

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS MEDIANEIRA**

CAROLINE BRESSAN QUEIROZ

**OTIMIZAÇÃO DA TÉCNICA DE ELETROFOCULAÇÃO VIA
ANÁLISE DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA APLICADA AO
EFLUENTE DE UMA INDÚSTRIA TÊXTIL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**MEDIANEIRA
2011**

CAROLINE BRESSAN QUEIROZ

**OTIMIZAÇÃO DA TÉCNICA DE ELETROFLOCULAÇÃO VIA
ANÁLISE DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA APLICADA AO
EFLUENTE DE UMA INDÚSTRIA TÊXTIL**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado como requisito parcial à obtenção do Grau de Tecnólogo, no Curso Superior de Tecnologia em Gestão Ambiental, promovido pela UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus Medianeira*.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Eyng

Co-orientador: Prof. Dr. Laércio Mantovani Frare

**MEDIANEIRA
2011**



TERMO DE APROVAÇÃO

Otimização da técnica de Eletrofoculação via Análise de Superfície de Resposta aplicada ao efluente de uma indústria têxtil

Por

Caroline Bressan Queiroz

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado às 7:30 h do dia 27 de junho de 2011 como requisito parcial para a obtenção do título de Tecnólogo no Curso Superior de Tecnologia em Gestão Ambiental da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *Campus* Medianeira. A candidata foi argüida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho Aprovado.

Prof. Dr. Eduardo Eyng
UTFPR – *Campus* Medianeira
(Orientador)

Prof. Dr. Laércio Mantovani Frare
UTFPR – *Campus* Medianeira
(CO-Orientador)

Prof. Dr. Rafael Arioli
UTFPR – *Campus* Medianeira
(Convidado)

Prof. Dr. Paulo Rodrigo Stival
Bittencourt
UTFPR – *Campus* Medianeira
(Convidado)
(Responsável pelas atividades de TCC)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela vida e pela saúde.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), *campus* Medianeira, pela oportunidade da realização do Curso Superior de Tecnologia em Gestão Ambiental, e por permitir a realização deste trabalho nos laboratórios.

Agradeço a todos os Professores do Curso Superior de Tecnologia em Gestão Ambiental, e demais professores companheiros de laboratório, pela dedicação e ensinamentos e, principalmente, aos Professores Eduardo Eyng e Laércio Mantovani Frare pela orientação, paciência e amizade demonstrados durante este trabalho de conclusão de curso.

A todos os colaboradores da UTFPR, em especial as técnicas e estagiários (as) dos laboratórios, pelo auxílio durante o andamento da pesquisa.

A indústria têxtil pela confiança, incentivo e concessão do efluente para a realização deste trabalho.

Aos amigos, principalmente Caroline Bertinatto Fabris, Michelle Malaggi, e Leandro Flech, pela colaboração, incentivo, e ajuda nesta fase tão importante da minha vida.

Aos meus pais, irmãos, avó e tios que me apoiaram, incentivaram, e demonstraram orgulho por mais essa conquista.

E finalmente todas as pessoas que participaram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho, contribuindo tanto com ensinamentos, quanto com afetividade e paciência.

RESUMO

QUEIROZ, Caroline Bressan. **Otimização da Técnica de Eletrofloculação Via Análise de Superfície de Resposta Aplicada ao Efluente de Uma Indústria Têxtil**. 2011 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2011.

Como a água é essencial para a vida na terra, é cada vez mais crescente a necessidade de cuidados para com ela. Devido à dificuldade de fazer o tratamento dos efluentes das indústrias têxteis, este estudo consistiu em aplicar a técnica de eletrofloculação, utilizando um eletrodo de Alumínio (Al), em um efluente líquido de uma indústria têxtil, inicialmente, por meio de um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), identificar os valores ótimos de variáveis como condutividade elétrica, intensidade de corrente, tempo de retenção sobre o desempenho da técnica, avaliado por indicadores como cor, turbidez e DQO. Para faixa de valores estudada, apenas a variável tempo se mostrou significativa estatisticamente, para a remoção de DQO, a 5% de significância. Porém, analisando os gráficos de superfície de resposta obtidos a partir do DCCR, foi possível determinar uma região ótima para os valores de tempo de reação, condutividade elétrica e intensidade de corrente, de modo a proporcionar um resultado apurado na remoção de turbidez, DQO e cor.

Palavras chave: Análise de Superfície de Resposta. Delineamento Composto Central Rotacional. Tratamento de efluente têxtil.

ABSTRACT

QUEIROZ, Caroline Bressan. **Optimization Technique Electroflocculation Via Response Surface Analysis Applied to the effluent of a textile factory.** 2011 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2011.

Water is essential for life on earth is ever-increasing need to care for her. Due to the difficulty of treating effluents from textile industries, this study was to apply the technique of electroflocculation using an aluminum electrode (Al) in a liquid effluent of a textile industry, initially through a Central Composite Design Rotational (DCCR), identify the optimal values of variables such as electrical conductivity, current intensity, retention time on the performance of the technique, measured by indicators such as color, turbidity and DQO. For the range of values studied, only the time variable was significant statistically, for the removal of DQO, the 5% significance level. However, analyzing the response surface graphs obtained from DCCR was possible to determine an optimal region for the values of reaction time, electrical conductivity and current intensity, in order to provide an accurate result in the removal of turbidity, DQO and color.

Keywords: Response Surface Analysis. Central Composite Rotational Design. Textile Effluent Treatment.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Esquema da fórmula do índigo blue..... | 13 |
| Figura 2 - Sistema da Montagem dos Eletrodos | 23 |
| Figura 3 - Esquema da eletrofloculação | 25 |
| Figura 4 - Decantação das amostras | 26 |
| Figura 5 - Representação gráfica da eficiência na remoção da DQO (%)..... | 28 |
| Figura 6 - Representação gráfica da eficiência na remoção da Turbidez (%).. | 30 |
| Figura 7 - Representação gráfica da eficiência na remoção da Cor (%)..... | 32 |
| Figura 8 - Avaliação dos melhores resultados para o tempo | 35 |
| Figura 9 - Avaliação dos melhores resultados para a intensidade de corrente. | 36 |
| Figura 10 - Avaliação dos melhores resultados para a condutividade | 37 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Matriz do delineamento experimental..... | 24 |
| Tabela 2 - Níveis estudados para as variáveis independentes | 24 |
| Tabela 3 - Eficiência da remoção de DQO (mg/L)..... | 27 |
| Tabela 4 - Eficiência na remoção de turbidez | 29 |
| Tabela 5 - Eficiência na remoção da cor | 31 |
| Tabela 6 - Coeficientes do modelo quadrático para a DQO..... | 33 |
| Tabela 7 - Coeficientes do modelo quadrático para a turbidez | 33 |
| Tabela 8 - Coeficientes do modelo quadrático para a cor | 34 |
| Quadro 1 - Vantagens e desvantagens das metodologias de tratamento de efluentes têxteis | 19 |
| Quadro 2 - Comparação entre processo eletrolítico e lodos ativados no tratamento de esgotos sanitários | 19 |

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 9 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 12 |
| 2.1 EFLUENTES TÊXTEIS | 12 |
| 2.1.1 Corantes..... | 12 |
| 2.2 COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO | 14 |
| 2.3 ELETROFLOCULAÇÃO..... | 15 |
| 2.3.1 Exemplos da utilização da Eletrofloculação como alternativa viável para tratamento de efluentes de diferentes segmentos industriais | 17 |
| 2.4 VANTAGENS E DESVANTAGENS DE ALGUNS DOS MÉTODOS DE REMOÇÃO DE POLUENTES UTILIZADOS NA INDÚSTRIA TÊXTIL..... | 18 |
| 2.5 PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS EMPREGADOS NA CARACTERIZAÇÃO DE EFLUENTES | 20 |
| 2.5.1 Turbidez | 20 |
| 2.5.2 Condutividade Elétrica..... | 21 |
| 2.5.3 Cor..... | 21 |
| 2.5.4 Demanda Química de Oxigênio (DQO)..... | 21 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 22 |
| 3.1 MÓDULO EXPERIMENTAL | 22 |
| 3.1.1 Planejamento experimental | 23 |
| 3.1.2 Procedimento experimental..... | 25 |
| 3.2 PARÂMETROS AVALIADOS | 26 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 27 |
| 4.1 EFICIÊNCIA DO TRATAMENTO | 27 |
| 4.2 DETERMINAÇÃO DA REGIÃO ÓTIMA PARA CONDIÇÕES OPERACIONAIS POR ANÁLISE DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA | 32 |
| 5. CONCLUSÕES | 38 |
| 6. SUGESTÕES | 39 |
| APÊNDICE – GRÁFICOS DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA | 40 |
| REFERÊNCIAS | 46 |

1 INTRODUÇÃO

A água é condição essencial para a vida na Terra, pois nela surgiram as primeiras formas de vida, e a evolução dos seres vivos sempre foi dependente dela. Sendo ainda o mais crítico e importante elemento para a vida humana, pois compõe de 60 a 70% do nosso peso corporal, regula a nossa temperatura interna e é essencial para todas as funções orgânicas; além de ser usada para praticamente todas as nossas atividades. Porém, com o crescimento populacional e o desenvolvimento industrial, percebe-se cada vez mais o aumento da utilização da mesma nos processos industriais, gerando assim elevada quantidade de efluentes que, se descartados diretamente no ambiente, causam grande poluição por conter elementos de difícil ou impossível degradação natural. Então, para evitar uma poluição desenfreada, a legislação ambiental torna-se cada vez mais rígida, exigindo das indústrias e outras atividades potencialmente geradoras de poluição, o tratamento dos efluentes, assim como a apresentação de novos métodos, o que, conseqüentemente, implica na necessidade de recursos financeiros, mão de obra e tempo.

Entre as atividades potencialmente geradoras de poluição, listadas pela Resolução CONAMA Nº 237, de 19 de dezembro de 1997, encontramos as indústrias têxteis, de vestuário, calçados e artefatos de tecidos, que são classificadas como tal, pois seus efluentes apresentam características de difícil degradação ao meio ambiente.

Segundo Banat, *et al* (1996 apud PASCHOAL 2005):

“Os corantes têxteis são produzidos para resistir à exposição ao suor, sabão, água, luz ou agentes oxidantes. Esta alta estabilidade torna-os menos receptivos à biodegradação que, potencialmente, é o processo mais barato de degradação”.

Dellamatrice (2005) completa afirmando que os resíduos das indústrias têxteis têm baixos níveis de degradação, apresentando assim grande potencial de poluição, principalmente dos mananciais, pois as suas características químicas lhe conferem grande estabilidade, tornando-os muito persistentes no meio ambiente.

A indústria têxtil é uma grande produtora de efluentes líquidos, utilizando de 80 a 400 litros de água para produzir 1 kg de tecido, sendo que geralmente

80% deste volume é descartados como efluente (ROBINSON, 2000 *apud* PERUZZO, 2003 p. 4; IMMICH, 2006).

O setor têxtil é bastante representativo na economia brasileira, sendo que 13,15% dos empregos registrados no Brasil são da indústria de transformação, e o setor compreende ainda cerca de 3,5% do PIB total brasileiro; ainda é o quinto maior produtor têxtil do mundo, sendo que a Cadeia Têxtil e de Confecção apresentou um faturamento de US\$ 52 bilhões em 2010 (ABIT, 2011).

O setor têxtil conta com aproximadamente 30 mil empresas em todo o território nacional, sendo que as regiões sul e sudeste são as que apresentam maior quantidade de unidades fabris instaladas, e recebem maior apoio financeiro do BNDES – Banco Nacional do Desenvolvimento (BNDES, 2009).

Em tratamentos de efluentes líquidos, geralmente, são utilizados métodos físicos, químicos e biológicos. Os métodos físicos correspondem à mudança dos resíduos para uma nova fase, sendo que a separação de fases pode ser feita por: sedimentação, decantação, filtração, centrifugação e flotação de resíduos (CRESPINO, 2004). Já os processos químicos acontecem com a reação do poluente com alguma substância que o converta em uma nova substância, ambientalmente menos prejudicial. Por último, os biológicos utilizam oxidação através de bactérias, que pode acontecer em condições aeróbias e/ou anaeróbias. (CERQUEIRA, 2006).

Devido à dificuldade de fazer o tratamento dos efluentes das indústrias têxteis, novas tecnologias têm sido investigadas. Cerqueira (2006) afirma que “neste contexto, a eletrofloculação surge com uma técnica promissora, devido à sua eficiência e possibilidade de reuso da água”.

Logo, este estudo consistiu em aplicar a técnica de eletrofloculação, utilizando um eletrodo de Alumínio (Al), em um efluente líquido de uma indústria têxtil. Inicialmente, por meio de um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), identificar os valores ótimos de variáveis como condutividade elétrica, intensidade de corrente, e tempo de retenção sobre o desempenho da técnica, avaliado por indicadores como cor, turbidez e DQO, analisando-se os gráficos de superfície resposta.

O grande objetivo deste trabalho foi encontrar a região ótima das condições operacionais da técnica de eletrofloculação aplicada ao efluente

líquido de uma indústria têxtil, fazendo uso da Análise de Gráficos de Superfície Resposta. Outra contribuição do presente trabalho foi encontrar modelos matemáticos codificados que relacionem as variáveis independentes (tempo de reação e intensidade de corrente) às variáveis dependentes (turbidez, cor e DQO).

O controle das variáveis físico-químicas pertinentes ao processo de eletrofloculação permite a melhoria na eficiência do processo de tratamento de efluentes, e este processo, quando aplicado á uma indústria, conseqüentemente diminuirá a degradabilidade de corpos hídricos.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 EFLUENTES TÊXTEIS

A indústria têxtil é uma grande geradora de efluentes, este fato causa uma grande preocupação com este passivo ambiental; a característica dos efluentes depende da tecnologia e dos processos industriais utilizados e também dos tipos de fibras e produtos químicos empregados, sendo que o alto consumo de água pela indústria têxtil acontece principalmente nas operações de lavagem, tingimento e acabamento dos tecidos, bem como de lavagem de pisos e equipamentos, gerando conseqüentemente uma elevada quantidade de efluentes líquidos. (FURIGO JR, 2004; IMMICH, 2006; PORTO, 2002).

Porto (2002), afirma que estes efluentes apresentam características de difícil tratamento por ter lenta biodegradabilidade, elevadas quantidades de sais dissolvidos, corantes sintéticos, alto teor de detergentes e, ainda, presença de substâncias tóxicas, oferecendo assim bastante probabilidade de contaminação ambiental. Santos *et al* (2006), completam dizendo que efluentes oriundos da indústria têxtil contém compostos de alto conteúdo de matéria orgânica, surfactantes, aditivos e de forte coloração, sendo considerada a cor dos efluentes um dos indicadores bastante importantes de poluição.

Pacheco (2007), acredita que os principais problemas ambientais da indústria têxtil estão relacionados com a utilização de azo corantes, uma grande família de corantes sintéticos que são muito resistentes à degradação natural e tem comprovado caráter carcinogênico e mutagênico.

2.1.1 Corantes

Guaratini e Zanoni (1999), explicam que o processo de tingimento é um dos fatores fundamentais no sucesso comercial dos produtos têxteis; pois o consumidor normalmente exige algumas características básicas do produto, como a padronagem, beleza da cor, elevado grau de fixação em relação à luz,

lavagem e transpiração, tanto inicialmente quanto após uso prolongado; os autores ainda lembram que:

“Para garantir essas propriedades, as substâncias que conferem coloração à fibra devem apresentar alta afinidade, uniformidade na coloração, resistência aos agentes desencadeadores do desbotamento e ainda apresentar-se viável economicamente”.

Corantes e produtos químicos auxiliares são os componentes do efluente têxtil mais preocupantes, pois a presença de concentrações de corantes no efluente, mesmo que muito baixas, é extremamente visível e indesejável (NIGAN *et al*, 2000 apud CERQUEIRA, 2006).

Segundo a Associação Brasileira da Indústria Química (ABIQUIM), exige-se, para cada tipo de fibra, uma determinada categoria de corante:

“Para as fibras celulósicas, como o algodão e o rayon, são aplicados os corantes reativos, diretos, azóicos, à tina e sulfurosos. No caso das fibras sintéticas, deve-se distinguir entre as fibras e os corantes aplicados, principalmente no caso de: Poliéster – corantes dispersos; Acrílicos – corantes básicos; e Nylon (poliamida) – corantes ácidos. Restam, ainda, fibras menos importantes no mercado brasileiro como a seda, para a qual são aplicados corantes reativos, e a lã, que recebe corantes ácidos e reativos”.

O grande problema dos corantes no efluente é que alguns tipos de corantes, como os reativos e os ácidos, tendem a passar através de sistemas de tratamentos convencionais (WILLMOTT *et al*, 1998 apud PERUZZO, 2003).

Dados da ABIQUIM mostram que a utilização de corantes no Brasil concentra-se, principalmente, nos corantes reativos para fibras celulósicas (aproximadamente 57% do mercado), seguidos pelos corantes dispersos (35%), poliamida (3%) e acrílico (2 %).

Nas indústrias de jeans, geralmente é utilizado o corante índigo blue, então, na Figura 1 encontra-se a representação da fórmula do índigo:

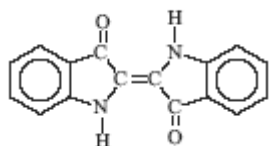


Figura 1 – Esquema da fórmula do índigo blue

2.2 COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO

Oliveira (2001, *apud* BARROS e NOZAKI 2001) afirma que “a floculação e a coagulação consistem na clarificação das águas pelo arraste do material finamente dividido em suspensão por agentes coagulantes”. Vaz (2009) completa dizendo que “o processo de coagulação/floculação tem por finalidade a remoção de substâncias coloidais, ou seja, material sólido em suspensão (cor) e/ou dissolvido (turbidez)”.

Ritcher e Netto (2003, *apud* CARDOSO, 2007) dizem que os termos coagulação e floculação podem ser utilizados como sinônimos, uma vez que ambos significam o processo integral de aglomeração das partículas. Sendo que a coagulação é o processo através do qual o agente coagulante adicionado à água, reduz as forças que tendem a manter separadas as superfícies em suspensão, enquanto a floculação faz a aglomeração dessas partículas por meio de transporte de fluido, formando partículas maiores que possam sedimentar.

Dentre os processos físico-químicos mais utilizados para o tratamento de água e efluentes, se percebe as técnicas de coagulação e floculação que são amplamente utilizadas, principalmente por Estações de Tratamento de Água/Esgoto (ETAs e ETEs), inclusive pela Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar). Vaz (2009) afirma que esta grande utilização acontece porque esta operação objetiva o condicionamento do despejo para o tratamento subsequente, sendo considerada como um sistema de pré-tratamento, que é de fácil utilização, pois o processo de adicionar um coagulante ao sistema pode acontecer na entrada do efluente para a estação de tratamento, aproveitando a agitação natural do transporte do efluente.

Vaz (2009) comenta que dentre os coagulantes inorgânicos, os sais de alumínio e ferro, principalmente sulfato de alumínio e cloreto férrico, são os mais utilizados no tratamento de água e esgoto, principalmente por apresentarem baixo custo. Porém, pesquisas têm apontado algumas desvantagens tais como problemas de saúde causados pelo alumínio residual em águas tratadas e a produção de grandes volumes de lodo. Da Silva *et al* (2003) confirmam isso dizendo que “sais de alumínio e ferro são

ambientalmente indesejáveis, pois os lodos produzidos podem disponibilizar íons solúveis que comprometem a saúde humana”.

Oliveira *et al* (2001, *apud* BARROS e NOZAKI, 2011) comentam que existem casos em que é necessário o uso de auxiliares de floculação e coagulação, estes auxiliares de coagulação beneficiam a floculação, pois aumentam a decantação, e melhoram o enrijecimento dos flocos, sendo que os mais usados são os polieletrólitos naturais ou sintéticos.

2.3 ELETROFLOCULAÇÃO

A EF, que também é conhecida como eletroflotação e/ou eletrocoagulação é um diferenciado processo eletroquímico de tratamento de efluentes onde um reator eletroquímico é o centro das reações de coagulação (CRESPILHO e REZENDE, 2004). Rodriguez *et al* (2007) explicam que um reator é um arranjo de placas de metal, com base em ânodos/eletrodos de sacrifício que se dissolvem em água na forma de íons por meio de uma corrente elétrica.

Entre os eletrodos de sacrifício, os mais utilizados são os de Alumínio e Ferro, pois são muito eficazes, facilmente encontrados e apresentam baixo custo (CERQUEIRA, 2006, CRESPILO e REZENDE, 2004; RAMALHO, 2008, SILVA, 2005).

Silva (2005), explica que a EF ocorre através da passagem da corrente elétrica entre os eletrodos que devem estar submersos em meios aquosos, distribuídos paralelamente no interior do reator, desenvolvendo assim diversas reações como coagulação, floculação, oxidação, flotação e decantação dos contaminantes em suspensão. O autor explica que:

“No interior do reator, durante a realização do tratamento, reações anódicas e catódicas provocam a dissociação das moléculas da água, liberando íons e gases (oxigênio e hidrogênio), que são fundamentais para a dinâmica do processo. As hidroxilas geradas se associam aos íons liberados pela oxidação do metal que compõe o eletrodo (Al ou Fe), formando hidróxidos insolúveis, colóides que potencializam o desenvolvimento da floculação. Essas reações são processadas em pH adequado e os gases nascentes evoluem em direção ao topo movimentando o conteúdo do reator, carregando os poluentes, suspensão e formando uma espessa espuma”.

Então, resumidamente, a eletrofloculação é um processo que permite gerar microbolhas de oxigênio e de hidrogênio, de dimensão extremamente reduzidas (<0,01mm). Como sua massa específica fica muito mais leve do que a massa do líquido a ser tratado, essas microbolhas tendem a flotar em direção à superfície da célula, carregando consigo toda a matéria em suspensão presente, provocando assim, uma clarificação do líquido tratado (SILVA, 2005).

Mollah *et al* (2004) e Rodriguez *et al* (2007 *apud* BORBA *et al* 2010) dizem que:

“O processo da EF em um reator com o arranjo de eletrodos de metal (Al ou Fe) proporciona um ambiente físico/químico permitindo a desestabilização do poluente pela oxidação eletrolítica e sua coagulação, adsorção, precipitação e flutuação subsequentes, evitando a introdução de um outro agente coagulante”.

Crespilho e Rezende (2004) afirmam que a EF ocorre basicamente em quatro etapas: geração eletroquímica do agente coagulante; adsorção, neutralização e varredura; floculação; e por fim, a flotação das impurezas. Na geração eletroquímica do agente coagulante deve ocorrer o controle de vários fatores como a condutividade da solução, a resistividade do meio, e a corrente obtida que permitirão que a coagulação aconteça de maneira controlada e eficiente. Na fase de adsorção, neutralização e varredura ocorre a coagulação das partículas, ou seja, o metal carregado positivamente pode reagir com partículas de cargas negativas, formando assim novos complexos, que em soluções aquosas podem ter características gelatinosas, logo, esses complexos são responsáveis por remover contaminantes, pelo fato de adsorverem-se às partículas, originando coágulos maiores (flocos). Vale lembrar que a estabilidade do metal utilizado pode depender do pH do meio. No processo de floculação, os complexos formados na primeira etapa adsorvem-se em partículas coloidais, originando partículas maiores, que podem ser removidos por decantação, filtração ou flotação. Enfim, na fase de eletroflotação, em decorrência do potencial aplicado, microbolhas de hidrogênio podem ser formadas no cátodo, favorecendo assim o carreamento por arraste dos flocos formados.

2.3.1 Exemplos da utilização da Eletrofloculação como alternativa viável para tratamento de efluentes de diferentes segmentos industriais

Borba *et al* (2010) confirmam que a técnica da EF desperta bastante interesse devido à sua simplicidade de operação e por apresentar possibilidades de tratamento de efluentes de vários tipos de indústrias.

A eletrofloculação tem sido usada com sucesso no tratamento de poluentes orgânicos e inorgânicos de diversos seguimentos industriais, podendo ser encontrados vários trabalhos disponíveis na literatura.

Borba *et al* (2010) que utilizou eletrodos de alumínio para o tratamento de efluente de uma industria avícola, obtendo a redução de 98,4%, 99,4% e 97,6% da DQO, cor e turbidez, respectivamente.

Cerqueira (2006) fez uma aplicação do processo de eletrofloculação no tratamento de efluentes de uma indústria têxtil, realizado em um reator de batelada utilizando eletrodos de ferro e alumínio. Os resultados obtidos indicaram que o processo de eletrofloculação nas condições operacionais estudadas é uma alternativa tecnicamente viável para a remoção de DQO, cor e turbidez, a qual foi, respectivamente, de 87%, 95% e 100%.

Fornari (2008) realizou o estudo da eficiência da eletrofloculação na redução das concentrações de substâncias orgânicas e inorgânicas expressas através dos parâmetros: Demanda Química de Oxigênio (DQO), turbidez, sólidos totais e metais, principalmente o cromo, em efluente de curtume não tratado, utilizando um par de eletrodos; constatando que:

“Os experimentos realizados com reator de EF mostraram uma alta eficiência na redução da turbidez e concentração de cromo (98%). Ademais, esse sistema também pode ser utilizado na redução de outras concentrações elementares como cálcio, potássio e zinco, para ambos os tipos de eletrodos (Fe/Al). Em comparação com os eletrodos de ferro, o eletrodo de alumínio apresentou um melhor fator de redução nos valores de DQO (80%) e um bom fator de redução de ferro (50%). Por outro lado, o método de EF para o tratamento de sistema de efluentes de curtumes foi também comparado ao método convencional utilizando agentes coagulantes e floculantes, mostrando uma grande semelhança entre eles no fator de redução. No método EF não é necessário introduzir substâncias para iniciar o processo de coagulação e floculação no tratamento de efluente”.

Paschoal (2005) aplicou a tecnologia de eletrofloculação na recuperação do corante índigo blue a partir de efluentes industriais, e sugeriu que a eletrofloculação poderia ser usada como uma etapa posterior ao tratamento biológico de degradação do amido, como um caminho para recuperação do corante.

Silva (2005), afirma que o processo de eletrofloculação pode ser classificado como tratamento secundário, pois pode alcançar níveis de redução dos contaminantes superior aos tratamentos físico-químicos convencionais, pois emprega os mesmos princípios de forma potencializada, atuando tanto na fração em suspensão e dispersa, quanto em parte da fração dissolvida.

Além dessas vantagens citadas, percebe-se que em todas as pesquisas encontradas, a EF apresenta rápidos resultados, necessitando geralmente de 5 a 30 min de corrente elétrica para o tratamento do líquido proposto (LOREIRO, 2008).

Efluentes gerados por indústrias têxteis apresentam-se muito estáveis, portanto a depuração pelo meio ambiente é dificultada, conseqüentemente, o despejo sem tratamento prévio em corpos hídricos certamente acarretará em um alto nível de degradação ambiental.

2.4 VANTAGENS E DESVANTAGENS DE ALGUNS DOS MÉTODOS DE REMOÇÃO DE POLUENTES UTILIZADOS NA INDÚSTRIA TÊXTIL

Conforme o Quadro 1 pode-se visualizar vantagens e desvantagens de alguns métodos que podem ser empregados no tratamento de efluentes têxteis.

Quadro 1 - Vantagens e desvantagens das metodologias de tratamento de efluentes têxteis (JODICKE, 2001, *in* FREITAS, 2002)

| MÉTODO | VANTAGEM | DESvantAGEM |
|----------------------|---|--|
| Reagente Fenton | Efetiva descoloração de corantes | Geração de lodo |
| Ozonização | Aplicado no estado gasoso: não há a alteração no volume | Tempo de meia-vida curto (20 min) |
| Fotoquímico | Não há a produção de lodo | Formação de produtos |
| Carvão ativado | Boa remoção de uma ampla variedade de corantes | Bem expansivo |
| Turfa | Bom adsorvente devido a estrutura molecular | Baixas áreas de superfície de adsorção |
| Lascas de madeira | Boa capacidade de sorção de corantes ácidos | Requerem longos tempos de retenção |
| Filtração / membrana | Remove todos os tipos de corantes | Produção de lodo concentrado |
| Troca iônica | Regeneração: não perde adsorvente | Não é efetivo para todos os corantes |
| Irradiação | Oxidação efetiva em escala laboratorial | Requer muito oxigênio dissolvido |

A partir do Quadro 2 pode-se observar algumas vantagens e desvantagens do tratamento eletrolítico, em comparação ao tratamento de lodos ativados, que é largamente utilizado em diversos sistemas de tratamento industriais.

Quadro 2 - Comparação entre processo eletrolítico e lodos ativados no tratamento de esgotos sanitários (SPERLING, 1996; RAMALHO, 1991; WIENDI, 1985; LEITÃO e PIRES, 1991; *apud* CERQUEIRA, 2006)

| Fatores | Eletrolítico | Lodos Ativados (média) |
|---|----------------------|-------------------------------|
| Investimento (%) | 70 | 100 |
| Consumo de Energia (kWh/m ³) | 0,15 | 0,4 |
| Tempo de retenção no reator (horas) | 0,5 | 7,5 |
| Toxidez (sensibilidade) | Pouco sensível | Muito sensível |
| Sensibilidade a mudanças de pH | Baixa | Alta |
| Flexibilidade(localização / tipo de efluente) | alta | Baixa |
| Salinidade elevada | Melhora a eficiência | Muito sensível |
| Temperatura | Suporta flutuação | Faixa estreita |
| Volume de lodo úmido (comparativo) | 33 | 100 |
| Remoção de nitrogênio total (%) | 65 | 40 |
| Remoção de fosfatos (%) | 99,7 | 45 |
| Remoção de DBO (%) | 80 | 90 |
| Remoção de DQO (%) | 80 | 90 |

2.5 PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS EMPREGADOS NA CARACTERIZAÇÃO DE EFLUENTES

Sperling (2005), destaca que os principais parâmetros a serem avaliados para a verificação da qualidade da água de corpos hídricos são: parâmetros físicos (cor, turbidez, sabor e odor, temperatura, etc.); parâmetros químicos (pH, alcalinidade, acidez, nitrogênio, fósforo, oxigênio dissolvido e matéria orgânica, entre outros); e parâmetros biológicos (organismos indicadores de contaminação fecal, indicadores biológicos ou bioindicadores da qualidade da água). Então, a seguir serão abordados apenas os parâmetros diretamente ligados ao presente trabalho, tais como: turbidez, condutividade elétrica, cor e demanda química de oxigênio (DQO), pois são parâmetros largamente utilizados nas pesquisas realizadas na área, tais como Borba *et al* (2010), Cerqueira (2006), Fornari (2008), Silva (2005), Paschoal (2005), entre outros.

2.5.1 Turbidez

Vaz (2009) explica que a determinação da turbidez permite evidenciar alterações na água, pois quando a água possui elevadas concentrações de turbidez, as partículas em suspensão refletem a luz, fazendo com que a esta não chegue aos organismos aquáticos, impossibilitando assim, processos como o de fotossíntese.

Além disso, alguns vírus e bactérias podem se alojar nas partículas em suspensão, ficando protegidos assim da ação de desinfetantes, passando a turbidez a ser considerada também sob o ponto de vista sanitário (SANTOS, 2007, *apud* VAZ, 2009).

2.5.2 Condutividade Elétrica

Cerqueira (2006) explica que a condutividade do efluente é dependente da quantidade de íons condutores presentes no líquido, e estes íons são os responsáveis pela condução da corrente elétrica. Então, associa-se que quanto maior a concentração desses íons no efluente, maior será sua capacidade de condução de corrente elétrica e maior será a possibilidade de ocorrência de reações entre as substâncias presentes no efluente, sendo assim, um fator positivo que possibilita a redução do consumo energético.

2.5.3 Cor

A partir da década de 70, avaliar a cor da água passou a ser uma medida importante no controle de qualidade da água, pois foi comprovado que os materiais dissolvidos, causadores da cor, são precursores de substâncias potencialmente carcinogênicas. Sendo assim, a cor do corpo hídrico, ou do efluente, passou a ser associado a inconvenientes sanitários (LEAL e LIBÂNIO, 2002). Lembrando que, além disso, a cor nas águas pode suprimir os processos fotossintéticos nos cursos d'águas (DA SILVA *et al.*, 2004).

2.5.4 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A Demanda Química de Oxigênio é frequentemente utilizada na detecção de poluição em águas naturais e residuárias, pois é um parâmetro utilizado para estimar de modo indireto a quantidade de oxigênio dissolvido, que será consumido na degradação da matéria orgânica (MO) presente no ambiente aquático ou numa solução aquosa residuária (HANSON, 1992 *apud* MENDES, ...)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O efluente utilizado neste experimento foi coletado numa indústria têxtil, localizada no município de Céu Azul (PR), no dia 20 de abril de 2011. O efluente foi transportado em embalagens plásticas PET de 2L e armazenadas no congelador para posteriores análises.

As análises foram efetuadas no efluente bruto, na testemunha e no efluente tratado (eletrofloculado) para fins de avaliação da eficiência da técnica.

3.1 MÓDULO EXPERIMENTAL

O estudo consistiu em aplicar a técnica de eletrofloculação em um efluente têxtil, onde o sistema alvo da pesquisa incidiu em um reator em batelada de bancada (béquer de 1L), o qual comportou os eletrodos de sacrifício (alumínio com 100 mm de comprimento x 50 mm de largura e 0,6 mm de espessura), assim como o efluente líquido a ser tratado. Os eletrodos por sua vez foram conectados a uma fonte de corrente contínua (Fonte de alimentação Modelo FA-3050, Marca: *Instrutherm*) de modo a viabilizar a eletrofloculação.

Foram utilizados dois eletrodos de alumínio por corrida experimental, conectados de forma independentes, sem contato direto entre si, como pode ser visto na Figura 2, e eles não eram reutilizados. A utilização de dois eletrodos por corrida se deve ao fato de buscar o menor custo operacional possível.



Figura 2 – Sistema da montagem dos eletrodos

3.1.1 Planejamento experimental

Utilizou-se o Delineamento Composto Central Rotacional, avaliando-se três variáveis: intensidade de corrente elétrica, condutividade elétrica e tempo de reação. A partir do planejamento fatorial completo 2^n ($n=3$) obteve-se 8 ensaios, então foram adicionados 4 pontos centrais e 6 pontos axiais para que fosse possível a obtenção do modelo quadrático. Portanto, o total de ensaios foi de 18.

Além do cálculo dos efeitos, o DCCR propicia a obtenção do modelo codificado, o qual está disposto na Tabela 1.

Tabela 1 – Matriz do delineamento experimental

| Ensaio | Tempo | Corrente | Condutividade |
|--------|-------|----------|---------------|
| 1 | -1 | -1 | -1 |
| 2 | 1 | -1 | -1 |
| 3 | -1 | 1 | -1 |
| 4 | 1 | 1 | -1 |
| 5 | -1 | -1 | 1 |
| 6 | 1 | -1 | 1 |
| 7 | -1 | 1 | 1 |
| 8 | 1 | 1 | 1 |
| 9 | 1,73 | 0 | 0 |
| 10 | -1,73 | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 1,73 | 0 |
| 12 | 0 | -1,73 | 0 |
| 13 | 0 | 0 | 1,73 |
| 14 | 0 | 0 | -1,73 |
| 15 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | 0 | 0 | 0 |
| 17 | 0 | 0 | 0 |
| 18 | 0 | 0 | 0 |

Na Tabela 2 estão expressos os valores referentes aos níveis estudados para os fatores: tempo de reação, intensidade de corrente e condutividade.

Tabela 2 – Níveis estudados para as variáveis independentes

| Variável | -1,73 | -1 | 0 | 1 | 1,73 |
|------------------------------------|-------|-----|------|-----|-------|
| Tempo de reação (min) | 4,44 | 7 | 10,5 | 14 | 16,55 |
| Intensidade de corrente (A) | 0,95 | 1,5 | 2,25 | 3 | 3,55 |
| Condutividade (mS/cm) | 2,13 | 2,5 | 3 | 3,5 | 3,86 |

Para assegurar que a ordem dos ensaios não exercesse qualquer influência nos resultados, fez-se um sorteio para determinar a ordem dos experimentos, intercalando a cada duas análises sorteadas um ponto central.

3.1.2 Procedimento experimental

Seguindo a ordem do sorteio, ajustava-se a condutividade das amostras conforme a matriz da Tabela 1. Para medir a condutividade, utilizou-se uma sonda multiparâmetros (marca Hanna, modelo HI 769828) e após medir a condutividade correspondente a amostra, adicionava-se cloreto de sódio P.A. até obter a condutividade desejada.

Posteriormente fazia-se a eletrofloculação das respectivas amostras, conforme observado na Figura 3, ajustando a intensidade de corrente e controlando o tempo conforme já estabelecido pela matriz da Tabela 2.



Figura 3 – Montagem experimental para realizar a eletrofloculação

Realizada a eletrofloculação, deixava-se as amostras em repouso numa bancada, por 24 horas, para a flotação/decantação das mesmas, conforme pode-se ver na Figura 4. Para fazer as análises de cor, turbidez e DQO a amostra foi retirada do efluente, no centro do béquer. Esta amostragem era realizada com o auxílio de uma mangueira adaptada a uma seringa.

Para a obtenção de testemunhas, para cada ensaio, o efluente bruto foi submetido a agitação magnética paralelamente, deixando flotar/decantar

juntamente com as demais amostras, para posterior análise de cor, turbidez e DQO, não sendo necessário o ajuste de condutividade.



Figura 4 - Decantação das amostras

3.2 PARÂMETROS AVALIADOS

Todas as determinações analíticas foram realizadas em duplicata, sendo considerados apenas os valores médios destas medidas. As análises de cor foram realizadas em um espectrofotômetro FEMTO 700 *plus*, ajustado para o comprimento de onda de 400 nanômetros. Para as análises de DQO foram realizadas a partir do método colorimétrico, de acordo com metodologia sugerida por APHA (2005); e para a medição da turbidez, utilizou-se o Turbidímetro marca TecnoPON, modelo Hayonik.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 EFICIÊNCIA DO TRATAMENTO

Como pode ser visto na Tabela 3 e na Figura 5, a eficiência do tratamento do efluente têxtil pela eletrofloculação apresentou resultados de 51,05 até 85,36% na remoção de DQO(mg/L).

Tabela 3 - Eficiência da remoção de DQO (mg/L).

| Ensaio | DQO (mg/L) Bruto | DQO (mg/L) Eletrofloculado | DQO (mg/L) Testemunha | Eficiência (%) Eletrofloculado | Eficiência (%) Testemunha |
|--------------|---------------------|-------------------------------|--------------------------|-----------------------------------|------------------------------|
| 1 | 499,41 | 244,47 | 289,39 | 51,05 | 42,05 |
| 2 | 596,85 | 226,90 | 303,15 | 61,98 | 49,21 |
| 3 | 574,25 | 277,73 | 329,98 | 51,64 | 42,54 |
| 4 | 365,95 | 59,11 | 93,96 | 83,85 | 74,32 |
| 5 | 353,98 | 51,81 | 102,65 | 85,36 | 71,00 |
| 6 | 458,47 | 82,88 | 153,48 | 81,92 | 66,52 |
| 7 | 518,83 | 188,63 | 263,89 | 63,64 | 49,14 |
| 8 | 352,46 | 98,81 | 134,63 | 71,97 | 61,80 |
| 9 | 399,17 | 72,43 | 176,07 | 81,85 | 55,89 |
| 10 | 499,41 | 228,69 | 262,68 | 54,21 | 47,40 |
| 11 | 596,85 | 212,78 | 300,33 | 64,35 | 49,68 |
| 12 | 305,99 | 91,06 | 104,61 | 70,24 | 65,81 |
| 13 | 518,83 | 200,77 | 266,32 | 61,30 | 48,67 |
| 14 | 296,31 | 77,51 | 94,93 | 73,84 | 67,96 |
| 15 | 574,25 | 259,38 | 298,91 | 54,83 | 47,95 |
| 16 | 388,28 | 93,01 | 98,81 | 76,05 | 74,55 |
| 17 | 362,45 | 65,93 | 139,36 | 81,81 | 61,55 |
| 18 | 357,30 | 58,14 | 93,96 | 83,73 | 73,70 |
| Média | 445,50 | 143,89 | 194,84 | 69,65 | 58,32 |

A partir da Figura 5 têm-se uma melhor visualização da remoção de DQO pela eletrofloculação, em comparação às testemunhas. O resultado do Teste T(Tukey) para o comparativo entre as médias dos ensaios de eletrofloculação (69,65%) e as testemunhas (58,32%) apresentou p-valor igual á 0,006, portanto, < 0,05, assim pode-se concluir que as médias diferem entre

si, com 95% de confiabilidade. Então, a partir dos resultados deste teste, é possível perceber que o tratamento por eletrofloculação foi significativo em relação a remoção da DQO.

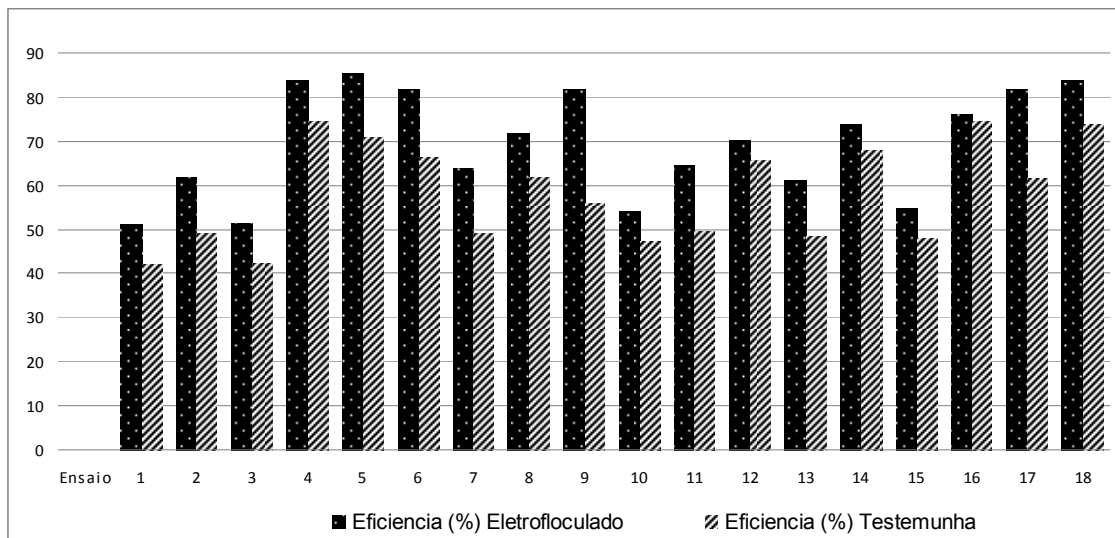


Figura 5 – Representação gráfica da eficiência na remoção da DQO (%)

Pode-se observar na Tabela 4 e na Figura 6, que a eficiência na remoção de turbidez apresentou valores de 77,16 até 99,44%.

Tabela 4 - Eficiência na remoção de turbidez

| Ensaio s | Turbidez (NTU) Bruto | Turbidez (NTU) Eletrofloculado | Turbidez (NTU) Testemunha | Eficiência (%) Eletroflocula do | Eficiência (%) Testemunh a |
|--------------|----------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 142,00 | 0,80 | 15,80 | 99,44 | 88,87 |
| 2 | 130,00 | 5,35 | 37,10 | 95,88 | 71,46 |
| 3 | 102,00 | 1,06 | 15,60 | 98,96 | 84,71 |
| 4 | 146,00 | 26,50 | 16,40 | 81,85 | 88,77 |
| 5 | 170,00 | 6,49 | 18,00 | 96,18 | 89,41 |
| 6 | 103,00 | 22,10 | 16,30 | 78,54 | 84,17 |
| 7 | 220,00 | 27,40 | 20,60 | 87,55 | 90,64 |
| 8 | 169,00 | 22,20 | 14,70 | 86,86 | 91,30 |
| 9 | 101,00 | 17,10 | 24,20 | 83,07 | 76,04 |
| 10 | 142,00 | 20,40 | 16,60 | 85,63 | 88,31 |
| 11 | 102,00 | 15,30 | 18,80 | 85,00 | 81,57 |
| 12 | 96,30 | 20,30 | 17,50 | 78,92 | 81,83 |
| 13 | 220,00 | 28,80 | 23,80 | 86,91 | 89,18 |
| 14 | 102,00 | 23,30 | 9,37 | 77,16 | 90,81 |
| 15 | 130,00 | 26,60 | 33,40 | 79,54 | 74,31 |
| 16 | 133,00 | 21,50 | 22,50 | 83,83 | 83,08 |
| 17 | 170,00 | 22,50 | 24,10 | 86,76 | 85,82 |
| 18 | 137,00 | 22,40 | 19,10 | 83,65 | 86,06 |
| Média | 139,74 | 18,34 | 20,22 | 86,43 | 84,80 |

A partir da Figura 6 se tem uma melhor visualização da remoção de turbidez pela eletrofloculação, em comparação às testemunhas, podendo-se observar que várias testemunhas tiveram uma remoção maior do que o efluente tratado. O resultado do Teste T(Tukey) para o comparativo entre as médias dos ensaios de eletrofloculação (86,43%) e as testemunhas (84,80%) apresentou p-valor igual a 0,45, portanto, maior do que 0,05, assim pode-se concluir que as médias não diferem entre si, com 95% de confiabilidade. Então, a partir dos resultados deste teste é possível perceber que o tratamento por eletrofloculação não foi significativo em relação a remoção da turbidez.

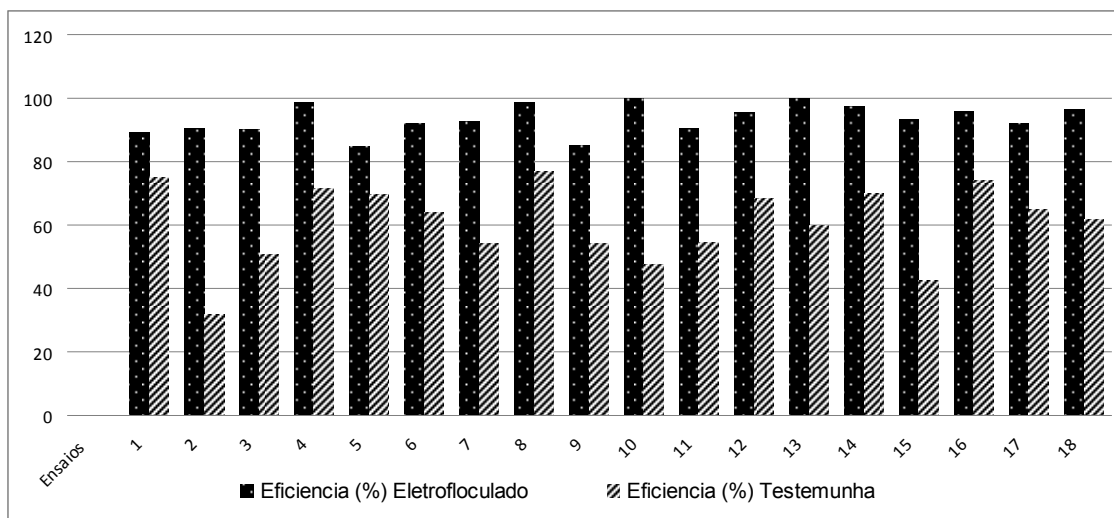


Figura 6 – Representação gráfica da eficiência na remoção da Turbidez (%)

Como pode-se observar na Tabela 5, os resultados do processo de eletrofloculação para remoção de cor são os mais satisfatórios dos parâmetros avaliados, sendo alcançados valores de 84,94 até 100% de eficiência na remoção da cor.

Tabela 5 – Eficiência na remoção da cor

| Ensaio | Cor (λ 400) | Cor (λ 400) | Cor (λ 400) | Eficiência (%) | Eficiência (%) |
|--------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------|----------------|
| | Bruto | Eletrofloculado | Testemunha | Eletrofloculado | Testemunha |
| 1 | 0,152 | 0,016 | 0,038 | 89,47 | 75,00 |
| 2 | 0,357 | 0,034 | 0,242 | 90,48 | 32,21 |
| 3 | 0,272 | 0,026 | 0,134 | 90,44 | 50,74 |
| 4 | 0,351 | 0,005 | 0,1 | 98,58 | 71,51 |
| 5 | 0,425 | 0,064 | 0,128 | 84,94 | 69,88 |
| 6 | 0,328 | 0,026 | 0,118 | 92,07 | 64,02 |
| 7 | 0,245 | 0,017 | 0,112 | 93,06 | 54,29 |
| 8 | 0,335 | 0,004 | 0,077 | 98,81 | 77,01 |
| 9 | 0,309 | 0,045 | 0,141 | 85,44 | 54,37 |
| 10 | 0,152 | 0 | 0,08 | 100,00 | 47,37 |
| 11 | 0,268 | 0,025 | 0,121 | 90,67 | 54,85 |
| 12 | 0,287 | 0,013 | 0,09 | 95,47 | 68,64 |
| 13 | 0,245 | 0 | 0,098 | 100,00 | 60,00 |
| 14 | 0,277 | 0,007 | 0,083 | 97,47 | 70,04 |
| 15 | 0,364 | 0,025 | 0,209 | 93,13 | 42,58 |
| 16 | 0,372 | 0,015 | 0,096 | 95,97 | 74,19 |
| 17 | 0,437 | 0,034 | 0,153 | 92,22 | 64,99 |
| 18 | 0,34 | 0,01 | 0,13 | 96,47 | 61,76 |
| Média | 0,31 | 0,02 | 0,12 | 93,59 | 60,75 |

A partir da observação da média das eficiências da eletrofloculação, 93,59%, em comparação com a média das testemunhas, 60,75%, e com base no Teste T(Tukey), tem-se um p-valor de $2,42 \times 10^{-12}$, portanto, $< 0,05$, pode-se dizer então, com 95% de confiabilidade, que as médias diferem entre si.

A partir da Figura 7 têm-se uma boa visualização da grande eficiência na remoção de cor, comparado com as testemunhas.

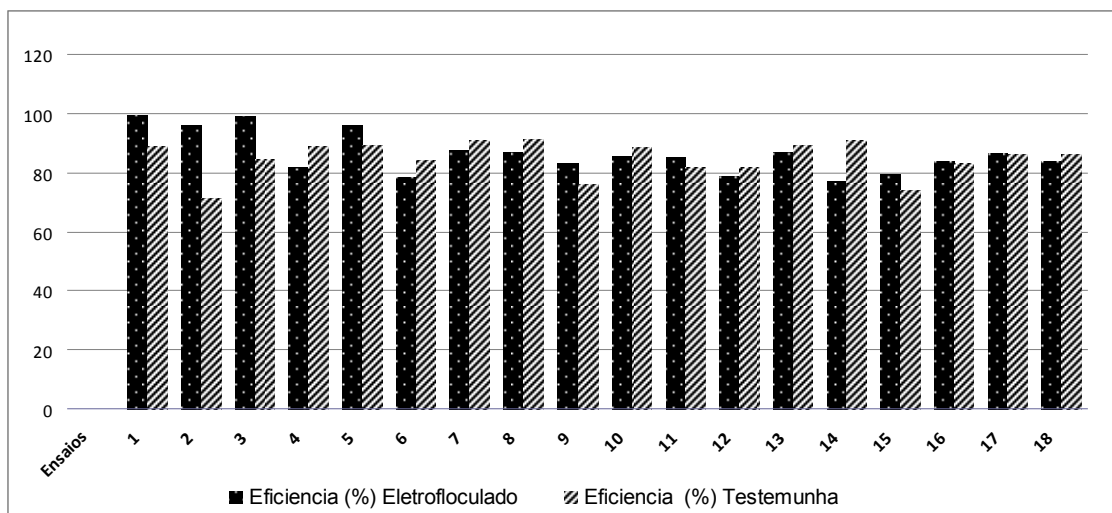


Figura 7 - Representação gráfica da eficiência na remoção da Cor (%)

4.2 DETERMINAÇÃO DA REGIÃO ÓTIMA PARA CONDIÇÕES OPERACIONAIS POR ANÁLISE DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

Segundo a análise estatística realizada com o auxílio do suplemento Action para o software Excel, pode-se saber se um fator é significativo, quando o p-valor for menor que 0,05. Como pode ser visto na Tabela 6, a análise dos resultados para a DQO mostrou que apenas a variável tempo(t) foi significativa, ficando então a remoção da DQO para as variáveis codificadas(t'), seguindo a seguinte equação:

$$\text{Remoção da DQO}(\%) = 70,89 + 6,86 t'$$

$$t' = \frac{t - 10,05}{3,5}$$

Logo, a remoção da DQO, em valores reais é de:

$$\text{Remoção da DQO}(\%) = 74,09 + 6,86 \frac{t - 10,5}{3,5}$$

Tabela 6 - Coeficientes do modelo quadrático para a DQO

| Fator | Efeito | Coeficiente | P-valor |
|----------------|----------|-------------|----------|
| média | - | 70,8864416 | 8,77E-06 |
| t | 13,72456 | 6,86228174 | 0,048121 |
| i | -2,76133 | -1,3806647 | 0,64519 |
| c | 4,665561 | 2,33278039 | 0,443152 |
| t ² | -1,40978 | -0,7048883 | 0,825473 |
| i ² | -1,90428 | -0,9521401 | 0,766154 |
| c ² | -1,71383 | -0,8569148 | 0,788827 |
| t.i | 8,285 | 4,1425 | 0,311198 |
| t.c | -9,585 | -4,7925 | 0,247117 |
| i.c | -13,55 | -6,775 | 0,117416 |

A análise dos resultados para a Turbidez, a partir do modelo quadrático, mostrou que nenhuma das variáveis foi significativa, ficando a remoção da turbidez igual à média da eficiência do efluente tratado, em torno de 83,43% para qualquer condição avaliada aplicada, como pode ser visto na Tabela 7.

Tabela 7 - Coeficientes do modelo quadrático para a turbidez.

| Fator | Efeito | Coeficiente | P-valor |
|----------------|----------|-------------|----------|
| média | - | 83,4290256 | 5,09E-08 |
| t | -6,21041 | -3,1052067 | 0,213057 |
| i | -0,61514 | -0,3075691 | 0,896704 |
| c | -1,44897 | -0,7244848 | 0,760335 |
| t ² | 3,622435 | 1,81121731 | 0,457276 |
| i ² | 2,025321 | 1,01266073 | 0,673894 |
| c ² | 2,07544 | 1,03772004 | 0,666397 |
| t.i | 0,85 | 0,425 | 0,892081 |
| t.c | 0,585 | 0,2925 | 0,925583 |
| i.c | 3,55 | 1,775 | 0,574723 |

A análise dos resultados para a Cor, a partir do modelo quadrático, mostrou que nenhuma das variáveis foi significativa, ficando a remoção da cor igual à média da eficiência do efluente tratado, em torno de 94,45% para qualquer condição avaliada aplicada, como pode ser visto na Tabela 8.

Tabela 8 - Coeficientes do modelo quadrático para a cor

| Fator | Efeito | Coeficiente | P-valor |
|----------------|------------|-------------|----------|
| média | - | 94,45 | 9,92E-10 |
| t | -0,4560054 | -0,2280027 | 0,888739 |
| i | 2,23312217 | 1,11656108 | 0,499489 |
| c | 0,6144661 | 0,30723305 | 0,850551 |
| t ² | -2,1545212 | -1,0772606 | 0,518511 |
| i ² | -1,9206344 | -0,9603172 | 0,563836 |
| c ² | 1,86499161 | 0,93249581 | 0,574948 |
| t.i | 1,435 | 0,7175 | 0,73991 |
| t.c | 0,935 | 0,4675 | 0,8284 |
| i.c | 1,445 | 0,7225 | 0,738176 |

Apesar de apenas a variável tempo ter sido significativa para a remoção da DQO, buscando refinar as variáveis resposta, foram analisados os gráficos de superfície de resposta para a determinação dos valores ótimos de tempo, condutividade elétrica e intensidade de corrente.

Para isto, os resultados obtidos no planejamento foram plotados em gráficos 2D e 3D de superfície de resposta (Figuras do apêndice), podendo-se então ter uma melhor visualização da eficiência da remoção da DQO, Turbidez e Cor, em função do tempo, intensidade de corrente, e condutividade elétrica, quando uma das variáveis é fixada ao valor codificado de 0.

A partir da Figura 8 nota-se uma melhor eficiência quando o tempo fica entre os valores codificados de 0 a 1,73, pois este intervalo é o que mais se repete em relação aos gráficos de superfície de resposta analisados.

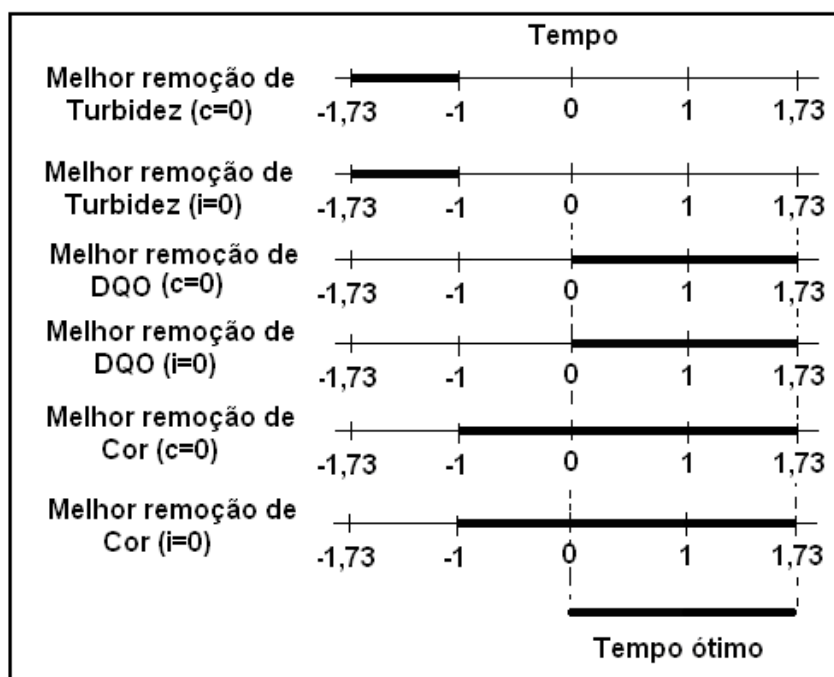


Figura 8 - Avaliação dos melhores resultados para o tempo.

A partir da Figura 9 pode-se observar que quando os valores de tempo e condutividade são fixados em 0 (em valores codificados), a melhor eficiência é observada quando os valores da intensidade de corrente, em valores codificados, apresentam-se entre 1 a 1,73.

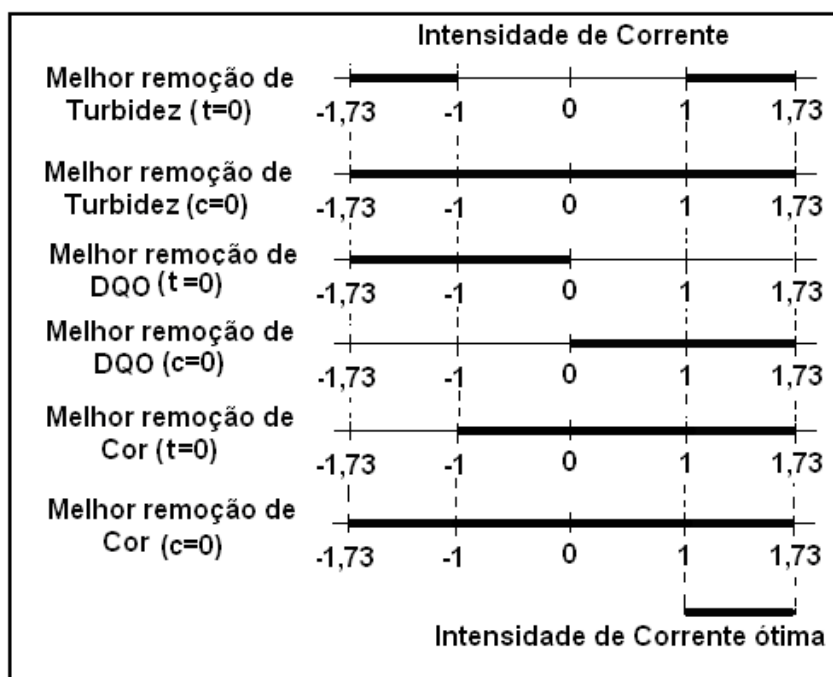


Figura 9 - Avaliação dos melhores resultados para a intensidade de corrente

Pode-se observar, a partir da Figura 10, que quando os valores de tempo e intensidade de corrente são fixados em 0 (em valores codificados), a melhor eficiência é observada quando os valores da condutividade, em valores codificados, apresentam-se entre -1,73 a -1, e 1 a 1,73.

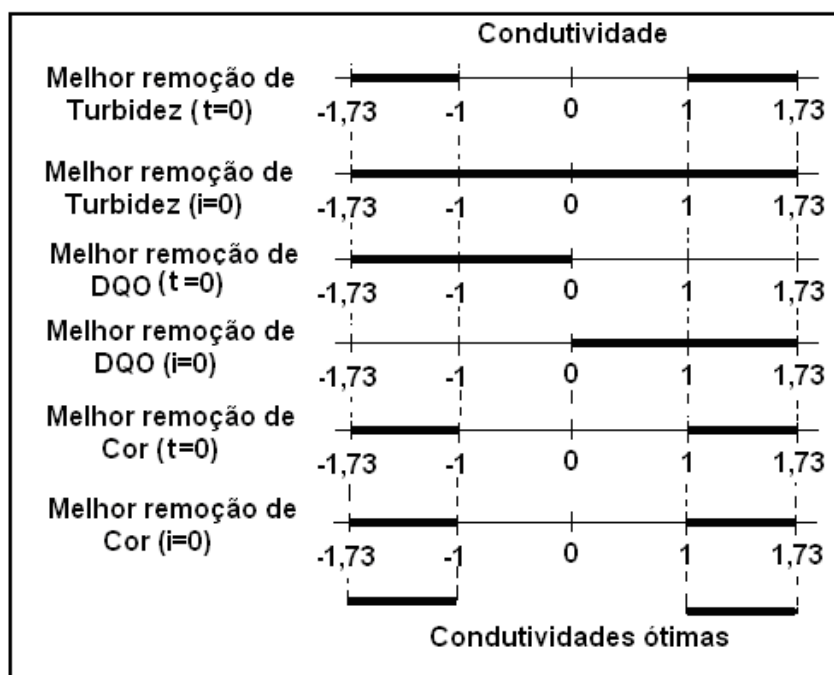


Figura 10 - Avaliação dos melhores resultados para a condutividade

Portanto, mesmo os resultados analisados pelo modelo quadrático apontaram que apenas a variável tempo, para a remoção de DQO foi significativa, a partir do conjunto de todas as variáveis analisadas, é possível observar nas Figuras 8, 9 e 10 uma tendência a melhor eficiência quando o tempo, em valores codificados, for de 0 a 1,73; a intensidade de corrente for de 1 a 1,73, em valores codificados, e a condutividade estiver entre -1,73 a -1 ou de 1 a 1,73, em valores codificados.

5. CONCLUSÕES

Para faixa de valores estudada, apenas a variável tempo se mostrou significativa estatisticamente para a remoção de DQO a 5% de significância. Porém, foi possível determinar uma região ótima para os valores de tempo de reação, condutividade elétrica e intensidade de corrente, de modo a proporcionar um resultado apurado na remoção de turbidez, DQO e cor.

Como os valores de condutividade elétrica do efluente bruto eram inferiores a 2,13 (mS/cm), o menor valor de condutividade testado, sugere-se que seja usado a condutividade ótima de -1,73 a -1, em valores codificados, em uma possível aplicação na indústria, pois assim seriam necessários menores concentrações do produto químico utilizado para fazer o controle da condutividade, diminuindo assim, os custos operacionais e causando menor passivo ambiental, caso este elemento apresente alguma alteração no efluente tratado.

Quanto a eficiência do tratamento por eletrofloculação, observou-se que este foi mais significativo quando analisadas as variáveis DQO e cor.

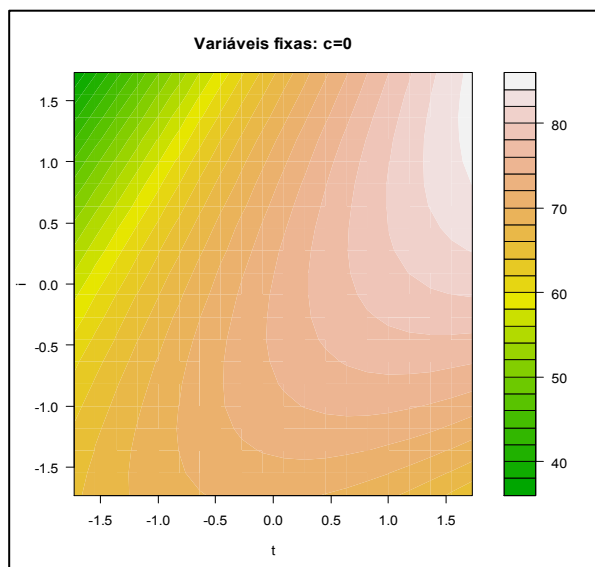
Portanto a principal contribuição deste trabalho foi avaliar os efeitos do tempo, condutividade, intensidade de corrente sobre as variáveis resposta: turbidez, cor e DQO.

6. SUGESTÕES

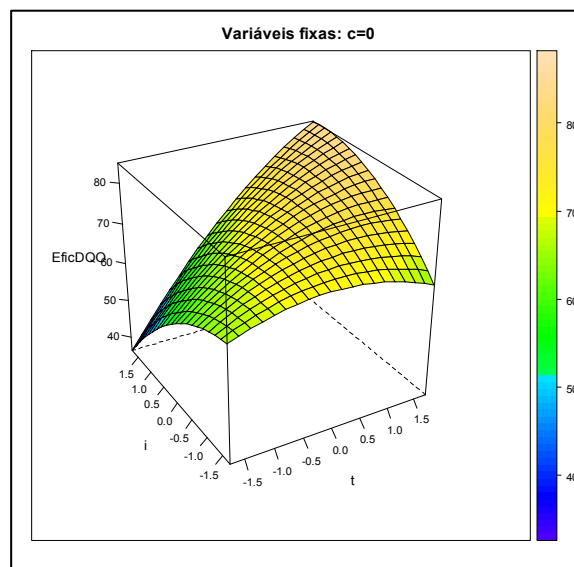
Como sugestão para trabalhos futuros, tem-se a aplicação do Controle Estatístico de Processos, avaliando-se a vida útil do conjunto de eletrodos de Alumínio, operando sob condições otimizadas.

Sugere-se também que se faça a análise do efluente tratado para verificar se o corante índigo blue (que provavelmente é o mais utilizado pela indústria em questão), não foi transformado em outra substância tóxica.

APÊNDICE – GRÁFICOS DE SUPERFÍCIE DE RESPOSTA

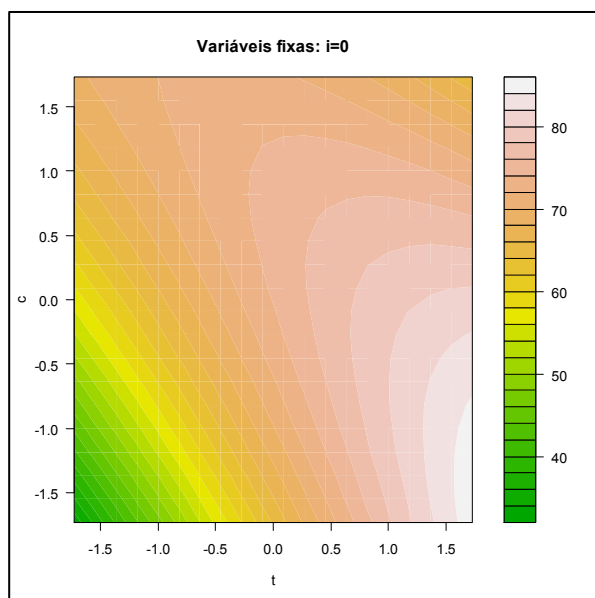


(a)

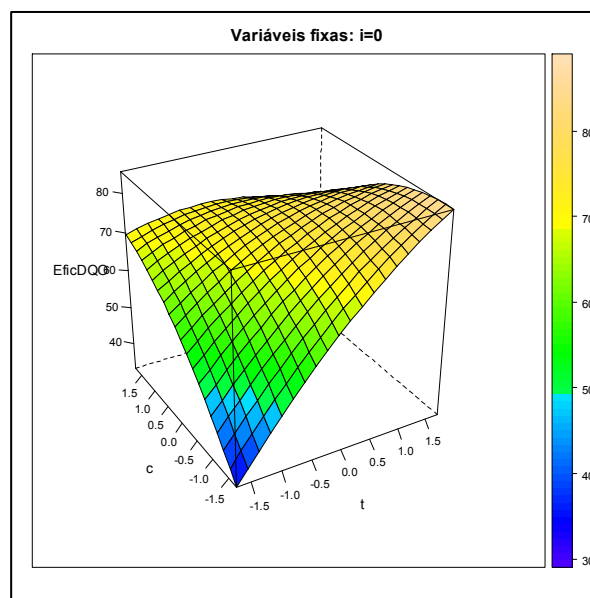


(b)

Figuras dos gráficos 2D (a) e 3D (b) para a remoção de DQO, representando a faixa ótima para os valores de intensidade de corrente e tempo, quando a condutividade está fixada em 0.



(a)



(b)

Figura dos gráficos 2D (a) e 3D (b) para a remoção de DQO, representando a faixa ótima para os valores de condutividade e tempo, quando a intensidade de corrente está fixada em 0.

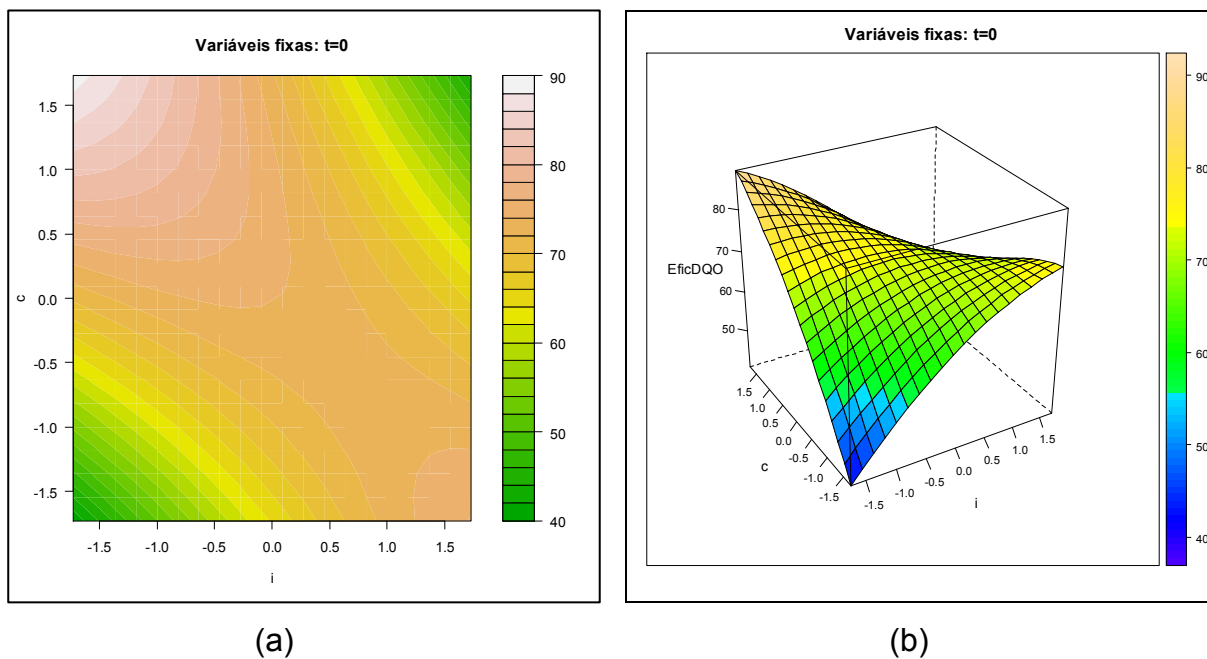


Figura dos gráficos 2D (a) e 3D (b) para a remoção de DQO, representando a faixa ótima para os valores de condutividade e intensidade de corrente, quando o tempo está fixada em 0.

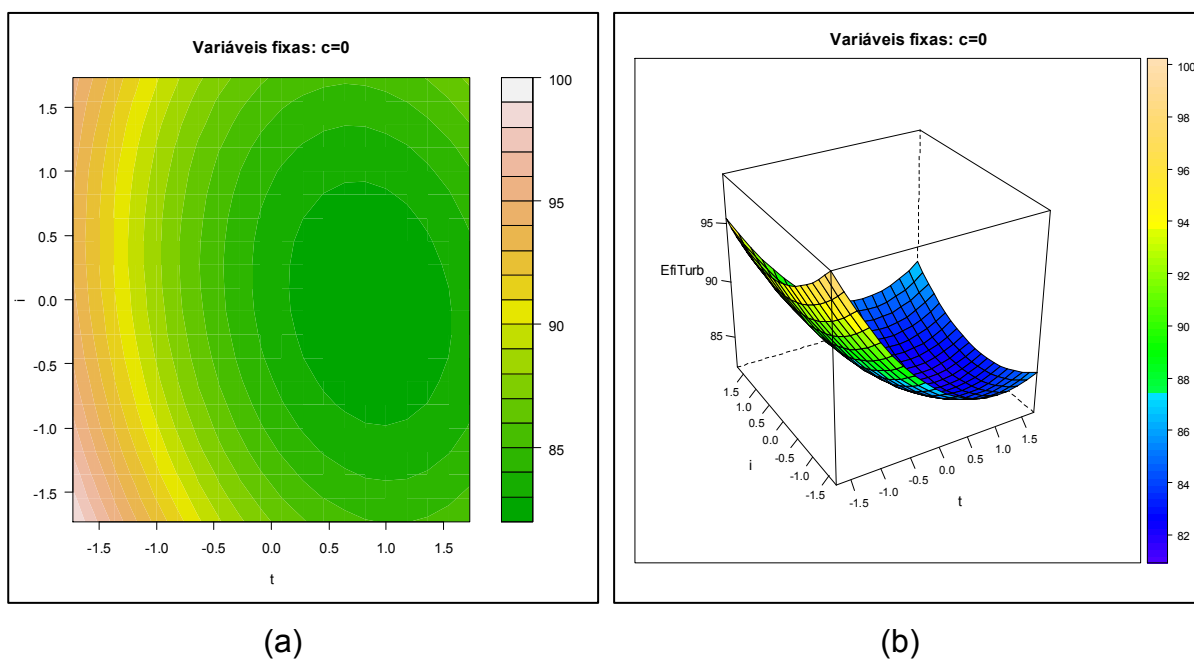


Figura dos gráficos 2D (a) e 3D (b) para a remoção de Turbidez, representando a faixa ótima para os valores de intensidade de corrente e tempo, quando a condutividade está fixada em 0.

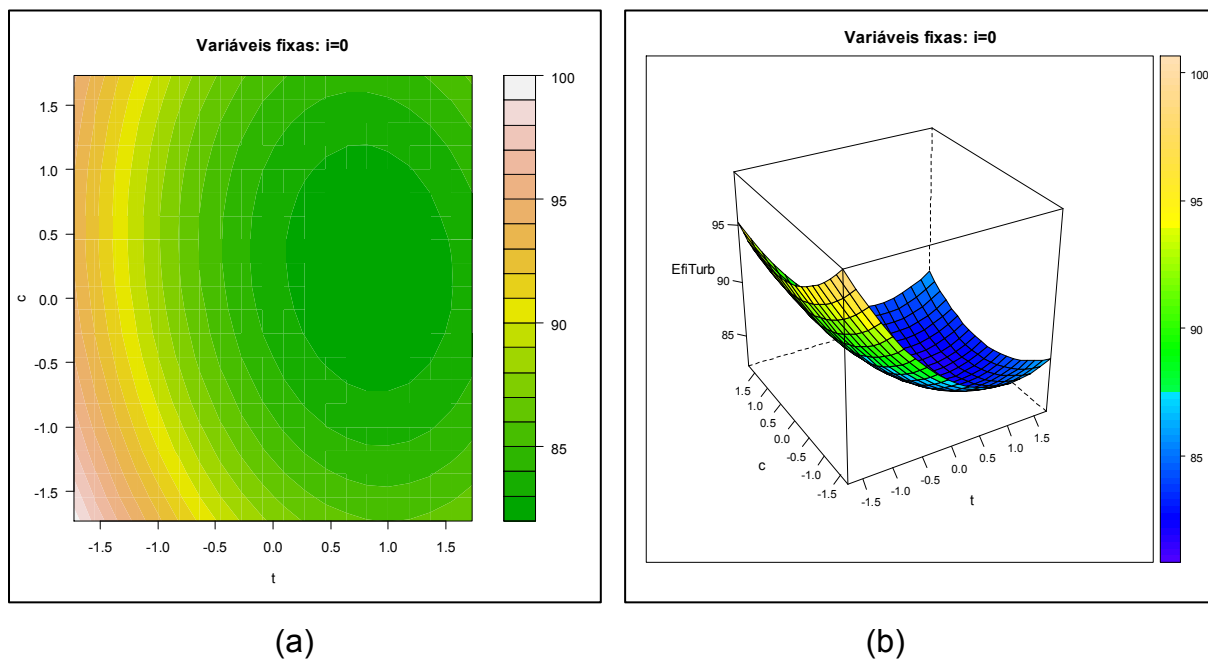


Figura dos gráficos 2D (a) e 3D (b) para a remoção de Turbidez, representando a faixa ótima para os valores de condutividade e tempo, quando a intensidade de corrente está fixada em 0.

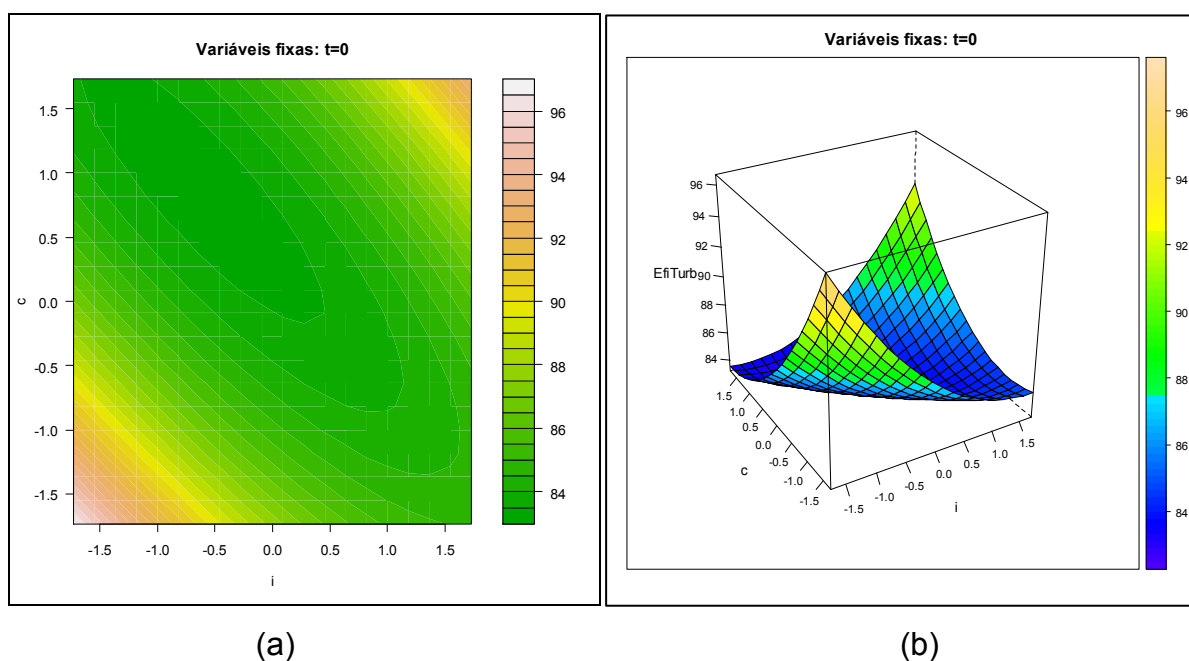
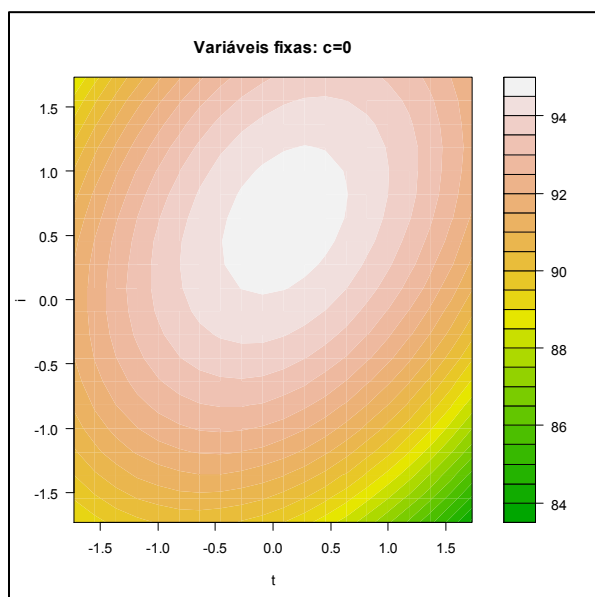
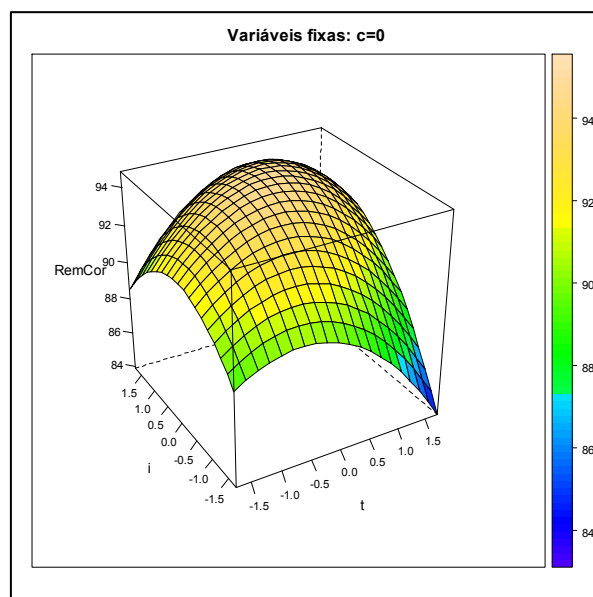


Figura dos gráficos 2D (a) e 3D (b) para a remoção de Turbidez, representando a faixa ótima para os valores de condutividade e intensidade de corrente, quando o tempo está fixada em 0.

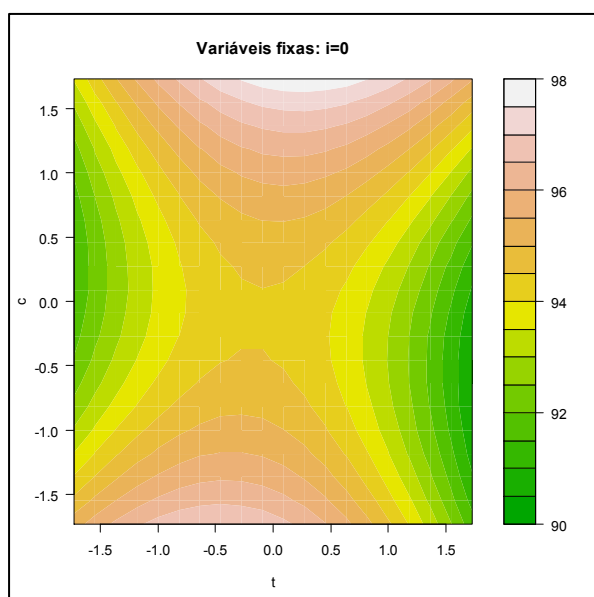


(a)

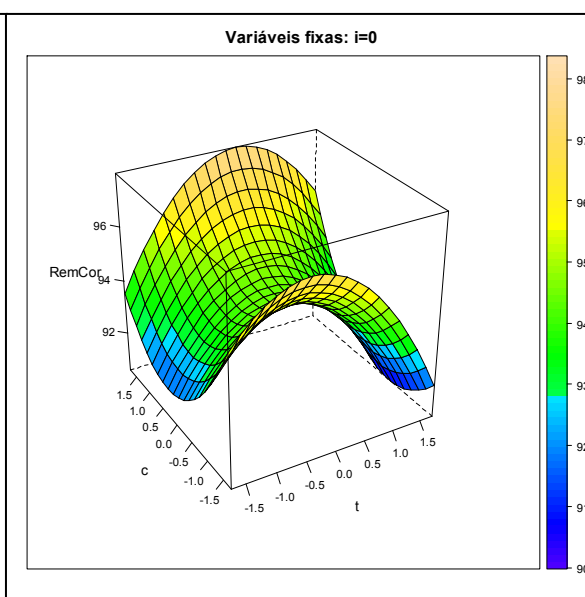


(b)

Figura dos gráficos 2D (a) e 3D (b) para a remoção de Cor, representando a faixa ótima para os valores de intensidade de corrente e tempo, quando a condutividade está fixada em 0.



(a)



(b)

Figura dos gráficos 2D (a) e 3D (b) para a remoção de Cor, representando a faixa ótima para os valores de condutividade e tempo, quando a intensidade de corrente fixada em 0.

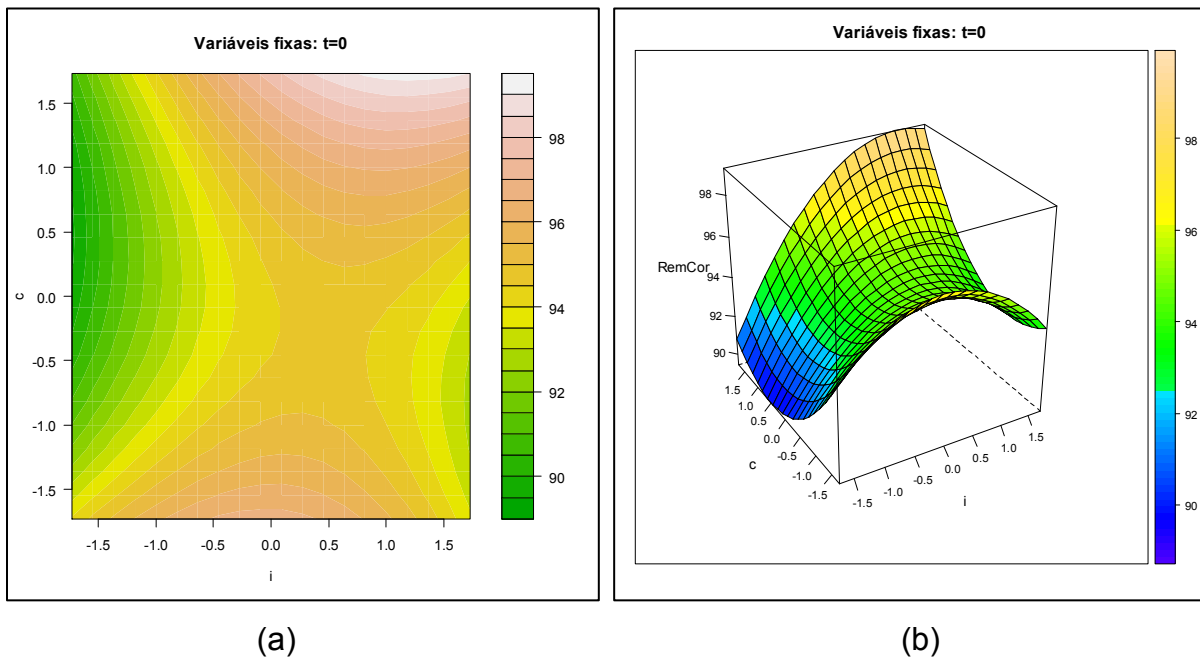


Figura dos gráficos 2D (a) e 3D (b) para a remoção de Cor, representando a faixa ótima para os valores de condutividade e intensidade de corrente, quando o tempo é fixado em 0.

REFERÊNCIAS

ABIQUIM - Associação Brasileira da Indústria Química. **Corantes e Pigmentos: Usos De Corantes, Pigmentos E Branqueadores Ópticos.** Disponível em: <http://www.abiquim.org.br/corantes/cor_aplicacoes.asp> Acesso em 06 de junho de 2011.

ABIT – Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção. **Dados gerais do setor atualizados em 2011, referentes ao ano de 2010.** Disponível em:<http://www.abit.org.br/site/navegacao.asp?id_menu=1&id_sub=4&idioma=PT> Acesso em 10 de junho de 2011.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA. **Standard methods for the Examination of Water and Wastewater.** 21^a ed. Estados Unidos da América, 2005.

BORBA, Fernando Henrique *et al.* **Avaliação da eficiência da técnica de eletro-floculação no tratamento de efluentes de indústrias de subprodutos avícolas,** 2010. Disponível em <http://www.tratamentodeagua.com.br/R10/Biblioteca_Detalhe.aspx?codigo=1107> Acesso em 7 de novembro de 2010.

BARROS, Marcos José; NOZAKI, Jorge. **Redução De Poluentes De Efluentes Das Indústrias De Papel E Celulose Pela Floculação/Coagulação E Degradação Fotoquímica,** 2001. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/%0D/qn/v25n5/11401.pdf>> Acesso em 20 de abril de 2011.

BEZERRA, Alisson Augusto Maia, *et al.* **Aplicação da Coagulação/Floculação como Pré-Tratamento ao Processo UV-Peróxido no Tratamento de Efluente Têxteis,** 2006. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/uruguay30/IV-BEZERRA-Brasil.pdf>> Acesso em 10 de maio de 2011.

BNDES Setorial, **Panorama da Cadeia Produtiva Têxtil e de Confecções e a Questão da Inovação**. Rio de Janeiro, n. 29, p. 159-202, mar. 2009. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/Set2905.pdf> Acesso em 12 de maio de 2011.

CERQUEIRA, A. A.; RUSSO, C. **Aplicação da técnica de eletrofloculação no tratamento de efluentes têxteis**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Química pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2006.

CRESPILHO, Frank Nelson, REZENDE, Maria Olímpia Oliveira **Eletroflotação - Princípios e Aplicações**. São Carlos: Editora Rima, 2004.

DA SILVA, M. R. A.; DE OLIVEIRA, M. C.; NOGUEIRA, R. F. P. 2004. **Estudo da aplicação do processo foto-Fenton solar na degradação de efluentes de indústria de tintas, 2004** Instituto de Química UNESP – Araraquara, SP. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-46702004000200003&lng=pt&nrm=iso&tlng=pt> Acesso em 15 de maio de 2011.

DELLAMATRICE, Priscila Maria, **Biodegradação e toxicidade de corantes têxteis e efluentes da ETA de Americana**. Tese de Doutorado. Curso de Doutorado em Ecologia de Agroecossistemas pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP, 2005. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/91/91131/tde-21022006-160612/pt-br.php>> Acesso em 30 de outubro de 2010.

FORNARI, Marilda Menchon Tavares, **Aplicação da técnica de eletrofloculação no tratamento de efluentes de curtume**. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná, *campus* Toledo, 2008.

FREITAS, Kátya Regina, **Caracterização e reuso de Efluentes do Processo de Beneficiamento da Indústria Têxtil**. 2002. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química pela Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <<http://www2.enq.ufsc.br/teses/m088.pdf>> Acesso em 10 de maio de 2011.

FURIGO JR, Agenor; *et al.* **Biotecnologia Aplicada À Indústria Têxtil**, 2004. Disponível em: <http://www.enq.ufsc.br/labs/probio/disc_eng_bioq/trabalhos_pos2004/textil/biotecnologia-industriatextil.htm> Acesso em 20 de maio de 2011.

IMMICH, Ana Paula Serafini. **Remoção de Corantes de Efluentes Têxteis Utilizando Folhas de *Azadirachta Indica* como Adsorvente**. Dissertação de mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, pelo Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina. Disponível em: <<http://www2.enq.ufsc.br/teses/m164.pdf>> Acesso em 29 de maio de 2011.

LEAL, Fabiano César Tosetti; LIBÂNIO, Marcelo. **Estudo Da Remoção Da Cor Por Coagulação Química No Tratamento Convencional De Águas De Abastecimento**, 2002. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/fulltext/remocao.pdf>> Acesso em 16 de maio de 2011.

MENDES, Rafael Martins; ALBUQUERQUE, Yaico D. Tanimoto, CARRIJO, Rosa M. Carvalho. **Investigação de Métodos de Tratamento de Soluções Residuais de DQO para Recuperação de Hg² e Cr³**. Disponível em: <<http://www.seer.ufu.br/index.php/horizontecientifico/article/viewFile/4364/3211>> Acesso em 10 de maio de 2011.

NIGAM, P.; ARMOUR, G.; BANAT I.M.; SINGH, D.; MARCHANT, R. **Physical removal of textile dyes from effluent and solid-state fermentation of dyeadsorbed agricultural residues**. *Bioresource Technology*, vol. 72, p. 219-229, 2000.

PACHECO, Sabrina Moro Villela. **Enzimas Oxidativas Aplicadas Na Descoloração De Corantes Utilizados Na Indústria Têxtil** - Universidade Federal de Santa Catarina - Anais da 6ª Semana de Ensino, Pesquisa e Extensão, 2007. Disponível em: <http://anais.sepex.ufsc.br/anais_6/trabalhos/371.html> Acesso em 06 de junho de 2011.

PASCHOAL, Fabiana Maria Monteiro; TREMILIOSI FILHO, Germano. **Aplicação da tecnologia de eletrofloculação na recuperação do corante índigo blue a partir de efluentes industriais** Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422005000500006> Acesso em 30 de outubro de 2010.

PERUZZO, Lucile Cecília. **Influência de agentes auxiliares na adsorção de corantes de efluentes da indústria têxtil em colunas de leito fixo**. Dissertação de mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química. Pelo Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, 2003. Disponível em <<http://www2.enq.ufsc.br/teses/m102.pdf>> Acesso em 29 setembro 2010.

POCINHO, Margarida; FIGUEIREDO, João Paulo. **Estatística e Bioestatística**. Disponível em: <<http://www.ebah.com.br/content/ABAAABp0IAB/bioestatistica-bioestatistica-estatistica-margarida-pocinho-joao-paulo-figueiredo-1>> Acesso em 10 de maio de 2011.

PÔRTO, Luiz Carlos da Silva; ISAAC, Ricardo de Lima; PORRAS, Álvaro Chávez. **Remoção De Cor De Efluente Têxtil Através Do Sistema De Lodos Ativado Em Batelada Com Adição De Carvão Ativado Em Pó**. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/mexico26/ii-113.pdf>> Acesso em 21 de maio de 2011.

RESOLUÇÃO **CONAMA** Nº 237 , DE 19 DE dezembro DE 1997. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res97/res23797.html>> Acesso em 13 de novembro de 2010.

ROBINSON, T.; MCMULLAN, G.; MARCHANT, R.; NIZAM, P. **Remediation of Dyes in textile effluent: a Critical Review on Current Treatment Technologies with a proposed alternative.** Bioresource Technology, vol. 77, p. 247-255, 2000.

RODRIGUEZ, Jackson, *et al*, 2007. **Feasibility assessment of electrocoagulation towards a new sustainable wastewater treatment. Environmental Science and Pollution Research.** Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1065/espr2007.05.424>> Acesso em 10 de novembro de 2010.

SANTOS, Jean Nonato Ribeiro, *et al*. **Tratamento De Efluentes Têxteis Pelos Processos De H₂O₂/UV E Ozonização.** Disponível em: <http://www.sbpcnet.org.br/livro/58ra/JNIC/RESUMOS/resumo_1224.html> Acesso em 20 de maio de 2011.

SOARES, José Luciano. **Remoção de corantes têxteis por adsorção em carvão mineral ativado com alto teor de cinzas.** Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química pelo Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998. Disponível em <<http://www2.enq.ufsc.br/teses/m039.pdf>> Acesso em 29 de outubro de 2010.

VAZ, Luiz Gustavo de Lima. **Performance Do Processo De Coagulação/Floculação No Tratamento Do Efluente Líquido Gerado Na Galvanoplastia.** Dissertação de mestrado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, área de concentração em Desenvolvimento de Processos. 2009 Toledo, PR – Brasil. Disponível em: <http://cac.php.unioeste.br/pos/media/File/eng_quimica/luiz.pdf> Acesso em 26 de maio de 2011.

