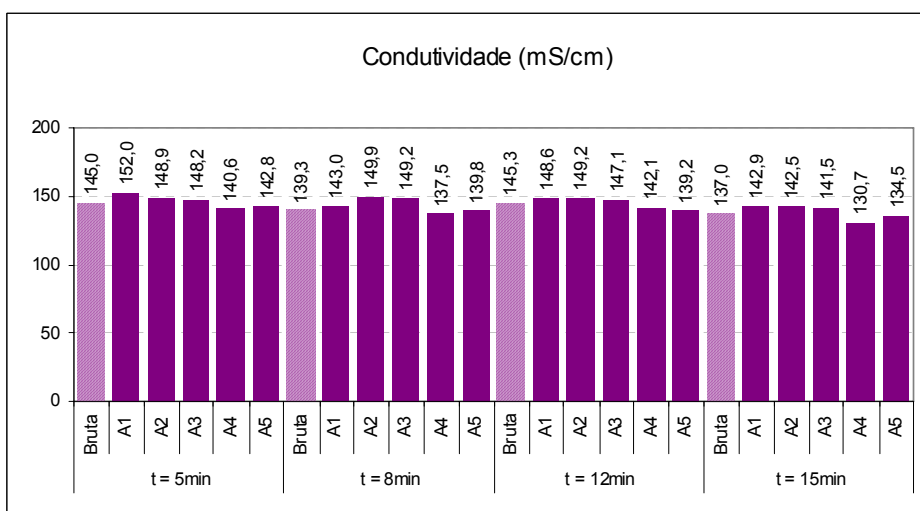


Gráfico 2 – Comportamento da condutividade do efluente bruto e eletrofloculado, 2º teste.

Intensidade de corrente nas amostras: A1 = 1A, A2 = 2A, A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

3.1.2.2. Cor

Os resultados das medições de cor do efluente bruto e dos eletrofloculados, nas diferentes condições, e seus percentuais de remoção são apresentados nos Gráficos 3 e 4.

A variação de cor foi verificada de maneira irregular nas amostras brutas e eletrofloculadas de ambos os testes. Pode-se sugerir a provável influência da oxidação dos parafusos do eletrodo, compostos de material ferroso, para as amostras eletrofloculadas. Para as amostras brutas, é possível que as transformações no efluente bruto ocorridas entre as análises, como oxidação de matéria orgânica, tenha influência na cor.

A Figura 19 mostra os parafusos de ferro do eletrodo utilizado nos testes e sua coloração amarelada.

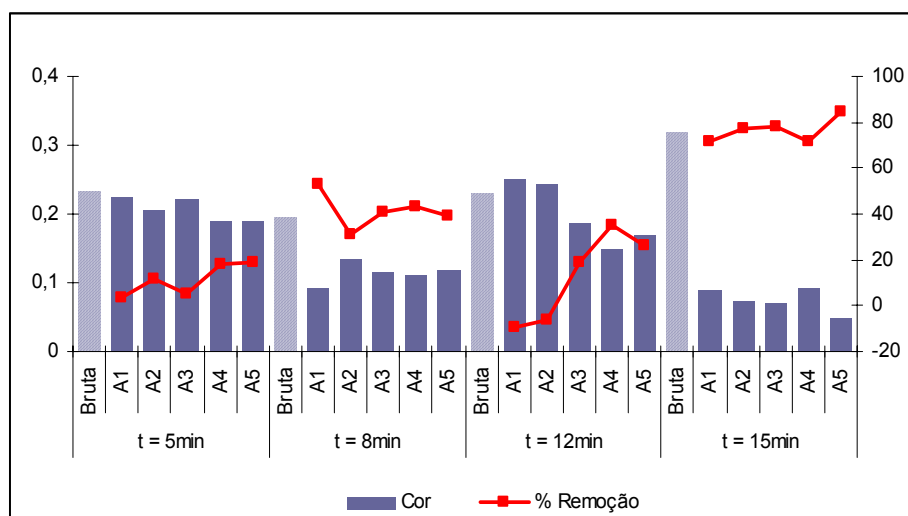


Gráfico 3 – Remoção de cor do efluente bruto e eletrofloculado, 1º teste.

Intensidade de corrente nas amostras: A1 = 1A, A2 = 2A, A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

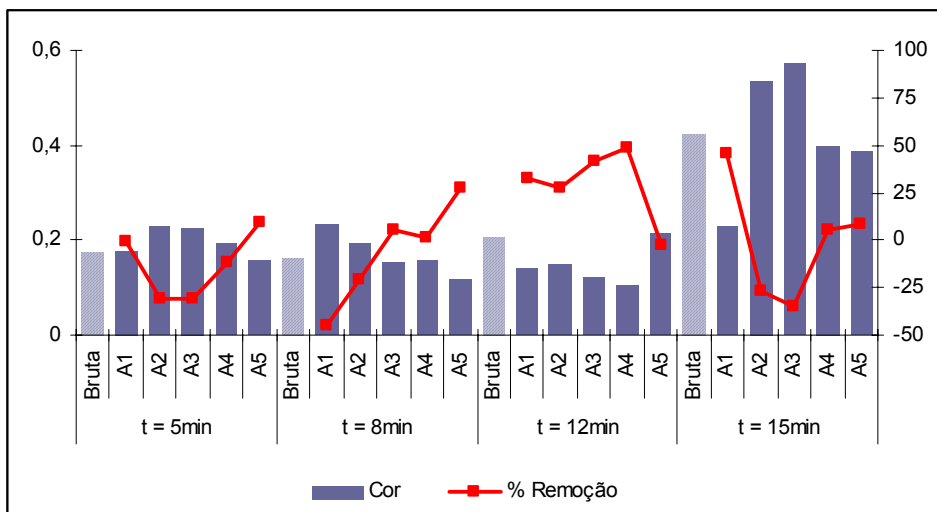


Gráfico 4 – Remoção de cor do efluente bruto e eletrofloculado, 2º teste.
 Intensidade de corrente nas amostras: A1 = 1A, A2 = 2A, A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

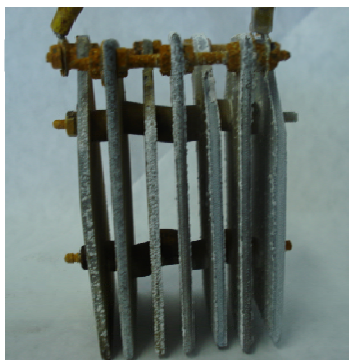


Figura 19 – Eletrodo utilizado e parafusos de ferro.

3.1.2.3. pH

Os resultados de pH do efluente bruto e dos eletrofloculados nas diferentes condições são apresentados nos Gráficos 5 e 6.

No primeiro teste, o pH das amostras brutas apresentou maior variação em relação ao teste 2, possivelmente em função da diferença dos instrumentos utilizados para medição e das modificações ocorridas no efluente ao longo do mês dos testes.

O pH foi constante para $t = 5$ min, em função de sua medição ter-se dado por papel indicador, sem uso de um medidor de pH e, portanto, sem precisão. Nas demais medições, foi utilizado um medidor de pH e pôde-se observar pequena variação em comparação com as amostras brutas. A medida que a eletrofloculação ocorre, o pH tende à alcalinidade, em função da formação de bolhas de H_2 que ajudarão na flotação e, conseqüentemente, da menor quantidade de H^+_3O no meio e maior de hidróxido de alumínio (Ma e Wang, 2005).

No 2º teste o pH apresentou-se constante para os três primeiros tempos e teve pequena variação em $t = 15$ min. Como ocorrido no 1º teste, o pH também não cresceu à medida que a eletrofloculação aconteceu. Pode-se sugerir que a liberação de H_2 não foi suficiente para favorecer a flotação e, conseqüentemente, maior quantidade de H^+_3O ficou no meio, tornando o pH levemente ácido. Tal fato também pode explicar os altos valores de cor para $t = 15$ min, uma vez que a floculação não foi ótima.

Nessa faixa de pH, de 6,4 – 7,5, as espécies de alumínio mais prováveis de estarem no meio são $Al(OH)_2^+$ e $Al_2(OH)_2^{4+}$.

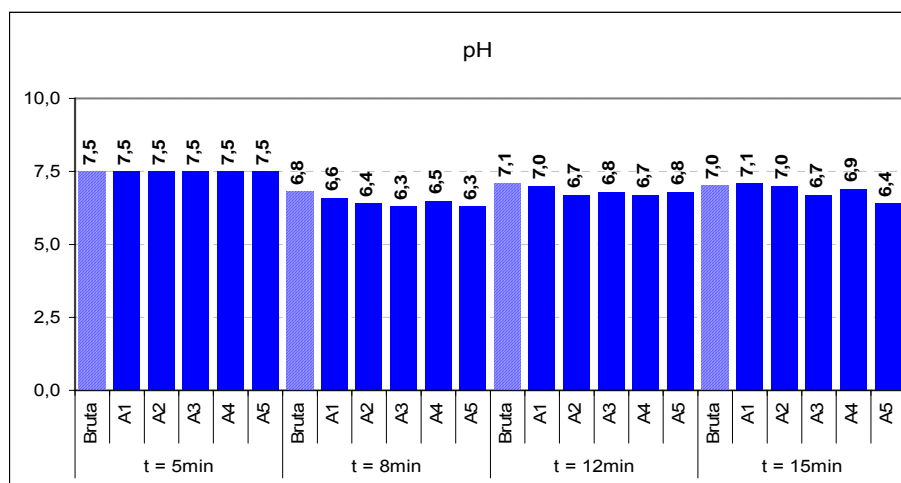


Gráfico 5 – Comportamento do pH do efluente bruto e eletrofloculado, 1º teste.
Intensidade de corrente nas amostras: A1 = 1A, A2 = 2A, A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

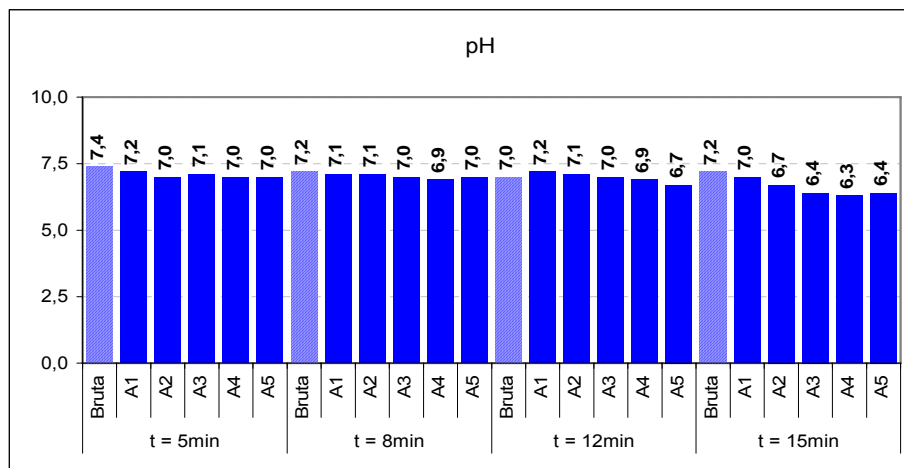


Gráfico 6 – Comportamento do pH do efluente bruto e eletrofloculado, 2º teste. Intensidade de corrente nas amostras: A1 = 1A, A2 = 2A, A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

3.1.2.4. Turbidez

Os resultados das medições de turbidez do efluente bruto e dos eletrofloculados, nas diferentes condições, e seus percentuais de remoção são apresentados nos Gráficos 7 e 8.

A turbidez está diretamente ligada ao pH, em função da liberação de H_2 e melhoria na flotação, da diminuição de H^+_3O e aumento de $Al(OH)_3$. Esses três parâmetros contribuem para a floculação e flotação, tendendo a reduzir a turbidez do efluente eletrofloculado. A concentração de óleo também influencia na turbidez, em função da maior dificuldade da floculação quando a carga oleosa é alta. A remoção de turbidez será mais eficiente quanto maior for o controle de ambos os parâmetros (Mostefa e Tir, 2004).

Em ambos os testes, a turbidez variou de forma aleatória, sendo os valores das amostras eletrofloculadas maiores que os das amostras brutas. Pode-se sugerir ineficiência na floculação e flotação e resíduos de sólidos em suspensão nas amostras eletrofloculadas, além da falta de controle sobre os demais parâmetros do processo.

No 2º teste, em $t = 5$ min, a turbidez teve comportamento diferente, obtendo-se valores de turbidez nas amostras eletrofloculadas muito próximos ao da amostra bruta, não apresentando coerência com os demais resultados.

O Gráfico 8 mostra a baixa performance do teste através da escala do percentual de remoção, sendo apresentada entre 500% e -2000%.

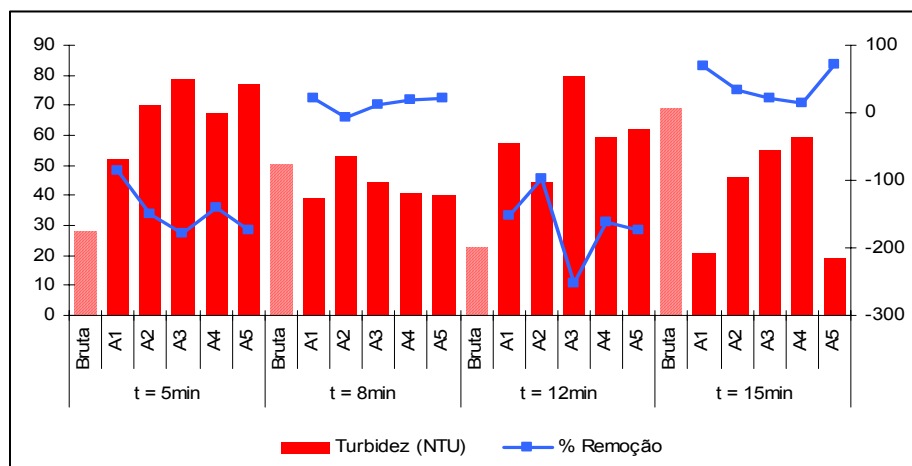


Gráfico 7 – Remoção da turbidez do efluente bruto e dos eletrofloculados, 1º teste. Intensidade de corrente nas amostras: A1 = 1A, A2 = 2A, A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

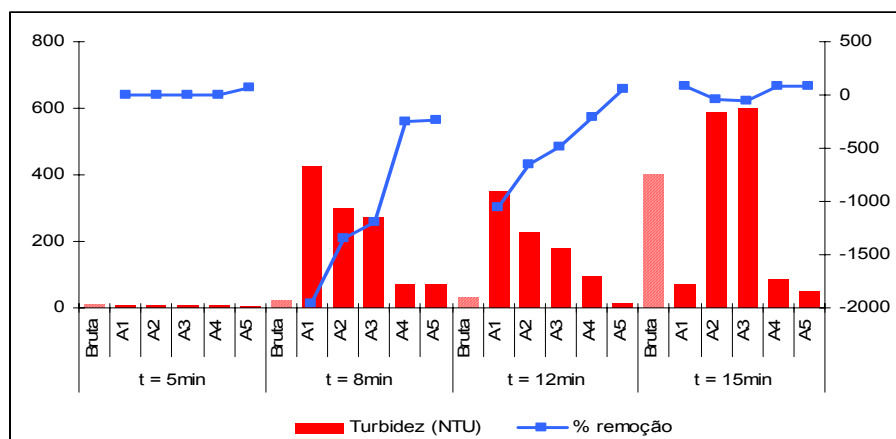


Gráfico 8 – Remoção da turbidez do efluente bruto e dos eletrofloculados, 2º teste. Intensidade de corrente nas amostras: A1 = 1A, A2 = 2A, A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

3.1.2.5. Tensão elétrica

Os resultados de tensão elétrica dos efluentes eletrofloculados nas diferentes condições são apresentados nos Gráficos 9 e 10.

A tensão elétrica varia proporcionalmente com a intensidade de corrente. No primeiro teste foi mais linear em $t = 12$ min e no segundo em $t = 8$ min, possivelmente em função do maior controle dos parâmetros do processo.

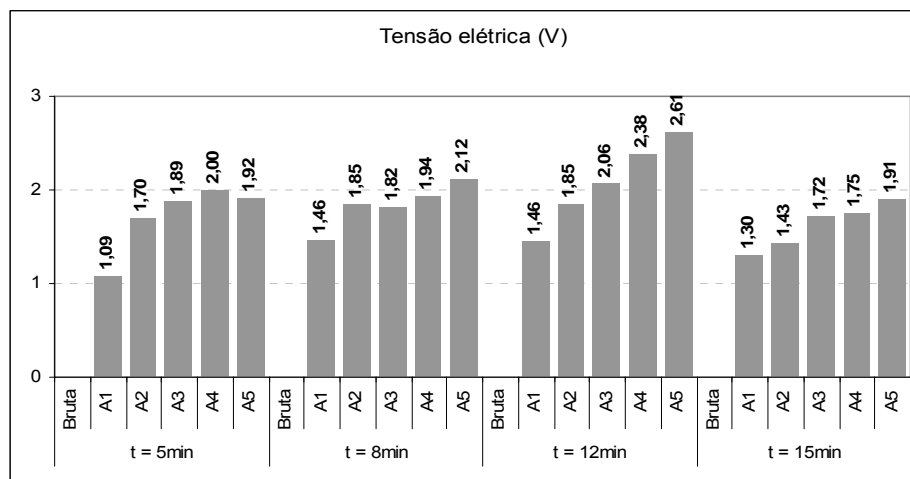


Gráfico 9 – Comportamento da tensão elétrica dos efluentes eletrofloculados, 1º teste.

Intensidade de corrente nas amostras: A1 = 1A, A2 = 2A, A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

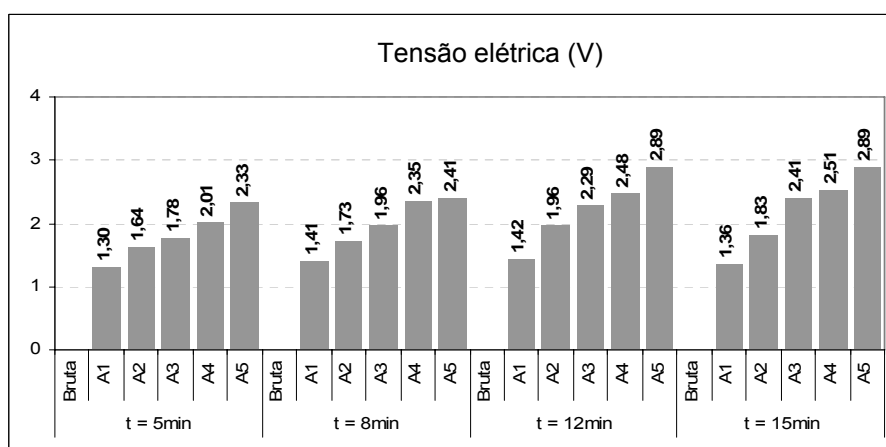


Gráfico 10 – Comportamento da tensão elétrica dos efluentes eletrofloculados, 2º teste.

Intensidade de corrente nas amostras: A1 = 1A, A2 = 2A, A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

3.2. Segunda etapa

Nesta etapa, também foram realizadas duas repetições para cada ensaio, conforme Tabela 4, sendo analisadas a amostra bruta de água de produção e três respectivas amostras tratadas por eletrofloculação. A intensidade de corrente da célula eletrolítica foi variada de 3 – 5 A, para cada amostra. O tempo dos ensaios variou de 2 – 5 min, para cada uma das três amostras, e em função das três intensidades de corrente aplicadas, sendo a inversão da polaridade do eletrodo realizada em 4 e 5 min, proporcional aos respectivos tempos totais de eletrofloculação.

Após testar os equipamentos e metodologias na etapa 1, novos parâmetros foram sugeridos para análise na etapa 2, a fim de caracterizar mais detalhadamente o efluente em estudo. Os parâmetros pH, cor e condutividade, por terem tido comportamento linear na etapa anterior, não foram contemplados nessa nova etapa. Apenas a turbidez, devido às constantes variações, foi mantida para análise.

Também foram alterados os tempos de eletrofloculação, que na etapa 1 eram de 5, 8, 12 e 15 min e, na etapa 2, passaram para 2, 3, 4 e 5 min, em função de menor consumo de energia e menor desgaste do eletrodo.

3.2.1. Caracterização do efluente bruto

A maior variação foi observada na turbidez, possivelmente em função das transformações no efluente bruto, uma vez que as análises foram realizadas em dois dias diferentes, ao longo de um mês. O parâmetro boro foi analisado de uma só vez para todas as amostras, minimizando e/ou excluindo alterações no efluente, e por isso não há faixa de valores. O mesmo aconteceu no teste 2, para os quatro tempos em estudo (Tabela 6).

No teste 1, os ensaios de óleos e graxas, para efluente bruto e eletrofloculado, foram realizados inicialmente com hexano, para $t = 2$ min, $t = 3$ min e $t = 4$ min, e depois com clorofórmio, em $t = 5$ min.

Os resultados apresentaram baixa remoção, não sendo satisfatórios, possivelmente em função da diluição do efluente, e conseqüentemente baixa quantidade de óleos e graxas, e da sensibilidade de detecção do método estar acima deste limite. A partir do 2º teste, foi utilizado o solvente Horiba, em função dos resultados obtidos com hexano e clorofórmio no teste 1.

Ainda sobre o teor de óleos e graxas e seus baixos valores, há ainda a possibilidade da coleta do efluente ter sido realizada em outro local que não o tanque agueiro, o que pode explicar a diluição.

Tabela 6 – Características do efluente bruto, 2ª etapa.

Parâmetros	Faixa de valores	
	Teste 1	Teste 2
Boro (mg/L)	19	19,9
Óleos e graxas (mg/L)	0,61 – 0,69	9,7
Turbidez (NTU)	667,7 – 711,0	839,3

3.2.2. Caracterização do efluente eletroflorado

Nesta etapa, realizada em duplicata, a caracterização do efluente eletroflorado foi realizada através dos três parâmetros descritos para o efluente bruto, além da análise do volume de lodo decantado e do controle da tensão elétrica, obtida em cada eletrofloração.

3.2.2.1. Boro

Os resultados da análise de boro do efluente bruto e dos eletroflorados nas diferentes condições são apresentados nos Gráficos 11 e 12.

No primeiro teste, o percentual de remoção de boro chegou a 5,6% para a A4, em $t = 3$ min, mas foi negativo em algumas amostras. No segundo, o percentual chegou a 14,3% para a A5, em $t = 4$ min, mas continuou baixo para as demais e A3, $t = 2$ min. Tal fato pode ser explicado pela alta condutividade do efluente e pelo pH em torno da faixa neutra, conforme visto na 1ª etapa, o que diminui a remoção da substância, apesar da alta quantidade de boro na amostra bruta.

O valor de 17,1 mg/L ainda restringe o descarte do efluente, segundo CONAMA 357/05, que permite até 5,0 mg/L para descarte em água salgada.

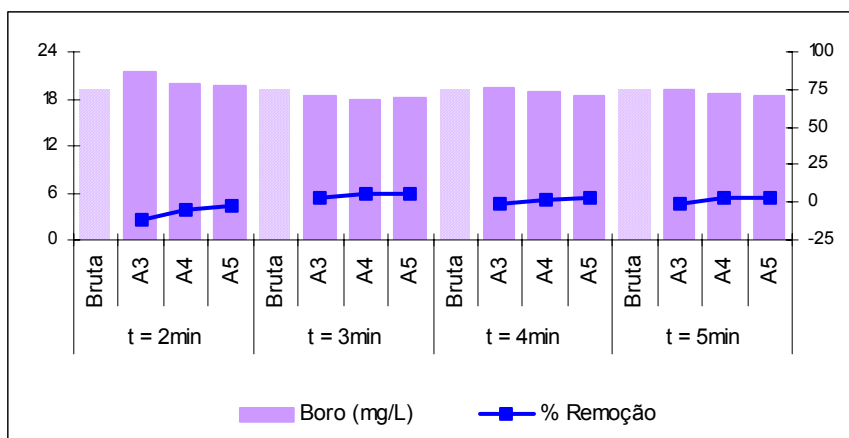


Gráfico 11 – Remoção de boro do efluente bruto e dos eletrofloculados, 1º teste.

Intensidade de corrente nas amostras: A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

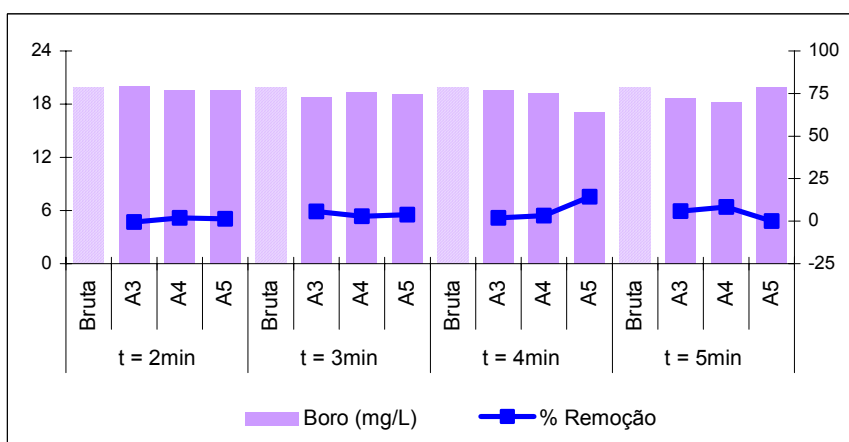


Gráfico 12 – Remoção de boro do efluente bruto e dos eletrofloculados, 2º teste.

Intensidade de corrente nas amostras: A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

Estudo de Yilmaz *et al.* (2005) para remoção de boro por eletrocoagulação testou amostras de 100, 250, 500 e 1000 mg/L de boro e obteve melhor resultado para 100 mg/L, em pH = 8, com efluente de baixa condutividade. Nesta etapa, o pH não foi medido, porém, para fins comparativos, a faixa de valores obtida na etapa 1 (6,4 – 7,5) pode servir de referência para essa etapa, uma vez que o efluente possui a mesma procedência.

3.2.2.2. Óleos e Graxas

Os resultados da análise de óleos e graxas do efluente bruto e dos eletrofloculados nas diferentes condições são apresentados nos Gráficos 13 e 14.

O teste 1 comportou-se como experimental para os ensaios de óleos e graxas, uma vez que foram utilizados dois solventes (hexano e clorofórmio), ambos sem sucesso, conforme descrito no item 4.2.1.

O hexano foi usado para $t = 2$ min e $t = 3$ min e o clorofórmio para $t = 5$ min. O ensaio não foi realizado para $t = 4$ min, quando optou-se pela utilização do clorofórmio em $t = 5$ min, a fim de ter maior tempo de eletrofloculação e, possivelmente, maior floculação e maior extração de óleos e graxas. A extração com clorofórmio foi superior a do hexano, porém o percentual de remoção de óleos e graxas não foi satisfatório.

No teste 2, com Horiba, o percentual de remoção atinge 32,7%, em A5 e $t = 3$ min, porém ainda muito distantes dos valores encontrados na literatura, onde as remoções de substâncias oleosas chegam a 97,7% (Rubach e Saur, 1997) e 99% (Mostefa e Tir, 2004), para concentrações iniciais de óleos e graxas muito maiores quando comparadas ao efluente em estudo neste trabalho.

Quanto maior for a concentração de óleo, maior será o tempo de eletrofloculação necessário para melhor remoção de óleos e graxas. Esse tempo pode ser diminuído se maior intensidade de corrente for aplicada (Bensadok *et al.*, 2008).

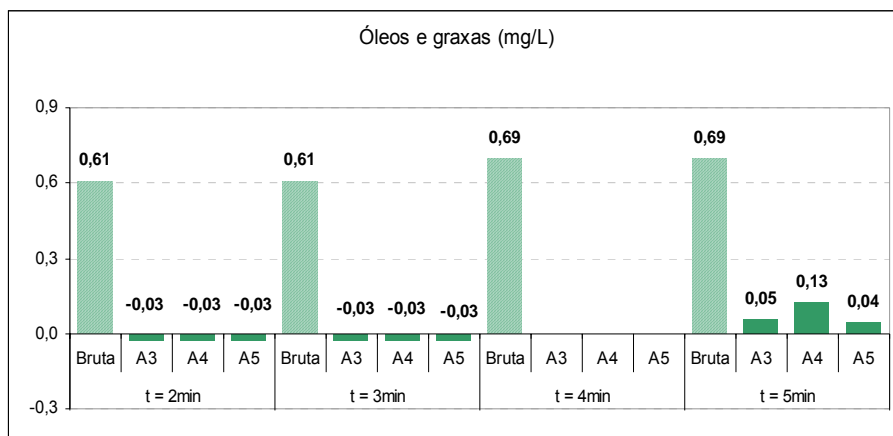


Gráfico 13 – Remoção de óleos e graxas do efluente bruto e dos eletrofloculados, 1º teste.

Intensidade de corrente nas amostras: A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

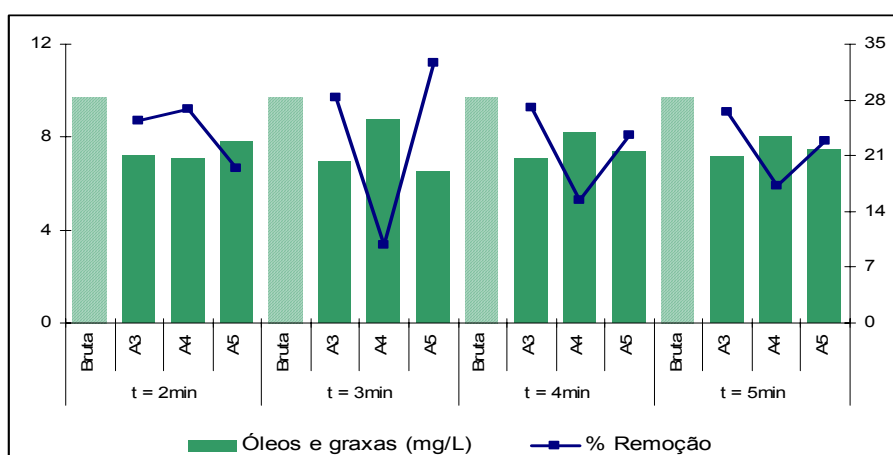


Gráfico 14 – Remoção de óleos e graxas do efluente bruto e dos eletrofloculados, 2º teste.

Intensidade de corrente nas amostras: A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

3.2.2.3. Tensão elétrica

Os resultados de tensão elétrica dos efluentes eletrofloculados nas diferentes condições são apresentados nos Gráficos 15 e 16.

No primeiro teste, as amostras A5, em $t = 2$ min e $t = 3$ min, sofreram grandes alterações ao longo das eletrofloculações, com difícil controle da tensão, o que pode

ajudar a explicar a maior turbidez observada nessas amostras em relação às demais, em função da não realização de boa floculação e, conseqüente, maior quantidade de sólidos em suspensão na amostra eletrofloculada.

No teste 2, a tensão se comportou de maneira uniforme para todos os tempos. Quando a condutividade do efluente é alta, pode-se utilizar baixa tensão durante a eletrofloculação, pois os íons presentes facilitam a eletrofloculação, contribuindo para a liberação de H_2 e formação de $Al(OH)_3$ (Rubach e Saur, 1997).

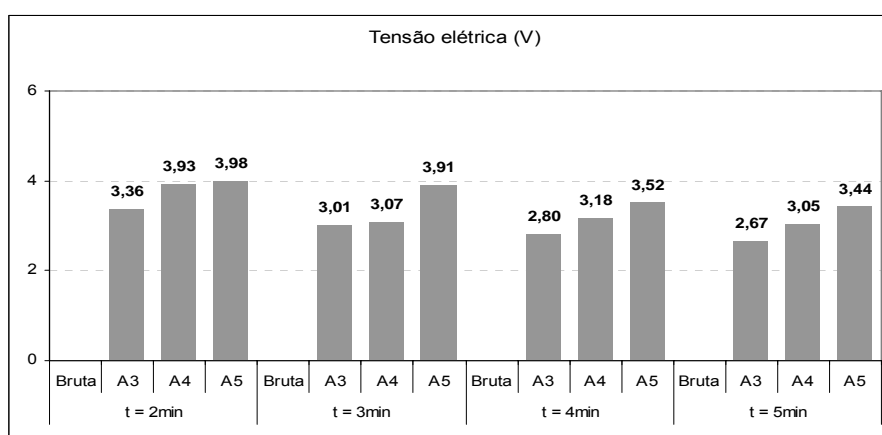


Gráfico 15 – Comportamento da tensão elétrica dos efluentes eletrofloculados, 1º teste.

Intensidade de corrente nas amostras: A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

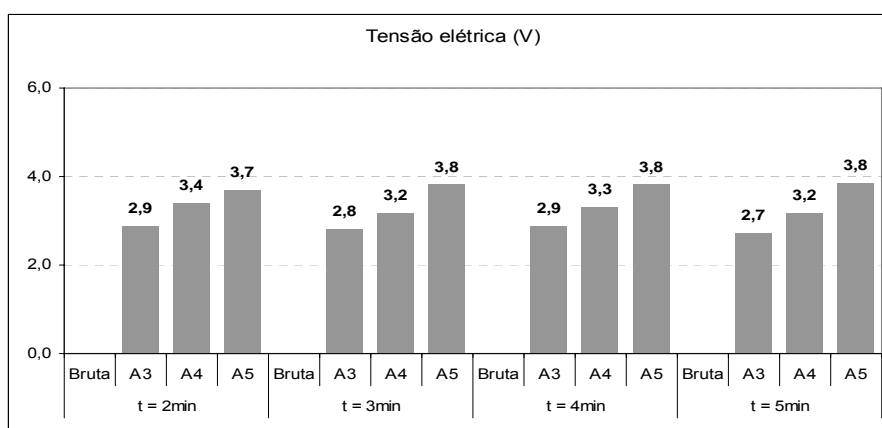


Gráfico 16 – Comportamento da tensão elétrica dos efluentes eletrofloculados, 2º teste.

Intensidade de corrente nas amostras: A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

3.2.2.4. Turbidez

Os resultados de turbidez do efluente bruto e dos eletrofloculados nas diferentes condições são apresentados nos Gráficos 17 e 18.

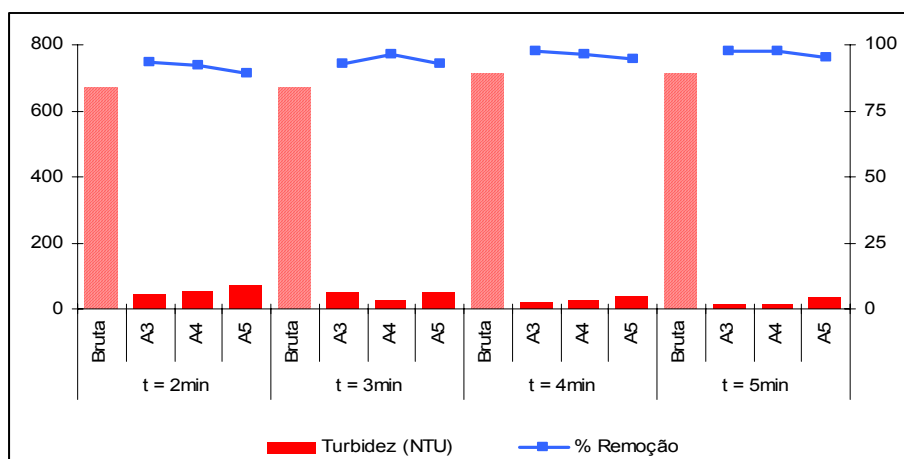


Gráfico 17 – Remoção da turbidez do efluente bruto e dos eletrofloculados, 1º teste.
Intensidade de corrente nas amostras: A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

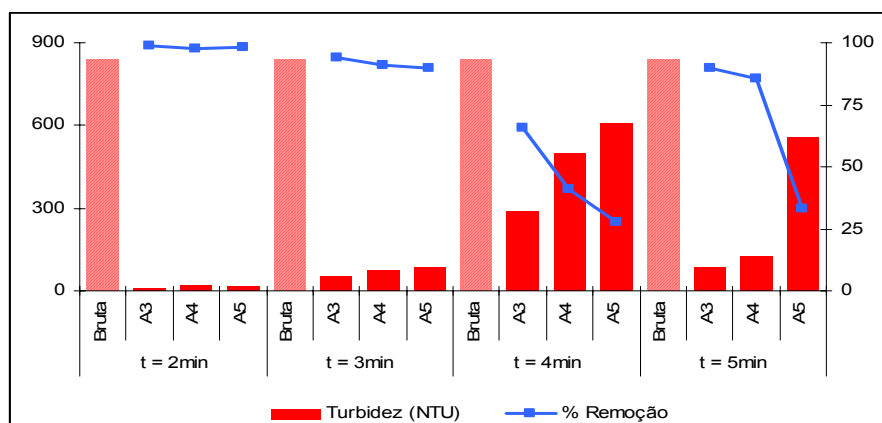


Gráfico 18 – Remoção da turbidez do efluente bruto e dos eletrofloculados, 2º teste.
Intensidade de corrente nas amostras: A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

No teste 1, a remoção de turbidez foi satisfatória, com percentual de remoção em 97,9% na A4, em t = 5 min. Em t = 2 min e t = 3 min, as eletrofloculações

aconteceram acompanhadas pela formação de lodo bastante preto, o que pode explicar a maior turbidez nessas amostras, em relação a $t = 4$ min e $t = 5$ min.

No teste 2, a alta quantidade de sólido em suspensão após eletrofloculação pode explicar a alta turbidez em $t = 4$ min e $t = 5$ min. Nas amostras de $t = 2$ min, onde foram obtidos os melhores resultados, o percentual de remoção de turbidez alcançou 98,6%, em A3. A boa floculação, seguida da flotação, removendo os sólidos particulados do meio, pode explicar os bons resultados.

3.2.2.5. Volume de lodo decantado

Os resultados de volume de lodo decantado dos efluentes eletrofloculados nas diferentes condições são apresentados nos Gráficos 19 e 20.

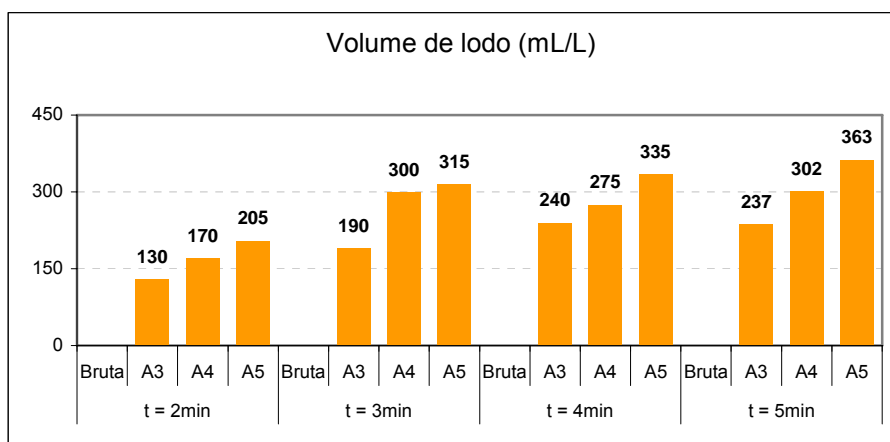


Gráfico 19 – Evolução do volume de lodo decantado dos efluentes eletrofloculados, 1º teste.

Intensidade de corrente nas amostras: A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

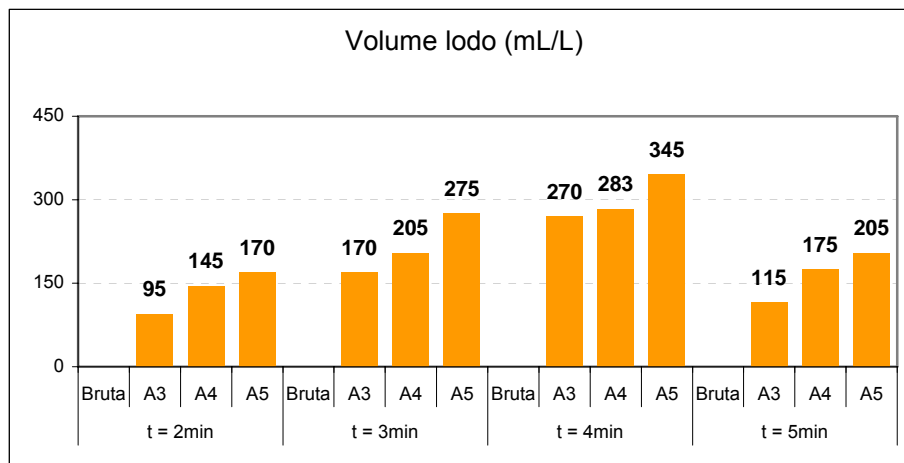


Gráfico 20 – Evolução do volume de lodo decantado dos efluentes eletrofloculados, 2º teste.

Intensidade de corrente nas amostras: A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

O volume de lodo decantado está diretamente relacionado ao tempo de eletrofloculação, pois, quanto maior o tempo, maior é a floculação e maior será a quantidade de lodo formado. Também está relacionado à intensidade de corrente aplicada, a qual também contribui para a formação dos flocos e a flotação.

O reator eletrolítico possuía capacidade de 1L, sendo o volume real utilizado nos testes de 800mL.

No teste 2, os valores para t = 5 min ficaram muito abaixo do esperado, pois o tempo de decantação para esse conjunto de amostras foi bastante superior ao estabelecido para as demais (24h), que utilizaram 50 min.

3.3. Terceira etapa

Nesta etapa, também foram realizadas duas repetições para cada ensaio, conforme Tabela 4, sendo analisadas a amostra bruta de água de produção e três respectivas amostras tratadas por eletrofloculação. A intensidade de corrente da célula eletrolítica foi variada de 3 – 5 A, para cada amostra. O tempo dos ensaios variou de 2 – 5 min, para cada uma das três amostras, e em função das três intensidades de corrente aplicadas, sendo a inversão da polaridade do eletrodo

realizada apenas em 4 e 5 min, proporcional aos respectivos tempos totais de eletrofloculação.

A diferença dessa etapa para a anterior está nos parâmetros analisados. Para melhor análise dos resultados do teor de óleos e graxas, foram novamente analisados os parâmetros cor, condutividade e pH, além da continuidade de análise da turbidez e do volume de lodo decantado e retirada da análise de boro.

Os tempos de eletrofloculação e as intensidades de corrente utilizadas continuaram como na etapa 2, em 2, 3, 4 e 5 min e 3, 4 e 5A.

3.3.1. Caracterização do efluente bruto

Nesta etapa, as análises para os quatro tempos em estudo foram realizadas no mesmo dia. Assim, não há faixa de valores; há apenas um valor para cada parâmetro (Tabela 7).

Esse efluente apresentou maior valor de cor, pH, e óleos e graxas, mas valores menores de condutividade. A turbidez teve maiores variações entre as amostras.

Tabela 7 – Características do efluente bruto, 3ª etapa.

Parâmetros	Valores	
	Teste 1	Teste 2
Cor (Abs 400nm)	0,456	0,385
Condutividade (mS/cm)	86,4	86,3
Óleos e graxas (mg/L)	15,5	15,3
pH	7,7	8,1
Turbidez (NTU)	58,7	86,3

3.3.2. Caracterização do efluente eletrofloculado

Nesta etapa, a caracterização do efluente eletrofloculado foi realizada através dos mesmos parâmetros descritos para o efluente bruto, além da análise do volume de lodo decantado e do controle da tensão elétrica, obtida em cada eletrofloculação.

3.3.2.1. Condutividade

Os resultados de condutividade do efluente bruto e dos eletrofloculados nas diferentes condições são apresentados nos Gráficos 21 e 22.

A condutividade das amostras nesta etapa apresentou valores inferiores aos verificados na etapa 1, possivelmente em função de uma maior diluição da amostra bruta e menor quantidade de sais.

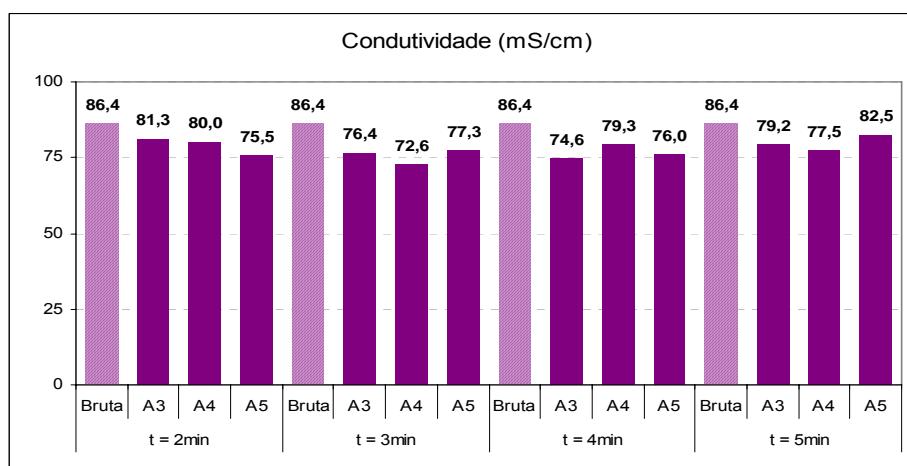


Gráfico 21 – Condutividade do efluente bruto e dos eletrofloculados, 1º teste.

Intensidade de corrente nas amostras: A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

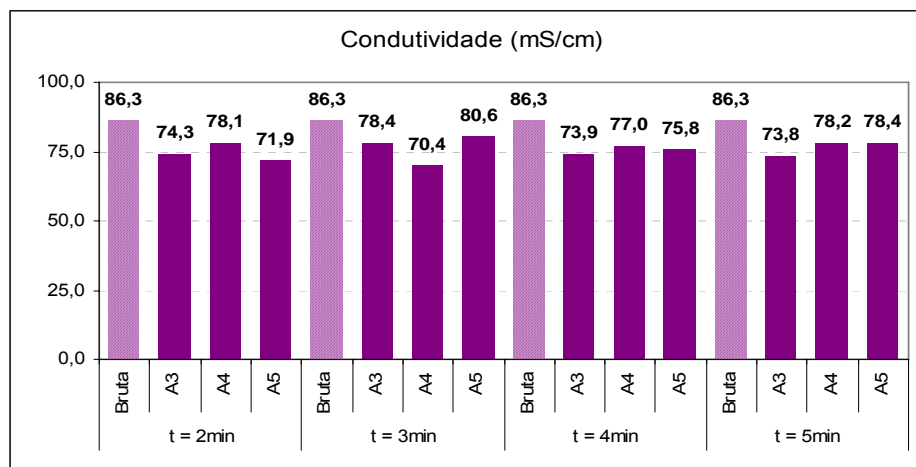


Gráfico 22 – Condutividade do efluente bruto e dos eletrofloculados, 2º teste.
Intensidade de corrente nas amostras: A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

3.3.2.2. Cor

Os resultados de remoção de cor do efluente bruto e dos eletrofloculados nas diferentes condições são apresentados nos Gráficos 23 e 24.

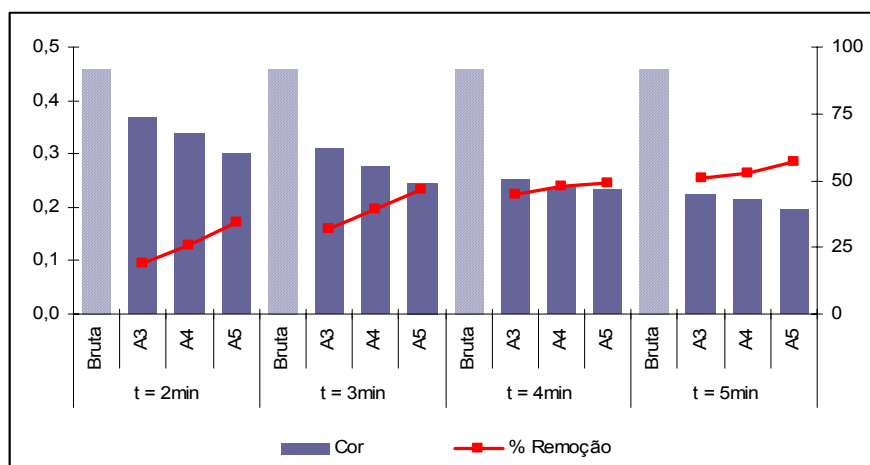


Gráfico 23 – Remoção de cor do efluente bruto e dos eletrofloculados, 1º teste.
Intensidade de corrente nas amostras: A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

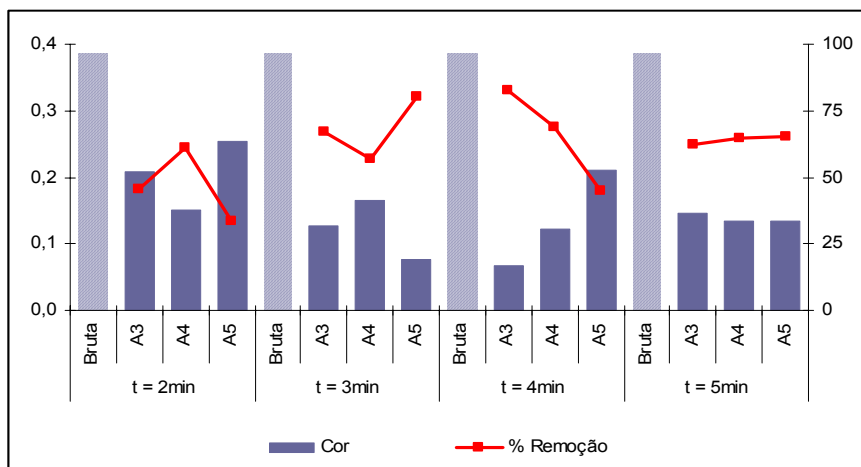


Gráfico 24 – Remoção de cor do efluente bruto e dos eletrofloculados, 2º teste.

Intensidade de corrente nas amostras: A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

A amostra bruta da etapa 3, para ambos os testes, apresentou-se com coloração bastante esverdeada, o que pode explicar o maior valor da cor na amostra bruta em relação às amostras da etapa 1. A remoção de cor do teste 1 foi constante e satisfatória, acompanhando a intensidade de corrente e os tempos de eletrofloculação.

3.3.2.3. Óleos e Graxas

Os resultados de remoção de óleos e graxas do efluente bruto e dos eletrofloculados nas diferentes condições são apresentados nos Gráficos 25 e 26.

No primeiro teste, a remoção de óleos e graxas foi bastante superior à obtida na etapa 2, chegou a 90,2% em A4, t = 2 min. Para A4, também foram obtidos os melhores valores para t = 4 min e t = 5 min, o que pode sugerir a intensidade de corrente de 4A ideal para remoção de óleos e graxas em detrimento à 5A, consideradas as demais condições, em função do melhor controle da tensão elétrica, floculação e flotação.

No teste 2, a remoção de óleos e graxas não foi eficiente em t = 2min, à exceção de A3 que teve o melhor desempenho, com 84%. Tal fato pode ser explicado pelas variações no processo de eletrofloculação e pelo pH menos alcalino

que nos demais tempos, dada maior presença de H^+_3O e menos $Al(OH)_3$ no meio. Para os demais tempos, a remoção foi satisfatória, sendo o maior percentual igual a 85%, em A4 e t = 4 min.

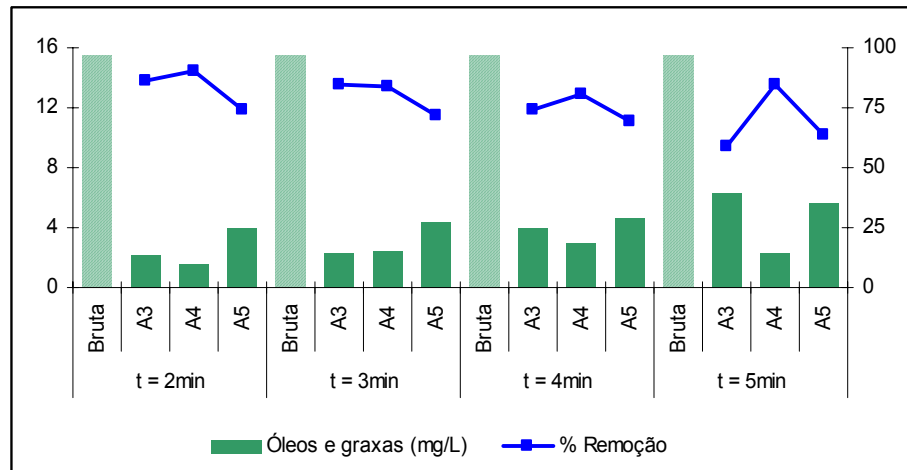


Gráfico 25 – Remoção de óleos e graxas do efluente bruto e dos eletrofloculados, 1º teste.

Intensidade de corrente nas amostras: A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

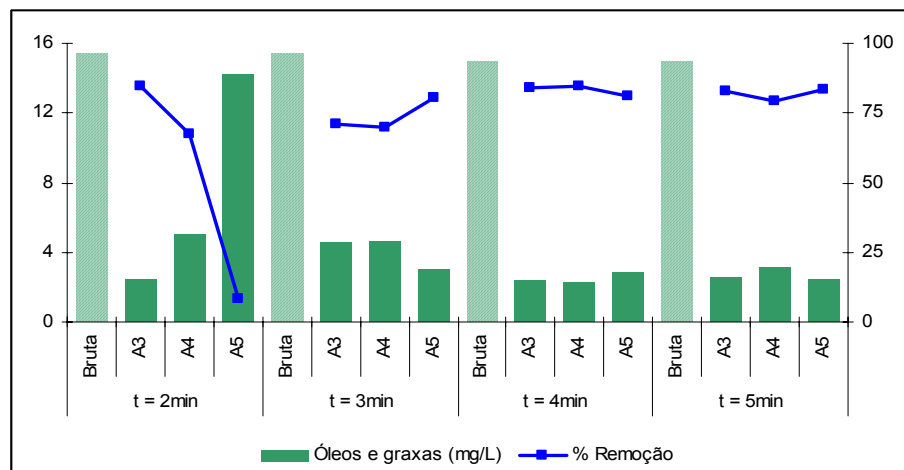


Gráfico 26 – Remoção de óleos e graxas do efluente bruto e dos eletrofloculados, 2º teste.

Intensidade de corrente nas amostras: A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

3.3.2.4. pH

Os resultados de pH do efluente bruto e dos eletrofloculados nas diferentes condições são apresentados nos Gráficos 27 e 28.

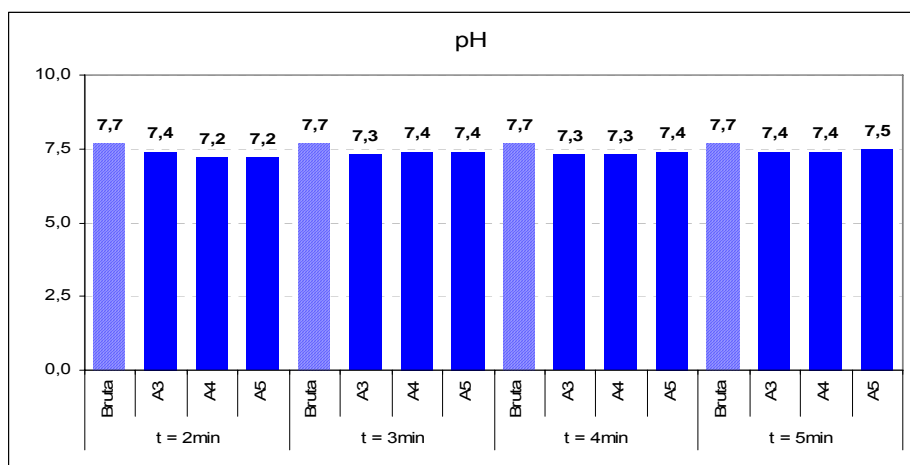


Gráfico 27 – Comportamento do pH do efluente bruto e dos eletrofloculados, 1º teste.

Intensidade de corrente nas amostras: A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

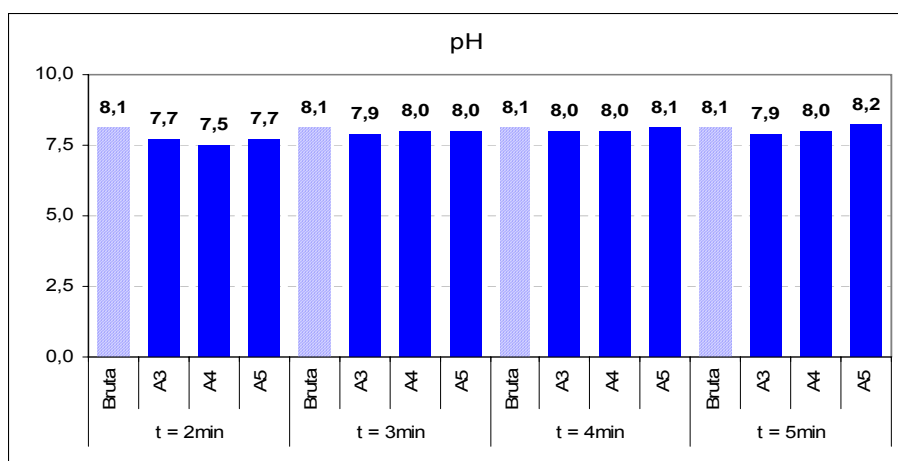


Gráfico 28 – Comportamento do pH do efluente bruto e dos eletrofloculados, 2º teste.

Intensidade de corrente nas amostras: A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

O pH manteve-se constante no teste 1, porém em faixa ligeiramente alcalina, o que sugere maior quantidade de H_2 formado e $Al(OH)_3$, menos H^+_3O no meio, favorecendo melhor floculação e flotação.

No teste 2, o pH apresentou-se em pequenas variações e menos alcalino em $t = 2$ min. Esse teste apresentou o maior valor de pH para suas amostras, em relação aos demais.

3.3.2.5. Tensão elétrica

Os resultados de tensão elétrica dos efluentes eletrofloculados nas diferentes condições são apresentados nos Gráficos 29 e 30.

Em ambos os testes, para as mesmas intensidades de corrente anteriores, foi necessária maior tensão às amostras eletrofloculadas, em função da menor condutividade das mesmas. Apesar dos valores mais elevados, e conseqüentemente maior consumo de energia, o comportamento apresentou-se linear.

Quando comparado ao teste 1, os valores das tensões do segundo teste foram inferiores, possivelmente devido à um melhor controle da intensidade de corrente.

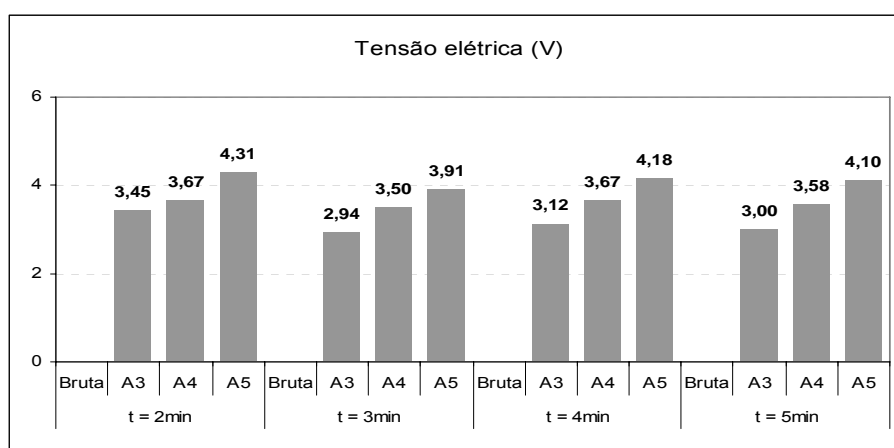


Gráfico 29 – Comportamento da tensão elétrica dos efluentes eletrofloculados, 1º teste.

Intensidade de corrente nas amostras: A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

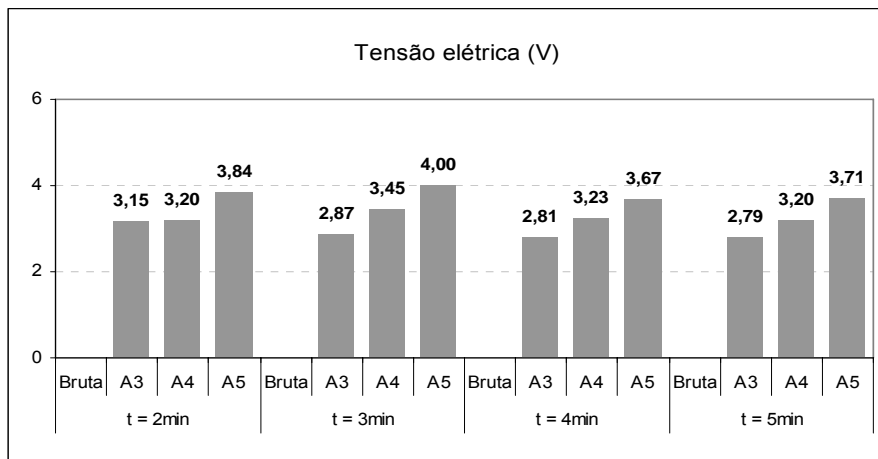


Gráfico 30 – Comportamento da tensão elétrica dos efluentes eletrofloculados, 2º teste.

Intensidade de corrente nas amostras: A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

3.3.2.6. Turbidez

Os resultados de remoção de turbidez do efluente bruto e dos eletrofloculados nas diferentes condições são apresentados nos Gráficos 31 e 32.

Apesar do pH ligeiramente alcalino e do baixo teor de óleos e graxas, foram observados sólidos em suspensão nas amostras tratadas do teste 1, o que pode explicar os elevados valores de turbidez nas amostras tratadas. O Gráfico 31 mostra a baixa performance do teste através da escala negativa do percentual de remoção de turbidez.

No segundo teste, foi obtido bom resultado para $t = 3$ min, explicado pelo bom controle do pH e sua linearidade e pela homogeneidade do teor de óleos e graxas, nas respectivas intensidades de corrente. O mesmo ocorreu para $t = 4$ min, à exceção de A5, onde houve interferência de sólidos em suspensão, provenientes, provavelmente, do desgaste dos parafusos de ferro do eletrodo.

Bensadok *et al.* (2008) encontraram pH ótimo de 6 – 7 para remoção de 99% de turbidez, utilizando eletrodos de alumínio.

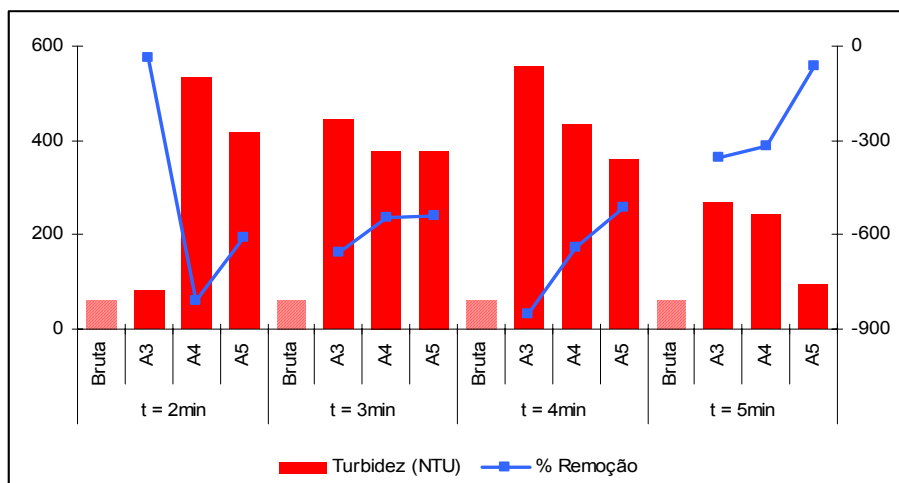


Gráfico 31 – Remoção da turbidez do efluente bruto e dos eletrofloculados, 1º teste.

Intensidade de corrente nas amostras: A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

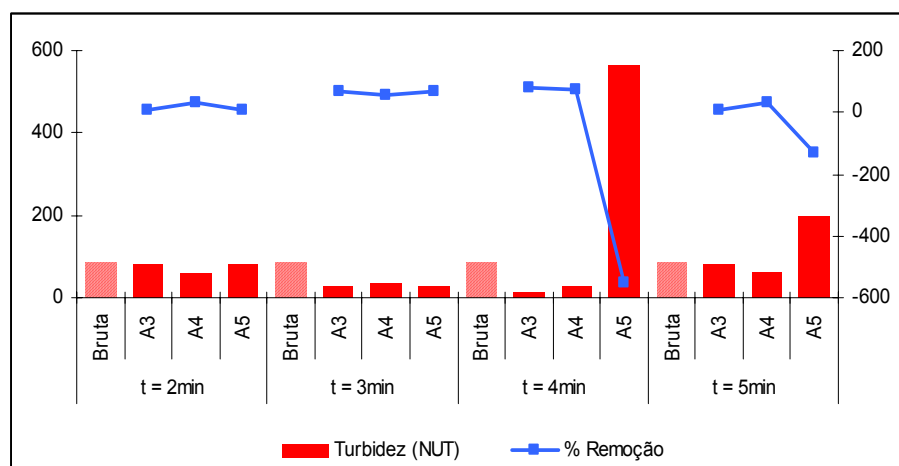


Gráfico 32 – Remoção da turbidez do efluente bruto e dos eletrofloculados, 2º teste.

Intensidade de corrente nas amostras: A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

3.3.2.7. Volume de lodo decantado

Os resultados de volume de lodo decantado dos efluentes eletrofloculados nas diferentes condições são apresentados nos Gráficos 33 e 34.

Como esperado, o volume de lodo decantado foi maior para os maiores tempos de reação, em $t = 4$ min e $t = 5$ min, em ambos os testes.

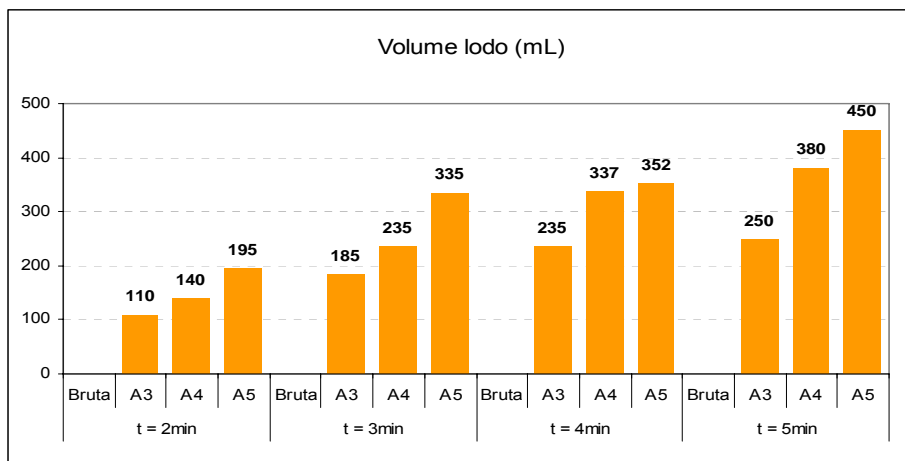


Gráfico 33 – Evolução do volume de lodo decantado dos efluentes eletrofloculados, 1º teste.

Intensidade de corrente nas amostras: A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

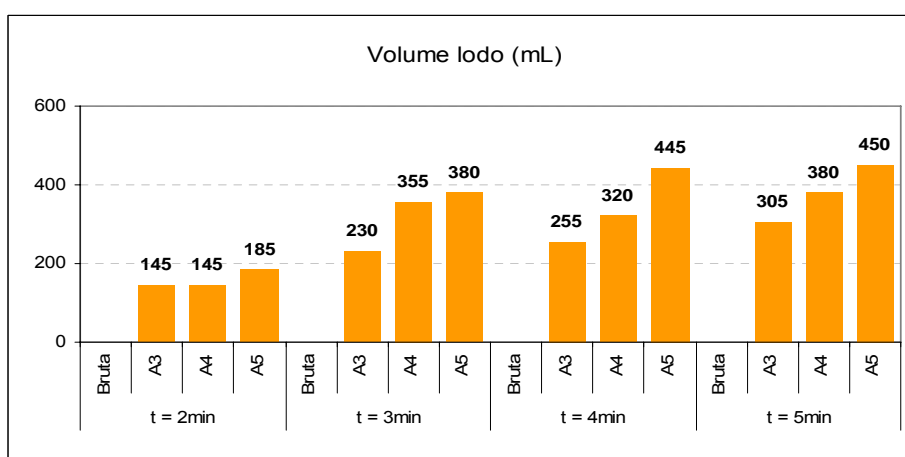


Gráfico 34 – Evolução do volume de lodo decantado dos efluentes eletrofloculados, 2º teste.

Intensidade de corrente nas amostras: A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

3.4. Quarta etapa

Nesta etapa, sem a repetição, foram analisadas a amostra bruta de uma emulsão preparada com água do mar e óleo e três respectivas amostras tratadas por eletrofloculação, sendo a intensidade de corrente da célula eletrolítica variada de 3 –

5 A, para cada amostra. O tempo dos ensaios variou de 2 – 5 min, para cada uma das três amostras, e em função das três intensidades de corrente aplicadas, sendo a inversão da polaridade do eletrodo realizada apenas em 4 min e 5 min, proporcional aos respectivos tempos.

Todos os parâmetros foram analisados, a fim de comparar os resultados obtidos com a emulsão preparada e a água de produção original. Além disso, foi particularmente analisado o peso do eletrodo, para quantificar o desgaste do mesmo.

Os tempos de eletrofloculação e as intensidades de corrente utilizadas continuaram como na etapa 3, em 2, 3, 4 e 5 min e 3, 4 e 5 A.

3.4.1. Caracterização do efluente bruto

Nesta etapa, as análises para os quatro tempos em estudo foram realizadas no mesmo dia. Assim, não há faixa de valores; há apenas um valor para cada parâmetro (Tabela 8).

Em relação às anteriores, essa amostra tem maior valor de óleos e graxas, mas valores menores de condutividade e boro. A turbidez, o pH e a cor ficaram entre valores médios. A figura 20 mostra o efluente bruto.

Tabela 8 – Características do efluente bruto da 4ª etapa (emulsão).

Parâmetros	Valores
Boro (mg/L)	2,78
Condutividade (mS/cm)	85,0
Cor (A)	0,237
Óleos e graxas (mg/L)	176,4
pH	7,8
Turbidez (NTU)	49,3



Figura 20 – Efluente bruto

3.4.2. Caracterização do efluente eletrofloculado

A caracterização do efluente tratado foi realizada através dos mesmos parâmetros descritos para o efluente bruto, além da análise do volume de lodo decantado e do controle da tensão elétrica, obtida em cada eletrofloculação.

3.4.2.1. Boro

Os resultados de remoção de boro do efluente bruto e dos eletrofloculados nas diferentes condições são apresentados no Gráfico 35.

A quantidade de boro na amostra bruta e, conseqüentemente nas eletrofloculadas, era de 2,78 mg/L, sendo considerada muito baixa, o que pode ter dificultado a remoção. Os valores, porém, estão abaixo de 5 mg/L e podem ser descartados em água salgada, conforme previsto na CONAMA 357/05.

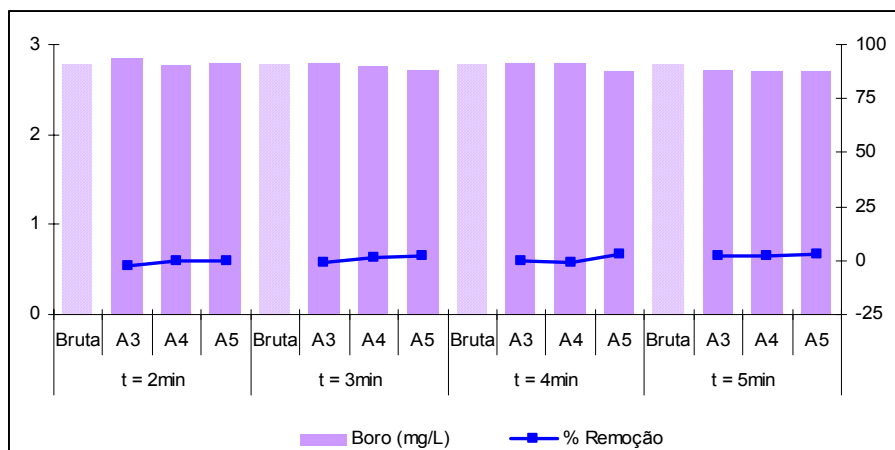


Gráfico 35 – Remoção de boro do efluente bruto e dos eletrofloculados da emulsão.
Intensidade de corrente nas amostras: A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

3.4.2.2. Condutividade

Os resultados de condutividade do efluente bruto e dos eletrofloculados nas diferentes condições são apresentados no Gráfico 36.

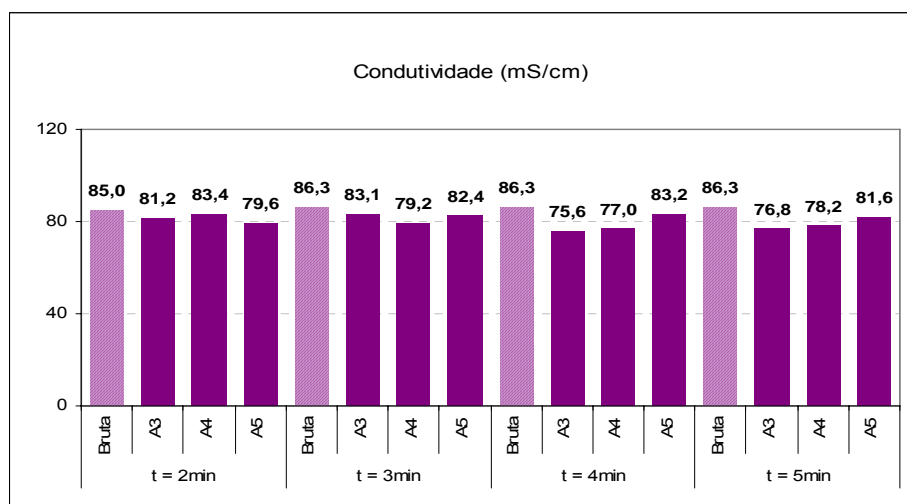


Gráfico 36 – Comportamento da condutividade do efluente bruto e dos eletrofloculados da emulsão.

Intensidade de corrente nas amostras: A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

A condutividade da emulsão, assim como da amostra na etapa 3, foi considerada baixa, o que pode explicar a alta tensão elétrica necessária durante os processos de eletrofloculação e também a baixa remoção de boro.

3.4.2.3. Cor

Os resultados de remoção de cor do efluente bruto e dos eletrofloculados nas diferentes condições são apresentados no Gráfico 37.

A coloração da amostra bruta era avermelhada, em função do óleo misturado para formar a emulsão. A remoção de cor foi considerada ótima, constante e proporcional à intensidade de corrente aplicada, atingindo 93% em A4 e t = 5 min. Não foram observados fatores que pudessem interferir na remoção de cor.

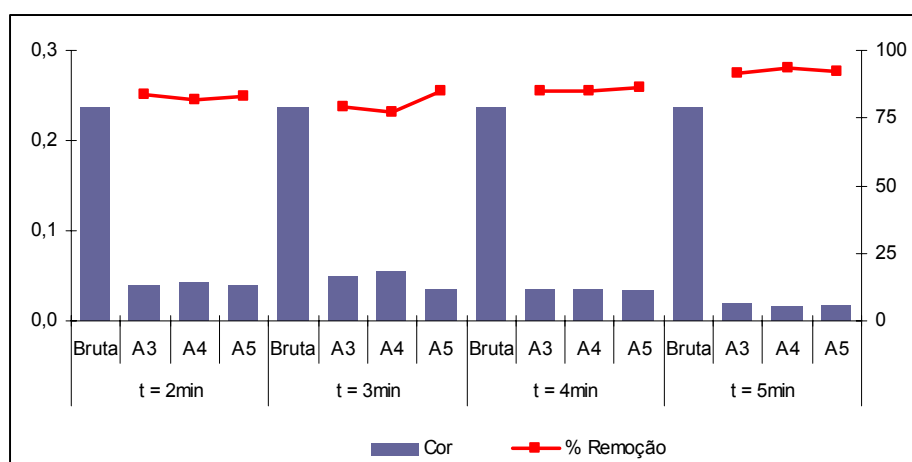


Gráfico 37 – Remoção de cor do efluente bruto e dos eletrofloculados da emulsão.

Intensidade de corrente nas amostras: A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

3.4.2.4. Óleos e Graxas

Os resultados de remoção de óleos e graxas do efluente bruto e dos eletrofloculados nas diferentes condições são apresentados no Gráfico 38.

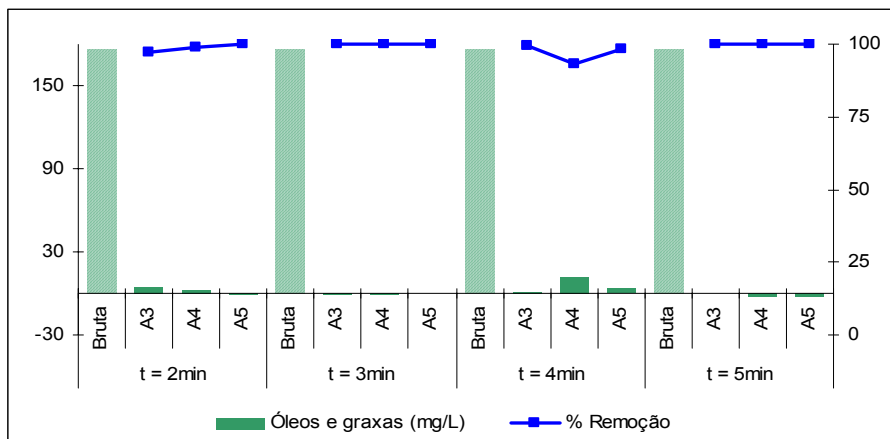


Gráfico 38 – Remoção de óleos e graxas do efluente bruto e dos eletrofloculados da emulsão.

Intensidade de corrente nas amostras: A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

A remoção de óleos e graxas atingiu 100% para $t = 3$ min e $t = 5$ min, em todas as intensidades de corrente e também para A5, em $t = 2$ min. Tal fato pode ter-se dado em função da linearidade do pH, e proximidade de 7. A Figura 21 mostra o processo de eletrofloculação em $t = 5$ min e intensidade de corrente igual a 3 A.



Figura 21 – Eletrofloculação de A3, em $t = 5$ min.

3.4.2.5. pH

Os resultados de pH do efluente bruto e dos eletrofloculados nas diferentes condições são apresentados no Gráfico 39.

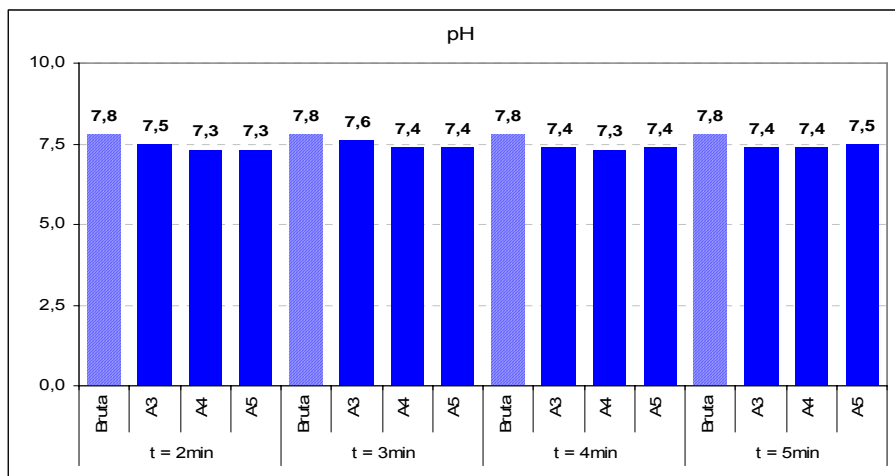


Gráfico 39 – Comportamento do pH do efluente bruto e dos eletrofloculados da emulsão.

Intensidade de corrente nas amostras: A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

O pH da amostra bruta foi reduzido durante as eletrofloculações, ficando próximo da neutralidade e mantendo-se linear, o que pode ter influenciado a remoção de óleos e graxas e turbidez atingidas.

3.4.2.6. Tensão elétrica

Os resultados de tensão elétrica dos efluentes eletrofloculados nas diferentes condições são apresentados no Gráfico 40.

Para as amostras da emulsão, a tensão teve os maiores valores, possivelmente em função da baixa condutividade das amostras e maior necessidade de energia para promover as eletrofloculações.

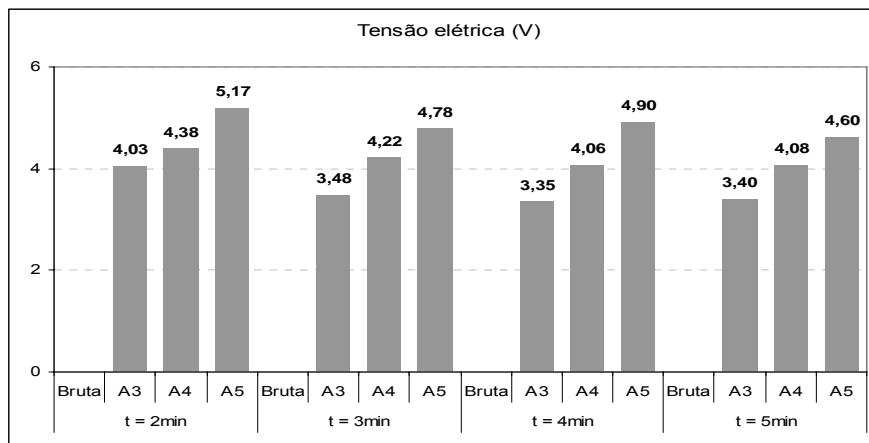


Gráfico 40 – Comportamento da tensão elétrica dos efluentes eletrofloculados da emulsão.

Intensidade de corrente nas amostras: A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

3.4.2.7. Turbidez

Os resultados de remoção de turbidez do efluente bruto e dos eletrofloculados nas diferentes condições são apresentados no Gráfico 41.

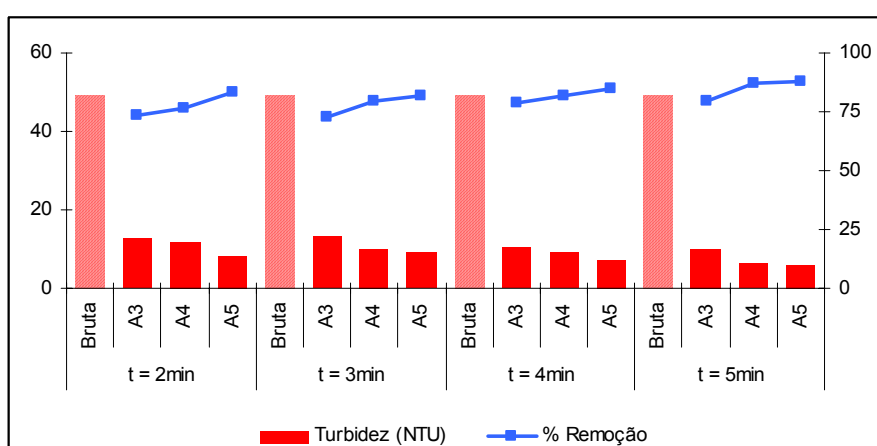


Gráfico 41 – Remoção da turbidez do efluente bruto e dos eletrofloculados da emulsão.

Intensidade de corrente nas amostras: A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

A turbidez se comportou de maneira satisfatória, apresentando os melhores resultados do estudo. Atingiu remoção de 88% em A5 e $t = 5$ min, em função do bom controle da intensidade de corrente e pH próximo da neutralidade.

3.4.2.8. Volume de lodo decantado

Os resultados de volume de lodo dos efluentes eletrofloculados nas diferentes condições são apresentados no Gráfico 42.

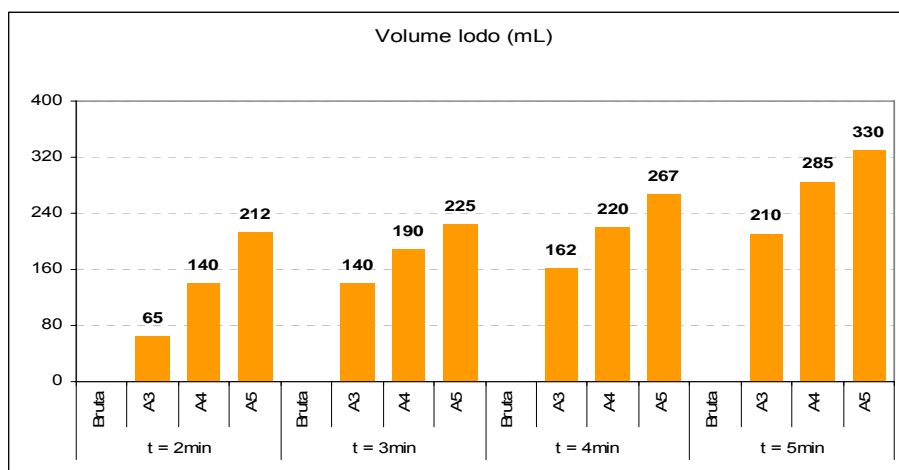


Gráfico 42 – Evolução do volume de lodo dos efluentes eletrofloculados da emulsão. Intensidade de corrente nas amostras: A3 = 3A, A4 = 4A, A5 = 5A.

O volume de lodo se comportou como esperado, crescente em função do tempo de reação, sendo proporcional aos flocos formados. A Figura 22 mostra o processo de decantação do lodo e os efluentes eletrofloculados finais.

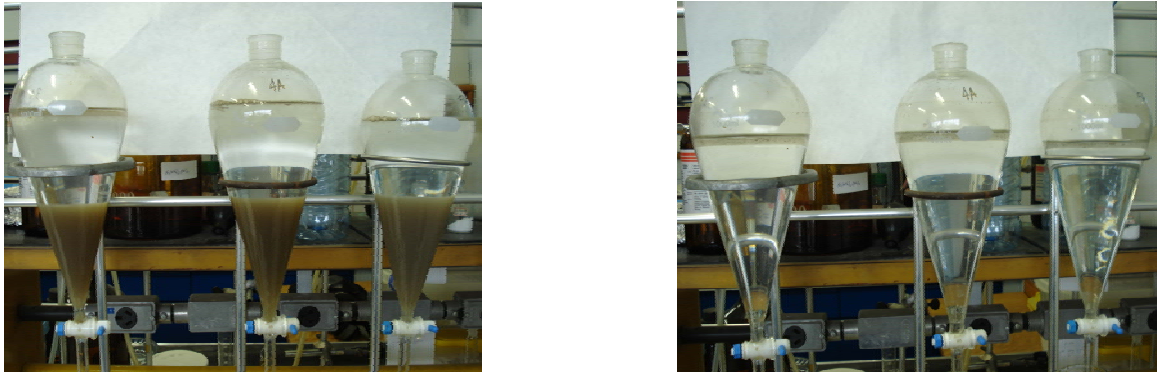


Figura 22 – Lodo em decantação (E) de A3, A4 e A5, em $t = 3$ min e efluentes eletrofloculados (D) de A3, A4 e A5, em $t = 4$ min.

3.4.2.9. Peso do eletrodo

O eletrodo foi pesado nesta última etapa, antes e depois das eletrofloculações, a fim de se obter parâmetros que pudessem demonstrar o desgaste do mesmo (Figura 23).



Figura 23 – Eletrodo antes (E) e depois da eletrofloculação (D) - deposição de sais.

O valor de início foi de 404,80 g e no final de 402,60 g. A diferença de 2,20 g é explicada pela oxidação do alumínio do eletrodo em Al^{3+} e a posterior formação de hidróxido, $\text{Al}(\text{OH})_3$.

4. CONCLUSÃO

A utilização da eletrofloculação no tratamento de efluentes industriais é um processo bastante eficiente para remoção de diferentes poluentes, propiciando a redução de importantes parâmetros como cor, turbidez e teor de óleos e graxas.

Neste trabalho, utilizou-se a eletrofloculação com eletrodo de alumínio aplicada ao tratamento de água de produção, efluente de característica oleosa.

A eficiência da remoção dos contaminantes é dependente do pH inicial, da condutividade, da concentração do eletrólito, da intensidade da corrente aplicada e da concentração de óleos e graxas.

O efluente em questão, a água de produção, é relativamente homogêneo, porém pode possuir variações na condutividade, no pH e na cor, gerando desafios ao processo de tratamento.

Para as amostras de água de produção, os melhores resultados conjuntos de eficiência de remoção de poluentes, utilizando eletrodo de alumínio, foram em $t = 4$ min, com intensidade de corrente de 3A, condutividade de 73,9 mS/cm e pH inicial igual a 8,1, em faixa alcalina.

- Cor: 83%
- Óleos e graxas: 84%
- Turbidez: 83%

Para as amostras da emulsão, as melhores condições, considerando remoção máxima de óleos e graxas, foram $t = 5$ min, intensidade de corrente de 5A, condutividade de 81,6 mS/cm e pH inicial 7,8.

- Cor: 92%
- Óleos e graxas: 100%
- Turbidez: 88%

Além disso, ainda foi analisado o poluente boro, porém sem eficiência, tendo sua melhor remoção atingido 14%, para água de produção, em A5 e tempo de 4 min.

Os resultados mostraram a eficiência do processo de eletrofloculação no tratamento de água de produção, utilizando eletrodo de alumínio. Além disso, considerando a geração “*in situ*” do agente coagulante que, por sua vez, forma os flocos do material particulado e ao mesmo tempo a flotação do resíduo gerado, esse processo mostra-se bastante interessante do ponto de vista ambiental, com menor geração de lodo, se comparado ao processo convencional, e poder de degradação de substâncias tóxicas, e econômico, por apresentar fácil automação e manutenção e relativo baixo custo.

Nos trabalhos futuros, sugere-se metodologia que garanta a uniformidade da coleta das amostras brutas, bem como o bom controle da intensidade de corrente, a fim de realizar processos controlados de eletrofloculação, resultando em boa remoção de turbidez, cor e óleos e graxas.

Sugere-se, ainda, testar diferentes valores de pH e medir a temperatura durante a eletrofloculação, para melhor estudar a interferência de tais parâmetros no processo.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADHOUM, Nafaâ; MONSER, Lotfi. Decolourization and removal of phenolic compounds from olive mil wastewater by eletrocoagulation. *Chemical Engineering and Processing*, Lausanne, v. 43, n. 10, p. 1281-1287, out. 2004.
- [ANON] Autor. Electroflocculation: Removal of oil, heavy metals and organic compounds from oil-in-water emulsions. *Filtration and Separation*, Oxford, v. 33, n. 4, p. 295-303, abr. 1996.
- BEN MANSOUR, L; CHALBI, S. Removal of oil from oil/water emulsions using electroflotation process. *Journal of Applied Electrochemistry*, Holanda, v. 36, n. 5, p. 577-581, mai. 2006.
- BENSADOK, K. et al. Electrocoagulation of cutting oil emulsions using aluminium plate electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, Holanda, v. 152, n. 1, p. 422-430, mar. 2008.
- CAÑIZARES, Pablo et al. Coagulation and electrocoagulation of oil-in-water emulsions. *Journal of Hazardous Materials*, Holanda, v. 151, n. 1, p. 44-51, fev. 2008.
- CERQUEIRA, Alexandre Andrade. *Aplicação da Técnica de Eletrofloculação no Tratamento de Efluentes Têxteis*. 2006. 111f. Dissertação (Mestrado em Química) – Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- CHAUDHARI, Sanjeev et al. Removal of arsenic from water by electrocoagulation. *Chemosphere*, Oxford, v. 55, n. 9, p. 1245-1252, jun. 2004.
- CHEN, Guohua. Electrochemical technologies in wastewater treatment. *Separation and Purification Technology*, Amsterdã, v. 38, n. 1, p. 11-41, jul. 2004.
- CHEN, Gouhua; CHEN, Xueming; YUE, Po Lock. Separation of pollutants from restaurant wastewater electrocoagulation. *Separation and Purification Technology*, Amsterdã, v. 19, n. 1-2, p. 65-76, jun. 2000.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as

condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília, DF, DOU, nº 53, p. 58-63, mar. 2005.

- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (Brasil). Resolução nº 396, de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Brasília, DF, DOU, nº 66, p. 66-68, abr. 2008.
- CRESPILO, Frank Nelson; SANTANA, Claudemir Gomes; REZENDE, Maria Olímpia Oliveira. Tratamento de efluente de indústria de processamento de coco utilizando eletroflotação. *Química Nova*, v. 27, n. 3, p. 387-392, mai-jun. 2004.
- Esgotamento da água potável. *Folha de São Paulo*, São Paulo, 2 jul. 1999, Caderno Especial Ano 2000.
- INAN, H. et al. Olive oil mill wastewater treatment by means of electrocoagulation. *Separation and Purification Technology*, Amsterdã, v. 36, n. 1, p. 23-31, abr. 2004.
- INSTITUTO SOCIOAMBIENTAL. São Paulo: Instituto Socioambiental, 1994. Apresenta informações sobre questões sociais e ambientais. Disponível em: www.socioambiental.org. Acesso em: 10 out. 2008.
- KIM, Tak-Hyun et al. Effects of Cl-based chemical coagulants on electrochemical oxidation of textile wastewater. *Desalination*, Amsterdã, v. 155, n. 1, p. 59-55, mai. 2003.
- KOBAYASHI, Mehmet; CAN, Orhan Taner Can; BAYRAMOGLU, Mahmut. Treatment of textile wastewater by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, v. 100, n. 1-3, p. 163-178, jun. 2003.
- KOPARAL, Sava A.; OGUTVEREN, Ülker Bakir. Removal of nitrate from water by electroreduction and electrocoagulation. *Journal Hazardous Materials*, Amsterdã, v. 89, n. 1, p. 83-94, jan. 2002.
- KOREN, J. P. F.; SYVERSEN, U. State-of-the-art Electroflocculation. *Filtration & Separation*, Oxford, v. 32, n. 2, p. 153-156, fev. 1995.
- KUMAR, P. Ratna et al. Removal of arsenic from water by electrocoagulation. *Chemosphere*. Amsterdã, v. 55, n. 9, p. 1245-1252, jun. 2004.
- KUNZ, Airton et al. Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. *Química Nova*, São Paulo, v. 25, n. 1, p. 78-82, jan./fev. 2002.

- LAI, Chen. L.; LIN, Sheng. H. Treatment of chemical mechanical polishing wastewater by electrocoagulation: system performances and sludge settling characteristics. *Chemosphere*, Amsterdã, v. 54, n. 3, p. 235-242, jan. 2004.
- LAI, Chen L.; LIN, Sheng H. Electrocoagulation of chemical mechanical polishing (CMP) wastewater from semiconductor fabrication. *Chemical Engineering Journal*, Lausanne, v. 95, n. 1-3, p. 205-211, set. 2003.
- LARUE, O. et al. Electrocoagulation and coagulation by iron of latex particles in aqueous suspensions. *Separation and Purification Technology*, Amsterdã, v. 31, n. 2, p. 177-192, mai. 2003.
- LORA, Electo E. Silva. *Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte*. 2ª ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2002, 482p.
- MA, Hongzhu; WANG, Bo. Electrochemical pilot-scale plant for oil field produced wastewater by M/C/Fe electrodes for injection. *Journal of Hazardous Materials*, Amsterdã, v. 132, n. 2-3, p. 237-243, set. 2005.
- MAMERI, N. et al. Defluoridation of septentrional Sahara water of North Africa by electrocoagulation process using bipolar aluminium electrodes. *Water Research*, Oxford, v. 32, n. 5, p. 1604-1612, mai. 1998.
- MASTERTON, Willian L.; SLOWINSKI, Emil J.; STANITSKI, Conrad L. *Princípios de Química*. 6ª ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 1990. 681p.
- MATTESON, Michael J. et al. Electrocoagulation and separation of aqueous suspensions of ultrafine particles. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, Amsterdã, v. 104, n. 1, p. 101-109, nov. 1995.
- MOLLAH, M. Yousuf A. et al. Fundamental, present and future perspectives of electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, Amsterdã, v. 114, n. 1-3, p. 199-210, out. 2004.
- MOLLAH, M. Yousuf A. et al. *Electrocoagulation (EC): science and applications*. *Journal of Hazardous Materials*, Amsterdã, v. 84, n. 1, p. 29-41, jun. 2001.
- MOSTEFA, N. Moulai; TIR, M. Coupling flocculation with electroflotation for waste oil-water emulsion treatment. *Desalination*, Holanda, v. 161, n. 2, p. 115-121, fev. 2004.

- MURUGANANTHAN, M.; BHASKAR RAJU, G.; PRABHAKAR, S. Removal of sulfide, sulfate and sulfite ions by electro coagulation. *Journal of Hazardous Materials*, Amsterdã, v. 109, n. 1-3, p. 37-44, jun. 2004.
- OUSSEDIK, Salim Mebrouk, KHELIFA, Abdellah. Reduction of copper ions concentration in wastewaters of galvanoplastic industry by electroflotation. *Desalination*, Amsterdã, v. 139, n. 1-3, p. 383, sep. 2001. Resumo.
- NASCIMENTO, Jailton Ferreira et al. *Remoção de boro na água produzida na Estação de Tratamento de Águas de São Sebastião*. RT TPAP 008/2005. Rio de Janeiro: Mar, 2006. 63p. Relatório Técnico.
- NUNES, José Alves. *Tratamento Físico-químico de Águas Residuárias Industriais*. 3ª ed. Aracajú: Gráfica e Editora Triunfo Ltda, 2001, 299p.
- QUEIROZ, Mozart Schmitt et al. *Aplicação do Processo Eletrolítico ao Tratamento de Água de Produção*. Rio de Janeiro: CENPES-DITER-SEBIO, 1996. 165p. Relatório Técnico.
- RUBACH, S.; Saur, I. F. Onshore Testing of Produced Water by Electroflocculation. *Filtration and Separation*, Oxford, v. 34, n. 8, p. 877-882, out. 1997.
- SANFAN, Wang; QINLAI, Wang. Experimental studies on pretreatment process of brackish water using electrocoagulation (EC) method. *Desalination*, Amsterdã, v. 66, p. 353-364, dez. 1987.
- SARDELLA, Antônio. *Química*. 5ª ed. São Paulo: Editora Ática, 2002. 415 p.
- SHEN, Feng et al. Electrochemical removal of fluoride ions from industrial wastewater. *Chemical Engineering Science*, Oxford, v. 58, n. 3-6, p. 987-993, fev-mar. 2003.
- SILVA, Ana Karla P. et al. *Reuso de água e suas implicações jurídicas*. 1ª ed, São Paulo: Navegar Editora, 2003, 116 p.
- SILVA, André Luiz Cirne. *Processo eletrolítico: Uma alternativa para o tratamento de águas residuárias*. 2002. 60 f. Monografia (Especialização em Química Ambiental) – Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2002.
- UN, Umran Tezcan. Treatment of vegetable oil refinery wastewater by electrocoagulation. *Fresenius Environmental Bulletin*, Alemanha, v. 16, n. 9A, p. 1056-1060, 2007.

- UNIVERSIDADE DA ÁGUA. São Paulo: Universidade da Água, 2005. Apresenta informações sobre tratamento e reúso de água e educação ambiental. Disponível em: www.uniagua.org.br. Acesso em: 06 out. 2006.
- VEGUERIA, S. F. Jerez; GODOY, J. M.; MIEKELEY, N. Environmental impact studies of barium and radium discharges by produced waters from the "Bacia de Campos" oil-field offshore platforms, Brazil. *Journal of Environmental Radioactivity*. Oxford, v. 62, n. 1, p. 29-38, nov. 2001.
- VIK, Eilen A. et al. Electrocoagulation of potable water. *Water Research*, Oxford, v. 18, n. 11, p. 1355-1360, 1984.
- YILMAZ, A. Erdem et al. The investigation of parameters affecting boron removal by electrocoagulation method. *Journal of Hazardous Materials*, Amsterdã, v. 125, n. 1-3, p. 160-165, 2005.
- WIENDL, Guilherme Wolfgang. *Processos eletrolíticos no tratamento de esgotos sanitários*. 1ª ed. Rio de Janeiro: Editora ABES, 1998, 359p.
- XU, Xinhua; ZHU, Xiangfeng. Treatment of refractory oily wastewater by electro-coagulation process. *Chemosphere*, Oxford, v. 56, n. 10, p. 889-894, set. 2004.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)