

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
ENGENHARIA AMBIENTAL**

MAURÍCIO DE OLIVEIRA VAZ

**AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DA TAXA DE CORRENTE ELÉTRICA
EM REATORES ELETROQUÍMICOS EM BATELADA E FLUXO
CONTÍNUO DESTINADOS AO TRATAMENTO DE EFLUENTE TÊXTIL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MEDIANEIRA

2017

MAURÍCIO DE OLIVEIRA VAZ

**AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DA TAXA DE CORRENTE ELÉTRICA
EM REATORES ELETROQUÍMICOS EM BATELADA E FLUXO
CONTÍNUO DESTINADOS AO TRATAMENTO DE EFLUENTE TÊXTIL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial à
obtenção do título de Engenheiro
Ambiental, da Universidade Tecnológica
Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Eyng

MEDIANEIRA

2017



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Medianeira
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Coordenação do Curso de Engenharia Ambiental



TERMO DE APROVAÇÃO

AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DA TAXA DE CORRENTE ELÉTRICA EM REATORES ELETROQUÍMICOS EM BATELADA E FLUXO CONTÍNUO DESTINADOS AO TRATAMENTO DE EFLUENTE TÊXTIL

por

MAURÍCIO DE OLIVEIRA VAZ

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado no dia 22 de junho de 2017, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Eduardo Eyng
Orientador

Prof. Dr. Laercio Mantovani Frare
Membro titular

Prof. Dr. Fábio Orssatto
Membro titular

- O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso -

AGRADECIMENTOS

Agradeço à instituição Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Medianeira, pela excelência no ensino, pela ética e por me “abrigar” por tanto tempo. À todo o corpo docente da instituição, especialmente meu mestre e orientador Dr. Eduardo Eyng, pelos conselhos, pelo aprendizado, pelo tempo disponibilizado e por ter acreditado em meu potencial juntamente à este projeto.

Minha família. Especialmente, meus queridos pais, Renato e Joceni, e irmãos, Marcelo e Renata, pelo afeto, pelo incentivo, por todas as dicas e mensagens de força, pelas energias positivas, pelo suporte e compreensão do quão difícil foi esta caminhada.

À minha namorada Jessica e sua família, pela ajuda, sinceridade e pela paciência.

À meus grandes e eternos amigos, companheiros de Engenharia.

À todos que, de alguma forma, contribuíram para que este caminho fosse trilhado com sucesso.

“No que diz respeito ao desempenho, ao compromisso, ao esforço, à dedicação, não existe meio termo. Ou você faz uma coisa bem feita, ou não faz” (SENNÁ, Ayrton, 1990).

RESUMO

VAZ, Maurício de Oliveira. **Avaliação da Taxa de Aplicação de Corrente Elétrica em Reatores Eletroquímicos em Batelada e Fluxo Contínuo Destinados ao Tratamento de Efluente Têxtil**. 2016. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2016.

O crescente aumento populacional no planeta impulsionou a geração de resíduos sólidos e efluentes líquidos; conseqüentemente, à necessidade de tecnologias de tratamento que atendam esta demanda gerada e preservem o meio ambiente. Da carga poluidora gerada, salienta-se os efluentes da indústria têxtil, ricos em corantes e extremamente prejudiciais a corpos hídricos e sua biota. Quanto às tecnologias de tratamento avançadas, a eletrocoagulação têm destaque por se utilizar de procedimentos simples e de fácil operação, além de alcançar níveis ótimos de eficiência de remoção de parâmetros como cor e turbidez e ser aplicada à vários tipos de efluentes. A técnica consiste da geração de coagulantes através da dissolução de íons metálicos de eletrodos de sacrifício de ferro à partir da aplicação de uma densidade de corrente elétrica sobre estes. Neste estudo, a eletrocoagulação foi aplicada ao tratamento de um efluente têxtil sintético proveniente do corante reativo comercial Azul 5G. Inicialmente, foi aplicada em sistema de batelada com tempos de retenção hidráulico (TRH) de 5 e 8 minutos, respectivamente. A capacidade máxima de tratamento apresentada nos ensaios com TRH de 5 minutos, foi dada pela densidade de corrente de $53,333 \text{ mA.cm}^{-2}$ que removeu 93,971% do corante presente na solução analisando as alíquotas de entrada (efluente bruto) e saída (efluente tratado). Os ensaios com TRH de 8 minutos apontaram capacidade máxima de tratamento na densidade de corrente de $53,333 \text{ mA.cm}^{-2}$ que removeu 96,639% do corante presente nos ensaios. Posteriormente, a eletrocoagulação foi aplicada em um módulo com sistema de fluxo contínuo com TRH 4 vezes maiores que os aplicados em sistema de batelada, portanto, 20 e 32 minutos respectivamente. No TRH de 20 minutos, o sistema alcançou sua capacidade máxima de tratamento na densidade de corrente de $14,454 \text{ mA.cm}^{-2}$, 97,460% de eficiência de remoção do corante. Os ensaios com TRH de 32 minutos apresentaram capacidade máxima de tratamento na densidade de corrente de $18,068 \text{ mA.cm}^{-2}$, 98,344% de eficiência. Apresentou-se uma correlação linear entre as eficiências de tratamento dos ensaios em fluxo contínuo e batelada, onde o coeficiente de correlação encontrado foi $R^2 = 0,8088$, indicando uma correlação moderada. Realizou-se ainda um ensaio de validação da correlação proposta, aplicando condições intermediárias de densidade de corrente e TRH, que indicou uma boa efetividade dos ensaios.

Palavras-chave: Eletrocoagulação. Projeto de reatores eletroquímicos. Corante azul 5G.

ABSTRACT

VAZ, Maurício de Oliveira. **Evaluation of electric current application rate in batch and continuous flow electrochemical reactors to textile wastewater treatment.** 2016. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2016.

The increase of the growing population on the planet has boosted the generation of solid waste and liquid effluents; consequently, the need for treatment technologies that meet this generated demand and preserve the environment. Of the polluting load generated, the effluents of the textile industry, rich in dyes and extremely harmful to water bodies and living beings, are highlighted. As for advanced treatment technologies, electrocoagulation is indicated by the use of simple procedures and easy operation, as well as achieving great levels of removal efficiency of parameters such as color and turbidity and can be applied to various types of effluents. The technique consists of the generation of coagulants through the dissolution of metallic ions of iron sacrificial electrodes from the application of a density of electric current on them. In this study, electrocoagulation was applied to the treatment of a synthetic textile effluent from the commercial reactive dye Azul 5G. Initially, it was applied in a batch system with hydraulic retention times (HRT) of 5 and 8 minutes, respectively. Both HRT of 5 and 8 minutes showed a direct relationship between the increase of the applied density and the improved dye removal efficiency. The maximum treatment capacity presented in the 5-minute HRT assays was given by the $53.333 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ current density, which removed 93.971% of the dye present in the solution by analyzing the input (raw effluent) and outlet (treated effluent) aliquots. The 8-minute HRT assays indicated maximum treatment capacity at $53.333 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ current density, which removed 96.639% of the dye present in the assays. Subsequently, the electrocoagulation was applied in a module with continuous flow system with TRH 4 times higher than those applied in batch system, therefore, 20 and 32 minutes respectively. The continuous flow assays also have a directly proportional relationship between the increased density of the current applied with improved treatment efficiency. At 20-minute HRT, the system achieved its maximum treatment capacity at $14.454 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ current density, 97.460% dye removal efficiency. The 32-hour HRT assays showed maximum treatment capacity at $18.068 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ density, 98.344% efficiency. We presented a correlation between the tests of the two systems, with the correlation coefficient found was $R^2 = 0.8088$, indicating a moderate. A validation test of the proposed correlation was performed using intermediate assay conditions of current density and HRT, which indicated a good effectiveness of the tests.

Palavras-chave: Electrocoagulation. Electrochemical reactors project. Dye Azul 5G.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Estrutura do corante reativo azul 5G.....	18
Figura 2. Procedimento experimental da eletrocoagulação em sistema de batelada	27
Figura 3. Módulo de tratamento com fluxo contínuo de solução	29
Figura 4. Disposição dos eletrodos no módulo de fluxo contínuo	30
Figura 5. Gráfico da relação entre a corrente aplicada e a eficiência de remoção do ensaio em batelada com TRH de 5 min.	36
Figura 6. Gráfico da relação entre a corrente aplicada e a eficiência de remoção do ensaio em batelada com TRH de 8 min.	38
Figura 7. Gráfico da relação entre a corrente aplicada no sistema e a eficiência de tratamento em fluxo contínuo com TRH de 20 min.	40
Figura 8. Gráfico da relação entre a corrente aplicada e a eficiência de remoção do corante em sistema de fluxo contínuo com TRH de 32 min.	42
Figura 9. Gráfico de correlação entre os ensaios em sistema de batelada e fluxo contínuo	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Eletrocoagulação aplicada no tratamento de efluentes.....	24
Tabela 2 - TRH, densidade de corrente e taxa de aplicação do sistema em batelada.	28
Tabela 3 - TRH e densidade de corrente elétrica aplicada no sistema de fluxo contínuo.....	30
Tabela 4 - TRH e densidade de corrente aplicados no ensaio de validação, sistemas em batelada e fluxo contínuo.	33
Tabela 5 - Aplicação da eletrocoagulação em sistema de batelada com TRH de 5 min.	35
Tabela 6 - Desvio padrão das eficiências de tratamento em sistema de batelada com TRH de 5 min.	35
Tabela 7 - Aplicação da eletrocoagulação em sistema de batelada com TRH de 8 min.	37
Tabela 8 - Desvio padrão das eficiências de tratamento em sistema de batelada com TRH de 8 min.	37
Tabela 9 - Aplicação da eletrocoagulação em sistema de fluxo contínuo com TRH de 20 min.	39
Tabela 10 - Desvio padrão das eficiências de tratamento em sistema de fluxo contínuo com TRH de 20 min.....	39
Tabela 11 - Aplicação da eletrocoagulação em sistema de fluxo contínuo com TRH de 32 min.....	40
Tabela 12 - Aplicação da eletrocoagulação em sistema de fluxo contínuo com TRH de 32 min.....	41
Tabela 13 - Desvio padrão das eficiências de tratamento em sistema de fluxo contínuo com TRH de 32 min.....	41
Tabela 14 – Eficiências médias de remoção nos ensaios de eletrocoagulação em sistema de fluxo contínuo e batelada	43
Tabela 15 – Aplicação da eletrocoagulação em sistema de batelada com TRH de 6,5 min e fluxo contínuo com TRH de 26 min.	44

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	13
2.1 OBJETIVO GERAL	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 INDÚSTRIA TÊXTIL – CARACTERIZAÇÃO E GERAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS.....	14
3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS CORANTES	15
3.3 CORANTE REATIVO AZUL 5G	18
3.4 PROCESSOS DE TRATAMENTO APLICADO À EFLUENTES TÊXTEIS.....	18
3.5 ELETROCOAGULAÇÃO.....	19
3.5.1 Principais Etapas e Reações Envolvidas na Eletrocoagulação	20
3.5.2 Parâmetros Associados à Eletrocoagulação	20
3.5.3 Vantagens do Tratamento por Eletrocoagulação	22
3.5.4 Desvantagens do Tratamento por Eletrocoagulação	23
3.6 APLICAÇÕES DA ELETROCOAGULAÇÃO NO TRATAMENTO DE EFLUENTES TÊXTEIS	23
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
4.1 TRATAMENTO POR ELETROCOAGULAÇÃO EM BATELADA	26
4.2 MÓDULO DE TRATAMENTO PARA SISTEMA DE FLUXO CONTÍNUO.....	28
4.3 TAXA DE APLICAÇÃO DO TRATAMENTO DE ELETROFLOCULAÇÃO EMBATELADA PARA SISTEMA EM FLUXO CONTÍNUO.....	31
4.4 CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DE TRATAMENTO	33
4.5 CORRELAÇÃO ENTRE AS EFICIÊNCIAS DE TRATAMENTO DOS SISTEMAS EM BATELADA E FLUXO CONTÍNUO E ENSAIO DE VALIDAÇÃO.....	33
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
5.1 ELETROCOAGULAÇÃO EM SISTEMA DE BATELADA	35
5.2 TRATAMENTO COM SISTEMA DE FLUXO CONTÍNUO (MÓDULO).....	38
5.3 CORRELAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS EM BATELADA E FLUXO CONTÍNUO.....	42
5.4 ENSAIOS DE VALIDAÇÃO	44
6 CONCLUSÃO.....	46
REFERÊNCIAS.....	47

1 INTRODUÇÃO

Fazendo uma associação dos fatores, recursos hídricos e impactos ambientais, o setor têxtil apresenta grande destaque por ser um ramo industrial com alto consumo de água e, portanto, gerar grandes volumes de efluentes. O não tratamento ou tratamento inadequado destes efluentes, acarretam em sérios problemas relativos a contaminação ambiental. O efluente da indústria têxtil é composto, basicamente, por corantes que não se fixaram às fibras no processo de tingimento.

A nível nacional, a indústria têxtil consome aproximadamente 26,5 toneladas de corantes por ano; sendo que, 20% deste montante, acaba sendo descartada como efluente. Além da poluição visual, a poluição por corantes afeta processos biológicos, como o de fotossíntese por exemplo. A camada sobrenadante de efluente impede a passagem de radiação UV à região inferior do corpo hídrico. Ainda, alguns corantes podem ser carcinogênicos ou mutagênicos (OLIVEIRA, 2010, p. 27).

Estes impactos ambientais negativos sugerem o estudo de novas tecnologias que degradem ou imobilizem estes compostos presentes nos efluentes.

Segundo Kunz et al. (2002), em geral, na indústria têxtil os processos de tratamento estão fundamentados na operação de sistemas físico-químicos de precipitação-coagulação, seguidos de tratamento biológico via sistema de lodos ativados, tendo uma remoção aproximada de 80% da carga de corantes. O principal agravante está no acúmulo de lodo. Por isso, devem ser consideradas novas alternativas de tratamento de efluentes desta indústria.

Destacam-se tratamentos avançados como a biodegradação, o tratamento com ozônio por oxidação direta ou indireta, a fotocatalise heterogênea, processos físicos com a utilização de carvão ativado como adsorvente ou utilização de tecnologias de membranas, processos combinados, como a combinação de processos oxidativos avançados (POAs) (KUNZ et al., 2002, p. 79) e a eletrocoagulação.

A eletrocoagulação se apresenta como uma técnica simples e de fácil operação. Se utiliza da diferença de potencial aplicado em um conjunto de eletrodos, geralmente constituídos de ferro ou alumínio, submersos em solução e dispostos

paralelamente. No anodo ocorre a dissolução das moléculas poluentes e no catodo, a formação de bolhas de gás hidrogênio.

Na indústria têxtil, os tratamentos convencionais têm baixa eficiência de remoção dos parâmetros cor e turbidez, além de gerarem quantidade elevadas de lodo. Portanto, é crescente o número de estudos que aplicam, em escala laboratorial, o tratamento por eletrocoagulação neste tipo de efluente, visto que esta alternativa pode alcançar resultados bastante expressivos na remoção dos parâmetros cor e turbidez.

Como publicado em vários estudos, é notória a eficiência da eletrocoagulação em tratamento de efluentes, porém, a parte fundamental deste tipo de tratamento são os reatores eletroquímicos e as informações disponíveis que embasam o projeto destes reatores são escassas.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Obter uma correlação empírica entre a eficiência de tratamento por eletrocoagulação em sistema de batelada e o reator eletroquímico de simples canal, com o intuito de auxiliar o projeto do reator eletroquímico.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a remoção do corante reativo azul 5G de soluções sintéticas, empregando a eletrocoagulação em batelada e fluxo contínuo, sob diversas condições operacionais;
- Avaliar a aplicação de uma equação para a taxa de corrente elétrica para um reator eletroquímico de fluxo contínuo, com base nas condições empregadas no reator em batelada;
- Obter uma correlação entre as eficiências de remoção do corante reativo azul 5G para os reatores em fluxo contínuo e batelada, mediante aplicação da taxa de corrente elétrica;
- Avaliar a efetividade da correlação proposta mediante ensaios de validação em batelada e fluxo contínuo.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 INDÚSTRIA TÊXTIL – CARACTERIZAÇÃO E GERAÇÃO DE IMPACTOS AMBIENTAIS

Segundo a ABIT (2013), o setor têxtil possui 1,7 milhão de empregados diretos no Brasil, o que o caracteriza como o 2º maior empregador da indústria de transformação nacional. 86% do setor é composto por micro e pequenas empresas.

Beltrame (2000) considera o setor como um alto consumidor de produtos químicos, aplicados na fabricação de fibras sintéticas, naturais e como auxiliares no beneficiamento. As fibras naturais provêm de origem animal (seda, lã), vegetal (algodão, juta, cânhamo, linho, rami, sisal) e mineral (amianto), enquanto que, as fibras sintéticas dividem-se em polímeros naturais (raion viscose, raion acetato) e polímeros sintéticos (acrílico, elastano, poliamida, poliéster).

Se analisada de forma desagregada, a indústria têxtil pode ser subdividida em 6 setores: fiação, beneficiamento, tecelagem, malharia, enobrecimento e confecções (CETESB, 2009, p. 6). Sendo agregado à confecção, indicativos como valor de produção próximo de 3 vezes superiores aos demais (CAMPOS; PAULA, 2006).

A complexidade do processo produtivo e utilização de componentes químicos resultam em uma infinidade de impactos ambientais gerados. Bastian (2009) destaca entre os principais:

a) Geração de efluente e cor: os setores de tinturaria, estamparia e engomagem/desengomagem são os principais geradores de efluentes com concentrações de matéria orgânica por matéria prima ou produto. A variedade do efluente devido à diferentes processos produtivos, dificulta a análise de dados gerais. Como a indústria faz o uso de vários corantes e auxiliares químicos, o efluente é gerado com características específicas inerentes ao que foi utilizado e, conseqüentemente, faz-se necessário um tratamento específico àquele efluente.

b) Odor do óleo de enzimação ou odor de rama: os óleos de enzimação lubrificam as fibras têxteis e visam impedir o acúmulo de cargas estáticas, ou seja, facilitam o deslizamento dos fios nas guias das máquinas e aumentam a coesão das fibras. Porém, este óleo se volatiliza por volta de 160° C a 180° C, temperatura alcançada no processo de termofixação em rama, gerando um vapor descartado na atmosfera que causa fortes odores.

c) Geração de resíduos: resíduos sólidos são gerados desde o descaroçamento do algodão até os restos de fios e tecidos nas confecções.

Resíduos perigosos proveniente de embalagens ou do uso de produtos químicos merecem atenção especial, como por exemplo a perda de pasta na estamperia ou geração de lodos biológicos de tratamento.

d) Ruído e vibração: como há uma infinidade de maquinário no processo produtivo, se não controlados os ruídos, podem gerar incômodos à vizinhança da indústria. (BASTIAN, 2009, p. 36-37).

Destaca-se como impacto significativo desta atividade industrial, a geração de efluentes. Por apresentar um elevado consumo de água, estimado em 150 L de água para a produção de 1 kg de tecido, o mercado têxtil é um dos maiores geradores de efluentes líquidos. 88% deste volume é descartado como efluente e, o remanescente de 12% é perdido por evaporação. Portanto, para a minimização dos possíveis impactos a serem causados, os efluentes gerados devem passar por um tratamento prévio ao lançamento, reduzindo as cargas de contaminantes de maneira a garantir a qualidade do corpo hídrico receptor (GUIA TÉCNICO AMBIENTAL DA INDÚSTRIA TÊXTIL, p. 37).

3.2 CLASSIFICAÇÃO DOS CORANTES

O primeiro corante sintético foi descoberto em 1856 na Inglaterra. Até a 2ª Guerra Mundial, quem manteve o monopólio sobre a produção de corantes sintéticos foi a Alemanha. Atualmente, os Estados Unidos da América são a maior fonte exportadora deste tipo de material, inserindo no mercado aproximadamente 2.000 tipos diferentes de corantes sintéticos (GUARATINI; ZANONI, 2000, p. 75).

Oliveira (2010) cita que os corantes presentes nos efluentes têxteis, além de provocarem poluição visual no corpo hídrico, podem alterar processos biológicos do meio, afetando principalmente as atividades de fotossíntese. Ainda, alguns estudos apontam que, algumas classes de corantes e seus subprodutos, podem ser carcinogênicos e/ou mutagênicos.

Segundo Guaratini; Zanoni (2000) os corantes podem ser classificados de acordo à sua estrutura química ou de acordo com o método pelo qual ele é fixado à fibra têxtil, sendo os principais grupos apresentados a seguir.

Corantes reativos – são corantes contendo um grupo eletrofílico (reativo) capaz de formar ligação covalente com grupo hidroxila das fibras celulósicas, com

grupos amino, hidroxila e tióis das fibras proteicas e também com grupos amino das poliamidas. São vários os tipos de corantes reativos encontrados, no entanto, destacam-se àqueles que possuem a função azo e antraquinona como grupos cromóforos e, como grupos reativos, a clorotriazinila e a sulfatoetilsulfonila. Como exemplo, pode-se citar àquele do tingimento usando compostos que contém sulfatoetilsulfona, que, quando adicionado à fibra, requer apenas a prévia eliminação do grupo sulfato em meio alcalino gerando o composto vinilsulfona (ROYER, 2008, p. 22).

Corante diretos – denominados também de corantes substantivos. São corantes de caráter aniônicos solúveis em água. Diferem-se dos corantes ácido e básicos, por apresentarem alta afinidade por fibras celulósicas. Em sua maioria, são compostos azo, similares à constituição dos corantes ácidos. Têm aplicação em fibras celulósicas, viscose e polinósica (TROTMAN, 1975 apud SOARES, 1998, p. 6).

Corantes azoicos – são compostos coloridos, insolúveis em água, que são sintetizados sobre a fibra durante o processo de tingimento. O processo consiste de impregnar a fibra com um agente de acoplamento (naftol), solúvel em água e apresenta alta afinidade por celulose. Se adicionado um sal de diazônio (RN_2^+), ocorre uma reação com o naftol já fixado na fibra e, o resultado, é a produção de um corante insolúvel em água (ALCÂNTARA; DALVIN, 1996 apud CERQUEIRA, 2006, p. 31).

Corante ácidos – são corantes com característica aniônicas e de solubilidade em água, sendo aplicado para o tingimento de lã, seda, couro e algumas fibras acrílicas modificadas, e largamente empregados para a poliamida. Possui várias propriedades com relação ao tipo de tingimento e solidez, além de uma ampla gama de coloração. Alguns corantes ácidos são indispensáveis à indústria têxtil, principalmente devido à sua alta solidez, mesmo em condições adversas de pH e temperatura, os corantes permanecem estáveis e não liberam o metal de sua composição (BASTIAN, 2009, p. 17).

Corantes à cuba – têm características insolúveis em água e podem ser convertidos em compostos leuco solúveis pela ação de um meio alcalino forte (hidrossulfito de sódio). Apresentam afinidade com a celulose, são adsorvidos pela fibra e oxidados em presença de ar em um pigmento insolúvel no interior da fibra (SOARES, 1998, p. 6). Este tipo de corante tem grande aplicação sob a tintura de

algodão. Porém, por se tratar de um corante com excelentes propriedades de fixação, têm sido aplicado a outros materiais. O ônus da utilização deste corante, é o alto potencial de degradação do meio ambiente do hidrossulfito de sódio, utilizado na conversão do composto (GUARATINI; ZANONI, 2000, p. 73).

Corante de enxofre (sulfurosos) – apresentam compostos macromoleculares com pontes dissulfídicas. São insolúveis em água e, para aplicação, devem ser reduzidos a uma forma solúvel, quando passar a ter afinidade com as fibras celulósicas. Após a etapa de tingimento, os corantes sulfurosos retornam à sua forma original, insolúveis por oxidação. Apresentam pouca resistência ao cloro, porém, boa solidez à luz e à lavagem (BASTIAN, 2009, p. 18).

Corante dispersos – são compostos aromáticos não iônicos, pouco solúveis em água e com utilização ampla na tintura de fibras sintéticas como poliéster, triacetato de celulose e poliamidas. A adição em altas temperaturas (80° C) de agentes dispersantes sob a etapa de tintura, é uma das responsáveis pelo transporte do corante à fibra hidrofóbica, caracterizando estes corantes, como prováveis poluentes de águas superficiais (BRUNELLI et al. 2009, p. 67).

Corantes pré-metalizados – tem como principal utilização a tintura de fibras proteicas e poliamida. Apresenta um grupo hidroxila ou carboxila na posição “ortho” em relação ao cromóforo azo, o que permite a formação de complexos com íons metálicos. Os conjuntos portadores de elétrons livres das fibras interagem com o metal (SOBREIRA, 2009, p. 7).

Corantes branqueadores – as fibras têxteis no estado bruto por serem compostas primariamente de materiais orgânicos, apresentam como característica uma aparência amarelada por absorver luz particularmente na faixa de baixo comprimento de onda. A diminuição desta tonalidade têm sido diminuída na indústria ou na lavanderia pela oxidação da fibra com alvejantes químicos ou utilizando os corantes brancos também denominados de branqueadores ópticos ou mesmo branqueadores fluorescentes. Estes corantes apresentam grupos carboxílicos, azometino (-N=CH-) ou etilênicos (-CH=CH-) aliados a sistemas benzênicos, naftalênicos, pirênicos, e anéis aromáticos que proporcionam reflexão por fluorescência na região de 430 a 440 nm quando excitados por luz ultra violeta (GUARATINI; ZANONI, 2000, p. 74).

3.3 CORANTE REATIVO AZUL 5G

O corante reativo Azul 5G é de grande utilidade na industrial têxtil e lavanderias industriais (CERVELIN, 2010, p. 30), tem grande aplicabilidade no processo de tingimento de fibras celulósicas, devido a sua reatividade e estabilidade da cor. Se tratando de um corante com uma coloração intensa, se despejado em corpos hídricos, pode ocasionar sérios problemas ambientais, não apenas estéticos, mas também na biota aquática. O efluente com grandes quantidades de corante, forma uma camada na região superficial do corpo hídrico, impossibilitando a passagem de luz natural e, conseqüentemente, afetando o processo de fotossíntese. Ainda, afeta a transparência e solubilização dos gases, que podem originar toxicidade aguda e crônica nos meios aquáticos (HONORATO; CAETANO, 2015, p. 17).

Na figura 1 está representada a estrutura química do corante reativo azul 5G.

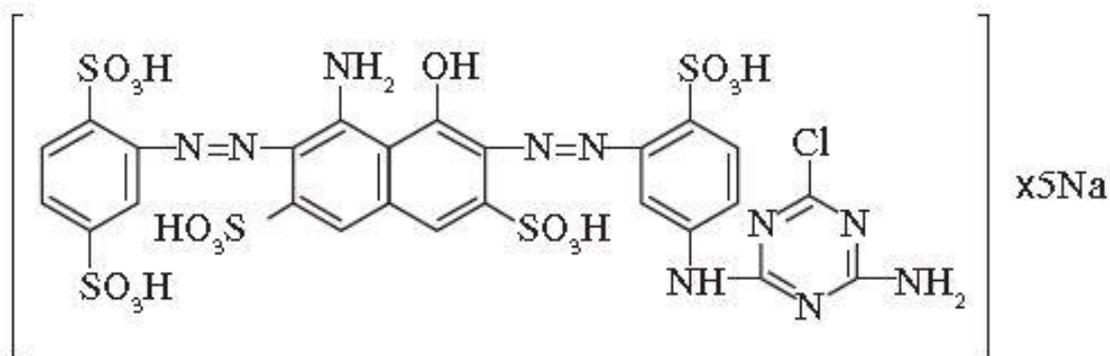


Figura 1. Estrutura do corante reativo azul 5G
 Fonte: MATTA et al. (2008).

3.4 PROCESSOS DE TRATAMENTO APLICADO À EFLUENTES TÊXTEIS

Segundo Cervelin (2010), a dificuldade no tratamento de sistemas aquáticos contaminados por efluentes têxteis se dá principalmente à alta estabilidade e baixa

degradabilidade destas substâncias. Portanto, este tipo de efluente não têm uma boa eficiência de tratamento pelos métodos convencionais.

Segundo Kunz et al. (2002), os processos fundamentados na coagulação, seguidos de processos de separação como flotação ou decantação, apresentam resultados satisfatórios na remoção de material particulado, porém, se analisados os parâmetros cor e compostos orgânicos dissolvidos, as técnicas mostram-se deficientes.

Os processos em estações de tratamento de efluentes se utilizam de coagulantes e floculantes que podem causar impactos ambientais devido à toxicidade de algumas moléculas usadas. Portanto, mesmo com o uso controlado, pode ocorrer um desequilíbrio nos organismos aquáticos do meio receptor (CRESPILO, SANTANA E REZENDE, 2004, p. 387).

Usualmente, o tratamento de efluentes têxteis está fundamentado na operação de sistemas físico-químicos de precipitação-coagulação, seguidos de tratamento biológico via sistema de lodos ativados. No entanto, estudos de biodegradação, tratamento com ozônio, fotocatalise heterogênea e adsorção com carvão ativado, apresentam-se como possíveis alternativas que vêm sendo aprimoradas em ensaios laboratoriais (KUNZ, 2002, p. 79).

3.5 ELETROCOAGULAÇÃO

Segundo Cerqueira (2006), a eletrocoagulação é um processo que envolve a geração de coagulantes *in situ* pela dissolução de íons metálicos (ferro ou alumínio) a partir da aplicação de uma corrente elétrica sobre eletrodos dos respectivos materiais em solução. No ânodo, ocorre a geração de íons metálicos, enquanto que, no cátodo, surge o gás hidrogênio.

Segundo Poon (1997), a técnica de eletrocoagulação tem despertado bastante interesse devido à simplicidade de operação e possibilidade de aplicação em diversos tipos de efluentes e água potável.

3.5.1 Principais Etapas e Reações Envolvidas na Eletrocoagulação

Aquino Neto (2011), cita que o processo de eletrocoagulação ocorre basicamente em três etapas. Inicialmente, o coagulante será gerado *in situ* pela oxidação do eletrodo de sacrifício que atua como anodo; os cátions gerados reagirão com as moléculas de água para a formação de hidróxidos e poli hidróxidos. Paralelamente, ocorrerá a eletrólise da água e a formação de microbolhas de oxigênio no anodo, e hidrogênio no catodo que, carregarão, ao final do processo, o material floculado para a superfície. Na etapa seguinte, o produto formado (hidróxidos e poli hidróxidos) adsorver-se-á em partículas coloidais originando os flóculos e, estes, entram em contato com as impurezas. A remoção dos poluentes pode ocorrer tanto por complexação como por atração eletrostática e posterior coagulação. A terceira e última etapa é composta pela flotação que ocorre a partir da geração das microbolhas supracitada ao final da etapa inicial.

Segundo Mollah et al. (2004), a eficiência da etapa de flotação dependerá do tamanho das bolhas geradas e, da mistura desta com o efluente. Pequenas bolhas promovem maiores áreas superficiais de contato, o que resultará em uma melhor eficiência de separação.

3.5.2 Parâmetros Associados à Eletrocoagulação

A eficiência de um sistema de eletrocoagulação é refletida na remoção de poluentes e potência elétrica e/ou consumo químico (CHEN, 2004 apud FORNARI, 2007, p. 26). São vários os fatores que influenciam o tamanho das bolhas de gases hidrogênio e oxigênio, tais como densidade de corrente, temperatura e, principalmente, pelo material do eletrodo e pH do meio (HOSNY, 1996 apud FORNARI, 2007, p. 26).

Cerqueira (2006) apresenta os seguintes parâmetros associados à eletrocoagulação:

Potência do reator – quando uma diferença de potencial é aplicada em reatores eletroquímicos submersos em solução, ocorrem reações de oxidação no

anodo e, de redução no catodo. O consumo de elétrons está associado diretamente à quantidade total de substâncias reagentes. Esta relação aplicada na eletrocoagulação se dá pela corrosão do eletrodo no processo de geração do coagulante. Portanto, a geração de ferro em solução está intimamente relacionada à carga, controlada pela corrente aplicada.

Condutividade – a condutividade do efluente é proporcional à quantidade de íons condutores presentes em solução. Como os íons são os responsáveis pela condução da corrente elétrica, quanto maior a quantidade de íons, maior será a capacidade de condução de corrente elétrica e, conseqüentemente, maior a possibilidade de ocorrência de reações entre as substâncias presentes no efluente.

Efeito do pH–o tratamento por eletrofloculação apresenta como umas das principais vantagens, a capacidade de neutralizar o pH do efluente. No caso de efluentes ácidos, a eletrofloculação tende a aumentar a faixa de pH em decorrência da redução de hidrogênio no catodo. Reações como a hidrólise do ferro, formação de oxigênio no anodo e liberação de CO₂ pelo borbulhamento de hidrogênio no catodo, também participam do equilíbrio do pH.

Distância entre os eletrodos–Como a solução possui resistência à passagem de corrente elétrica, quanto mais afastados encontrarem-se os eletrodos, maior deverá ser a carga elétrica aplicada. Isso influi diretamente na eficiência do processo. Portanto, deve-se conhecer as características do efluente para otimizar a distância entre os eletrodos.

Passivação e polarização dos eletrodos–caso o eletrodo esteja em contato com o ar, pode ocorrer em sua superfície a formação de um filme, denominado filme passivo. Isso diminui a incidência de corrosão sobre o material do eletrodo. No entanto, este fenômeno pode prejudicar o processo de eletrocoagulação, pois há uma perda de eficiência em decorrência do aumento da resistividade do eletrodo.

Inversão de polaridade – se ocorrer uma inversão de polaridade em um determinado espaço de tempo, catodo atuando como anodo e vice-versa, a vida útil do eletrodo pode ser ampliada em até duas vezes; simultaneamente, ocorre a diminuição da resistividade do sistema. A intensidade da corrente elétrica se mantém constante e o eletrodo passa a liberar mais íons de ferro na solução. O produto disto é a formação de mais grupos hidroxila, aumento do pH e da eficiência de remoção dos poluentes.

Temperatura – influi diretamente sobre a velocidade das reações químicas. Pode acelerar ou retardar as reações, imprimir maior ou menor solubilidade dos gases, propiciando odor por exemplo.

Consumo dos eletrodos—a massa consumida de eletrodo durante a hidrólise é proporcional à corrente, ao tempo de aplicação desta corrente e à massa molar do elemento predominante do eletrodo e; inversamente proporcional à constante de Faraday ($9,5 \times 10^4 \text{ C.mol}^{-1}$) e ao número de elétrons envolvidos na reação de oxidação do anodo.

Consumo de energia elétrica – o consumo de energia elétrica de um reator é dado pela Lei de Ohm que expressa, a quantidade necessária de potência para se estabelecer o dimensionamento do equipamento necessário ao suprimento de energia do reator.

3.5.3 Vantagens do Tratamento por Eletrocoagulação

Mollah et al. (2000) citam que o uso de técnicas eletrolíticas apresenta como vantagens a versatilidade, eficiência energética, segurança, seletividade, reações rápidas e sistemas com tamanho reduzido, utiliza somente elétrons para o tratamento ao invés de produtos químicos ou microorganismos.

Outras vantagens da utilização desta técnica, segundo Crespilho e Rezende (2004) são:

- Equipamentos simples e de fácil operação, onde a corrente e o potencial aplicado são controlados de maneira automatizada;
- Se comparado à processos físico-químicos tradicionais, há um maior controle na liberação do agente coagulante;
- Forma flocos grandes e estáveis que podem ser removidos por simples filtração;
- O campo elétrico aplicado promove um rápido contato entre as partículas coloidais menores, facilitando a coagulação;
- Há um limite no uso de substâncias químicas, minimizando o impacto negativo causado pelo excesso de xenobióticos lançados no ambiente;

- As bolhas de gás produzidas durante a eletrólise podem levar o contaminante ao topo da solução, facilitando sua remoção;
- Como a célula eletrolítica é eletricamente controlada, não faz-se necessário dispositivos adicionais;
- Se houver um painel fotovoltaico acoplada à unidade eletrolítica, a técnica pode ser realizada até mesmo em locais inóspitos;
- É uma técnica que remove óleos e graxas devido à facilidade de coagulação e flotação das moléculas deste tipo de substâncias.

3.5.4 Desvantagens do Tratamento por Eletrocoagulação

Como desvantagens da aplicação da técnica de eletrocoagulação, Mollah et al. (2000) citam:

- Em caso dos eletrodos sofrerem passivação ou desgaste, estes devem ser substituídos regularmente;
- Dependendo da região a ser realizado o processo, o uso de eletricidade pode inviabilizar o processo;
- Pode ocorrer perda de eficiência na unidade devido ao filme de óxido impermeável formado no catodo;
- É requerida alta condutividade do efluente.

3.6 APLICAÇÕES DA ELETROCOAGULAÇÃO NO TRATAMENTO DE EFLUENTES TÊXTEIS

A técnica de eletrocoagulação é amplamente aplicada em estudos que envolvem o tratamento de efluentes, especialmente efluentes têxteis. Na tabela 1, estão denotados alguns estudos que se utilizaram da técnica em escala laboratorial. Neto et al. (2011) aplicou o sistema de tratamento por eletrocoagulação em resíduos de corante. Paschoal e Tremiliosi-Filho (2005) se utilizaram da técnica para a

recuperação do corante Índigo Blue a partir de efluentes industriais. Manenti et al. (2014) aplicaram a eletrocoagulação integrada ao sistema foto-fenton para o tratamento de efluente têxtil. Cordeiro et al. (2015) se utilizaram da técnica com vistas de purificar e reutilizar águas residuárias provenientes da produção de biodiesel.

Tabela 1 - Eletrocoagulação aplicada no tratamento de efluentes.

Autoria	Efluente ¹	Eletrodo ²	V ³ (cm ³)	j ⁴ (mA.cm ⁻²)	TRH ⁵ (min)	λ ⁶ (nm)	Demais considerações
Neto et al. (2011)	Sintético (Corante Laranja II)	Ferro e alumínio	-	0,15 0,8 2,4	30	480	Os eletrodos de alumínio se mostraram mais eficiente que os de ferro.
Paschoal e Tremiliosi- Filho (2005)	Industrial (Corante Índigo Blue)	Carbono vítreo e platina	100	14 150 300	45	415 680	A densidade de 14 mA.cm ⁻² foi considerada ineficiente para o tratamento. As densidades de 150 e 300 removeram significativamente o corante.
Manenti et al. (2014)	Industrial, pós tingimento e lavagem de tecidos	Ferro	900	14	60 120 180	-	O processo integrado EC/FFS apresentou reduções de 99,5% da DQO, 96% do COT, 99,9% de cor e turbidez.
Floss e Callegaro (2011)	Industrial	Ferro	1000	19,0 30,0 44,5 60,0 71,0	4,4 7,0 10,5 14,0 16,6	400	A eficiência de remoção de turbidez alcançou uma média de 68,91%. Já o parâmetro cor, alcançou uma eficiência de 69,05%.

continua

conclusão

Tabela 1 - Eletrocoagulação aplicada no tratamento de efluentes.

Autoria	Efluente ¹	Eletrodo ²	V ³ (cm ³)	j ⁴ (mA.cm ⁻²)	TRH ⁵ (min)	λ ⁶ (nm)	Demais considerações
				19,0	4,4		
				30,0	7,0		Eficiência significativa
Queiroz	Industrial	Alumínio	1000	44,5	10,5	400	das variáveis resposta
				60,0	14,0		turbidez, cor e DQO.
				71,0	16,6		

Fonte: Autoria própria (2017).¹Tipo de efluente utilizado para o ensaio.²Material constituinte dos eletrodos de sacrifício.³Volume de efluente tratado no ensaio.⁴Densidade de corrente elétrica aplicada.⁵Tempo de retenção hidráulico da eletrólise.⁶Comprimento de onda (λ) ajustado no espectrofotômetro.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 TRATAMENTO POR ELETROCOAGULAÇÃO EM BATELADA

O tratamento por eletrocoagulação em sistema de batelada foi aplicado a soluções do corante reativo comercial Azul 5G em água proveniente da rede de abastecimento. Utilizou-se para tal, uma concentração de 50 mg.L^{-1} de corante, além de 2 g.L^{-1} de NaCl (Cloreto de Sódio) com a finalidade de propiciar uma boa condutividade elétrica na solução.

Os materiais utilizados nos ensaios consistiram em: balança de precisão (Shimadzu, modelo BL 3200 H), béquer de 2L, agitador magnético (Fisatom, modelo 752A), fonte de corrente contínua (Instrutherm, modelo FA3050), um par de eletrodos de sacrifício de ferro com dimensões unitárias de 10,0 cm de comprimento, 5,0 cm de largura e, aproximadamente 0,06 cm de espessura, suportes adaptados para a fixação dos eletrodos, provetas, pipeta volumétrica, espectrofotômetro de absorção molecular (Hach, modelo DR 2800), tubos de ensaios de plástico com o fundo cônico, além de tubos de ensaios de vidro.

Apesar de os eletrodos apresentarem uma área total unitária de $50,0 \text{ cm}^2$; considerou-se para a interpretação dos resultados, uma área de $37,5 \text{ cm}^2$, que representou a área útil dos eletrodos, ou seja, a área realmente utilizada para a eletrocoagulação, que consiste da parte submersa do eletrodo, 7,5 cm de comprimento e 5,0 cm de largura. Os mesmos, foram dispostos com um espaçamento de 5,0 cm entre si.

Na figura 2 tem-se uma ilustração do procedimento experimental do tratamento em sistema de batelada. A concentração requerida via pesagem do corante e NaCl (figuras 2a e 2b). Nas provetas foram inseridos os 2000 cm^3 de água, figura 2c, posteriormente dispostos em um béquer de 2000 cm^3 alocado sobre o agitador magnético (figura 2d). Coletou-se com o auxílio da pipeta graduada, o efluente bruto ou de entrada do processo (figura 2e). Para o início do processo de eletrocoagulação, ativaram-se as cargas elétricas junto aos eletrodos e, após o tempo de retenção hidráulico (TRH) proposto, coletou-se a amostra do efluente tratado ou de saída, (figuras 2f, 2g e 2h). As amostras foram dispostas em tubos

Falcon (figura 2i) com a finalidade de decantação do ferro residual presente na alíquota de saída, que proveu da degradação dos eletrodos. Observou-se claramente a formação dos flocos pós aplicação do tratamento (figura 2j). Respeitado o tempo mínimo de 96 horas para decantação do ferro residual, as amostras foram dispostas em tubos de ensaio de vidro para posterior aferição da absorbância em espectrofotômetro de absorção molecular (figuras 2k e 2l, respectivamente).

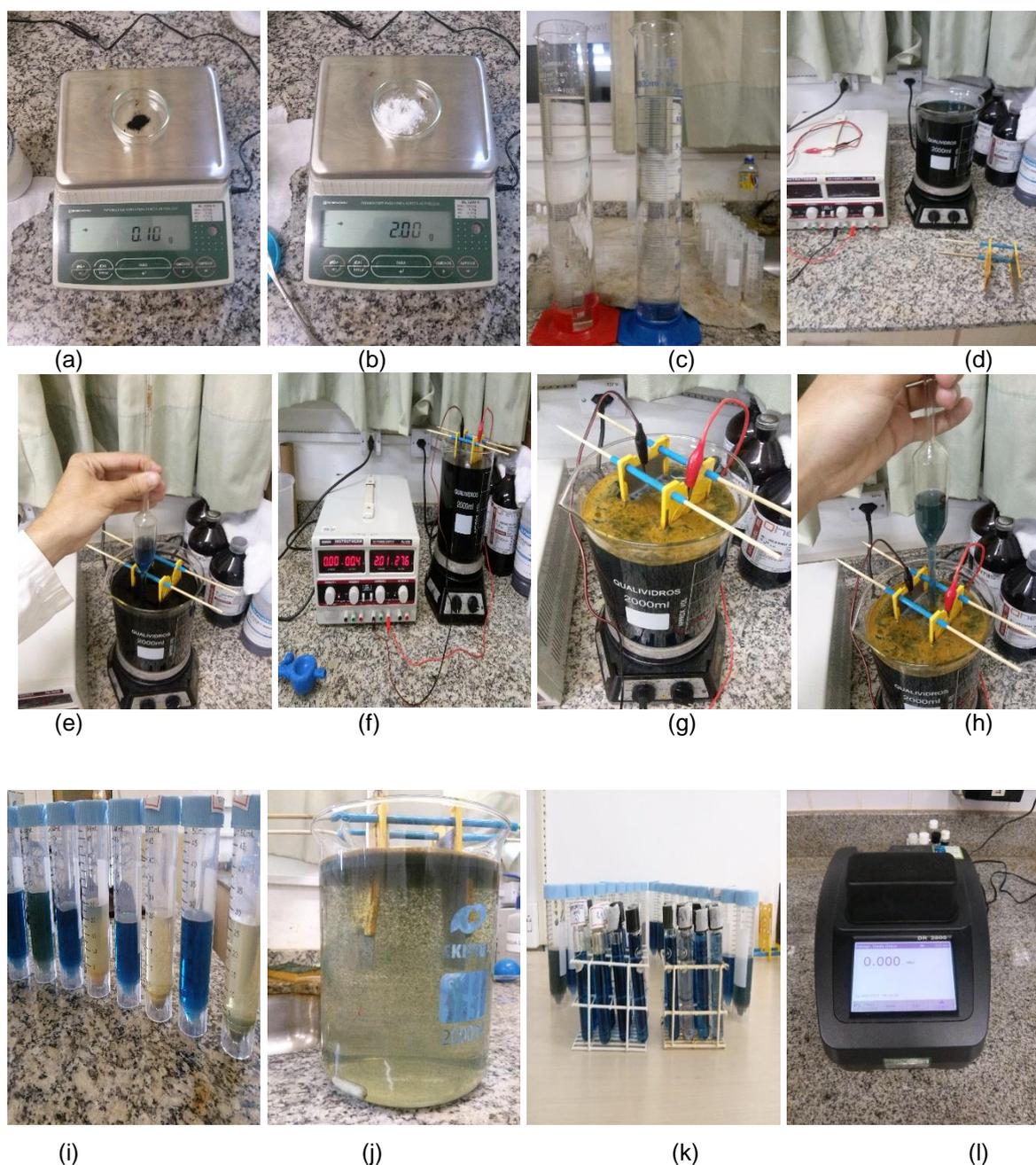


Figura 2. Procedimento experimental da eletrocoagulação em sistema de batelada
Fonte: Autoria própria (2017).

A densidade de corrente (J), que expressa a razão da corrente elétrica utilizada pela área do eletrodo, foi previamente definida à partir de uma matriz de ensaio, assim como o tempo de retenção hidráulico aplicado ao tratamento por eletrocoagulação em sistema de batelada. Tais valores, estão representados na tabela 2.

Tabela 2 - TRH, densidade de corrente e taxa de aplicação do sistema em batelada.

Ensaio	Densidade de Corrente (mA.cm ⁻²)	TRH (min)	TA (mA.(cm.min) ⁻¹)
B1	13,333	5	1,8750
B2	26,667	5	3,7500
B3	40,000	5	5,6250
B4	53,333	5	7,5000
B5	66,667	5	9,3750
B6	13,333	8	1,1719
B7	26,667	8	2,3438
B8	40,000	8	3,5156
B9	53,333	8	4,6875
B10	66,667	8	5,8594

Fonte: Autoria própria (2017).

Todos os ensaios do tratamento por eletrocoagulação em sistema de batelada foram realizados em duplicata, utilizou-se para a interpretação dos resultados, a média das eficiências de remoção do parâmetro cor analisando a absorbância do efluente bruto e do efluente tratado através do espectrofotômetro de absorção molecular, com comprimento de onda (λ) ajustado em 618 nm.

4.2 MÓDULO DE TRATAMENTO PARA SISTEMA DE FLUXO CONTÍNUO

O módulo de tratamento em sistema de fluxo contínuo (figura 3) consistiu de uma cuba de vidro retangular, com 65,0 cm de comprimento, 12,5 cm de largura e 12,0 cm de altura, com capacidade total de 9750 cm³, porém, apresenta um volume

útil de 8500 cm³. Ainda, compuseram o sistema, dois barriletes de 20L sendo que, um deles abrigou uma bomba hidráulica que garantiu o fluxo contínuo ao módulo. A corrente elétrica proveu de duas fontes (Instrutherm, modelos FA3005 e FA3050), que alimentaram os eletrodos de sacrifício com cargas elétricas contínuas, promovendo o processo de eletrocoagulação. No ensaio, foram utilizados 3 pares de eletrodos de ferro com dimensões unitárias de 15,0 cm de altura por 9,0 cm de largura; porém, a área útil apresentada foi de 99,0 cm², 11,0 cm de altura por 9,0 cm de largura; conectados em paralelo e fixados por porcas em ambos os lados, de maneira a favorecer o fluxo de corrente elétrica aplicado na rosca de fixação. Ainda, os eletrodos foram dispostos em chicanas, de forma a apresentar um espaçamento de 6,0 cm entre si, conforme figura 4.

A vazão (Q), equação 5, foi aferida à partir da razão do volume útil do módulo pelo tempo de retenção hidráulico do ensaio.

$$Q = \frac{V}{TRH} \quad (5)$$

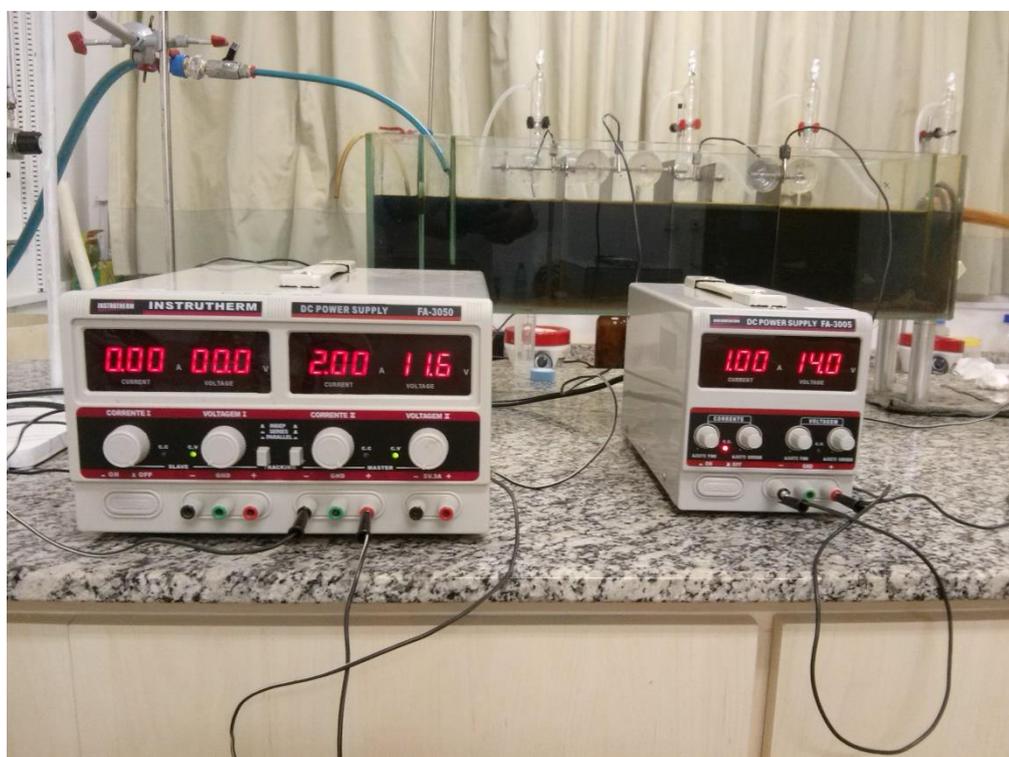


Figura 3. Módulo de tratamento com fluxo contínuo de solução
Fonte: Autoria própria (2017).



Figura 4. Disposição dos eletrodos no módulo de fluxo contínuo
Fonte: Autoria própria (2017).

Da mesma forma que no tratamento em sistema de batelada, o tratamento por eletrocoagulação em sistema de fluxo contínuo utilizou uma concentração do corante Azul 5G de 50 mg.L^{-1} e 2 g.L^{-1} de NaCl.

Na tabela 3 encontram-se expostos os valores de densidade de corrente e TRH aplicados no sistema, além da taxa de correlação (TA) proveniente do ensaio em sistema de batelada. Vale lembrar que a densidade de corrente foi definida à partir de uma matriz de ensaio e, o TRH foi adotado como sendo quatro vezes maior que tempo definido pela matriz no sistema em batelada.

Tabela 3 - TRH e densidade de corrente elétrica aplicada no sistema de fluxo contínuo.

Ensaio	Densidade de corrente (mA.cm^{-2})	TRH (min)	TA ($\text{mA} \cdot (\text{cm} \cdot \text{min})^{-1}$)
C1	3,614	20	1,8750
C2	7,227	20	3,7500
C3	10,841	20	5,6250
C4	14,454	20	7,5000
C5	18,068	20	9,3750
C6	3,614	32	1,1719
C7	7,227	32	2,3438
C8	10,841	32	3,5156
C9	14,454	32	4,6875
C10	18,068	32	5,8594

Fonte: Autoria própria (2017).

Para que a solução presente no módulo atingisse o estado estacionário, adotou-se o tempo do ensaio experimental como sendo o dobro do TRH apresentado. Portanto, em cada amostragem, foram adotados tempos de 40 min para o TRH de 20 min e 64 min para o TRH de 32 min. As amostragens foram realizadas em duplicata e, analisou-se a eficiência média de remoção do parâmetro cor.

4.3 TAXA DE APLICAÇÃO DO TRATAMENTO DE ELETROFLOCULAÇÃO EM BATELADA PARA SISTEMA EM FLUXO CONTÍNUO

Como o volume de solução inserido no béquer e, a área útil dos eletrodos são conhecidos, apresentou-se a equação 1, que consiste da razão (R) posteriormente utilizada na Taxa de Aplicação.

$$R = \frac{V}{A} \quad (1)$$

Onde:

V é o volume de solução inserida no béquer, em cm³.

A é a área dos eletrodos submersos na solução, em cm².

Respaldando-se desta razão, foi obtida uma taxa de aplicação (TA), representada na equação 2, posteriormente replicada no módulo de tratamento em fluxo contínuo. Tanto a densidade de corrente aplicada, quanto o tempo de tratamento em batelada, foram previamente definidos pela matriz de ensaio, conforme apresentado na seção 4.1.

$$TA = \frac{i}{R \cdot TRH} \quad (2)$$

Onde:

i é a corrente elétrica utilizada no ensaio em batelada (Âmpere).

R é a razão definida pela Equação 1 (cm).

TRH é o tempo previamente definido para o tratamento (minutos).

Esta taxa de aplicação (TA) foi utilizada no tratamento de fluxo contínuo, respeitadas às condições do módulo. Tais condições, geraram uma nova Razão (R_{fc}), apresentada na equação 3. Por conseguinte, conhecidos o volume útil do módulo e a área total dos eletrodos utilizados, foi obtida uma nova razão.

$$R_{fc} = \frac{V'}{A'} \quad (3)$$

Onde:

V' é o volume útil do módulo de tratamento em fluxo contínuo.

A' é o somatório da área útil dos eletrodos de carga elétrica positiva (anodos).

A partir desta nova razão de fluxo contínuo (R_{fc}) apresentada pela equação 3 e, adotando um TRH quatro vezes maior que o estipulado no tratamento em sistema de batelada, calculou-se a densidade de corrente elétrica a ser empregada no módulo em fluxo contínuo, a fim de que a taxa de aplicação (TA) proposta permanecesse constante. Portanto, a equação 4 aponta a densidade de corrente a ser utilizada no tratamento em sistema de fluxo contínuo.

$$i_{fc} = TA \cdot R_{fc} \cdot TRH \quad (4)$$

Onde:

TA é a taxa de aplicação do tratamento, apresentado na Eq. 2.

R_{fc} é a razão de fluxo contínuo, obtida pela Eq. 3.

TRH é o tempo de retenção hidráulico, quatro vezes maior que o apresentado no tratamento em sistema de batelada.

4.4 CÁLCULO DA EFICIÊNCIA DE TRATAMENTO

Através do espectrofotômetro de absorção molecular (Hach, modelo DR 2800), ajustado com comprimento de onda (λ) em 618 nm, analisou-se a eficiência de remoção do parâmetro cor para os dois sistemas, comparando o valor de absorbância do efluente bruto, ou de entrada, com a absorbância do efluente tratado, ou de saída, equação 6.

$$E = \frac{(Abs_B - Abs_T)}{Abs_B} * 100 \quad (6)$$

Onde:

Abs_B é o valor de absorbância do efluente bruto ou não tratado.

Abs_T representa a absorbância do efluente tratado.

4.5 CORRELAÇÃO ENTRE AS EFICIÊNCIAS DE TRATAMENTO DOS SISTEMAS EM BATELADA E FLUXO CONTÍNUO E ENSAIO DE VALIDAÇÃO

Foram testados nos ensaios, diversos ajustes a fim de correlacionar as eficiências de tratamento do sistema em batelada com o módulo de fluxo contínuo. Para avaliar a efetividade da correlação proposta, realizou-se um ensaio de validação em sistema de batelada e outro no módulo de fluxo contínuo, conforme exposto na tabela 4.

Tabela 4 - TRH e densidade de corrente aplicados no ensaio de validação, sistemas em batelada e fluxo contínuo.

Ensaio	Amostragem	Densidade de corrente (mA.cm ⁻²)	TRH (min)	TA (mA.(cm.min) ⁻¹)
Batelada	1	33,333	6,5	3,6058
Fluxo Contínuo	2	9,034	26,0	3,6058

Fonte: Aatoria própria (2017).

Ressalta-se que, as concentrações do corante Azul 5G e NaCl, foram as mesmas utilizadas nos ensaios anteriores, assim como o procedimento experimental efetuado. Da mesma forma, os ensaios de validação foram realizados em duplicata, sendo analisada a eficiência média de remoção do corante.

A validação se destinou a avaliar se, com base no valor de eficiência de remoção obtido no ensaio em batelada, a predição da eficiência de remoção para o sistema em fluxo contínuo (fornecida pela correlação encontrada), realmente fornecia resultados satisfatórios.

Pós apresentação da correlação proposta e validação da mesma, pôde-se calcular o possível erro referente ao ajuste. Este erro pôde ser aferido conforme apresentado na equação 7.

$$e = \frac{Emr_{fc} - Emr_{corr}}{Emr_{fc}} * 100 \quad (7)$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ELETROCOAGULAÇÃO EM SISTEMA DE BATELADA

Os ensaios em sistema de batelada foram realizados à partir de dois tempos de retenção hidráulicos (TRH) definidos por uma matriz de ensaios; 5 e 8 minutos, respectivamente.

Na tabela 5, denotam-se as eficiências de remoção do corante reativo azul 5G para os ensaios em batelada com TRH de 5 minutos (B1 à B5), bem como a figura 5, que ilustra o gráfico da relação entre a densidade de corrente elétrica aplicada e a eficiência de remoção no ensaio.

Tabela 5 - Aplicação da eletrocoagulação em sistema de batelada com TRH de 5 min.

Ensaio	j (mA.cm ⁻²) ¹	Abs _{B 1} ²	Abs _{T 1} ³	E ₁ (%) ⁴	Abs _{B 2} ⁵	Abs _{T 2} ⁶	E ₂ (%) ⁷	E _M (%) ⁸
B1	13,333	1,307	1,099	15,914	1,301	0,995	23,520	19,717
B2	26,667	1,277	0,743	41,817	1,943	1,505	22,542	32,180
B3	40,000	1,125	0,715	36,444	1,009	0,694	31,219	33,832
B4	53,333	1,640	0,096	94,146	1,060	0,115	89,151	91,649
B5	66,667	2,044	0,143	93,004	1,146	0,058	94,939	93,971

Fonte: Autoria própria (2017).

¹ j (mA.cm⁻²) – densidade de corrente elétrica aplicada.

²Abs_{B 1} – absorvância efluente bruto.

³Abs_{T 1} – absorvância efluente tratado.

⁴E₁ (%) – percentual de eficiência do tratamento.

⁵Abs_{B 2} – absorvância efluente bruto duplicata.

⁶Abs_{T 2} – absorvância efluente tratado duplicata.

⁷E₂ (%) – percentual de eficiência do tratamento duplicata.

⁸E_M (%) – eficiência média de tratamento do ensaio, percentual.

Tabela 6 - Desvio padrão das eficiências de tratamento em sistema de batelada com TRH de 5 min.

			continua
Ensaio	E ₁ (%)	E ₂ (%)	Desvio padrão
B1	15,914	23,520	5,380

Tabela 6 – Desvio padrão das eficiências de tratamento em sistema de batelada com TRH de 5 min.

Ensaio	E ₁ (%)	E ₂ (%)	conclusão
			Desvio padrão
B2	41,817	22,542	13,630
B3	36,444	31,219	3,690
B4	94,146	89,151	3,530
B5	93,004	94,939	1,370
Desvio médio			5,520

Fonte: Autoria própria (2017).

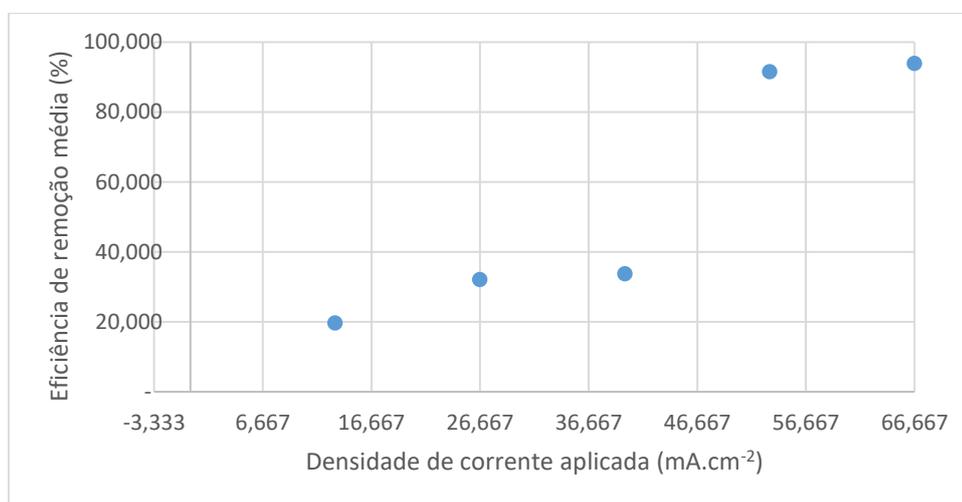


Figura 5. Gráfico da relação entre a corrente aplicada e a eficiência de remoção do ensaio em batelada com TRH de 5 min.

Fonte: Autoria própria (2017).

Neste ensaio com TRH de 5 minutos, constatou-se que não há uma linearidade entre o aumento da densidade de corrente elétrica aplicada com o aumento da eficiência de tratamento.

A tabela 7 exibe os valores obtidos às eficiências de remoção do corante a partir do tratamento em batelada com TRH de 8 minutos e, a figura 6 apresenta o gráfico da relação entre carga aplicada e eficiência de tratamento. O desvio padrão indicou uma maior variabilidade nos ensaios B1 e B2.

Tabela 7 - Aplicação da eletrocoagulação em sistema de batelada com TRH de 8 min.

Ensaio	j (mA.cm ⁻²) ¹	Abs _{SB 1} ²	Abs _{T 1} ³	E ₁ (%) ⁴	Abs _{SB 2} ⁵	Abs _{T 2} ⁶	E ₂ (%) ⁷	E _M (%) ⁸
B6	13,333	1,359	1,206	11,258	1,268	1,137	10,331	10,795
B7	26,667	2,011	0,985	51,019	1,276	0,526	58,777	54,898
B8	40,000	1,671	0,163	90,245	1,324	0,102	92,296	91,271
B9	53,333	1,292	0,042	96,749	1,181	0,041	96,528	96,639
B10	66,667	1,339	0,057	95,743	1,211	0,053	95,623	95,683

Fonte: Autoria própria (2017).

¹ j (mA) – densidade de corrente elétrica aplicada.

²Abs_{SB 1} – absorvância efluente bruto.

³Abs_{T 1} – absorvância efluente tratado.

⁴E₁ (%) – percentual de eficiência do tratamento.

⁵Abs_{SB 2} – absorvância efluente bruto duplicata.

⁶Abs_{T 2} – absorvância efluente tratado duplicata.

⁷E₂ (%) – percentual de eficiência do tratamento duplicata.

⁸E_M (%) – eficiência média de tratamento do ensaio, percentual.

Tabela 8 - Desvio padrão das eficiências de tratamento em sistema de batelada com TRH de 8 min.

Ensaio	E ₁ (%)	E ₂ (%)	Desvio padrão
B6	11,258	10,331	0,660
B7	51,019	58,777	5,490
B8	90,245	92,296	1,450
B9	96,749	96,528	0,160
B10	95,743	95,623	0,080
Desvio médio			1,570

Fonte: Autoria própria (2017).

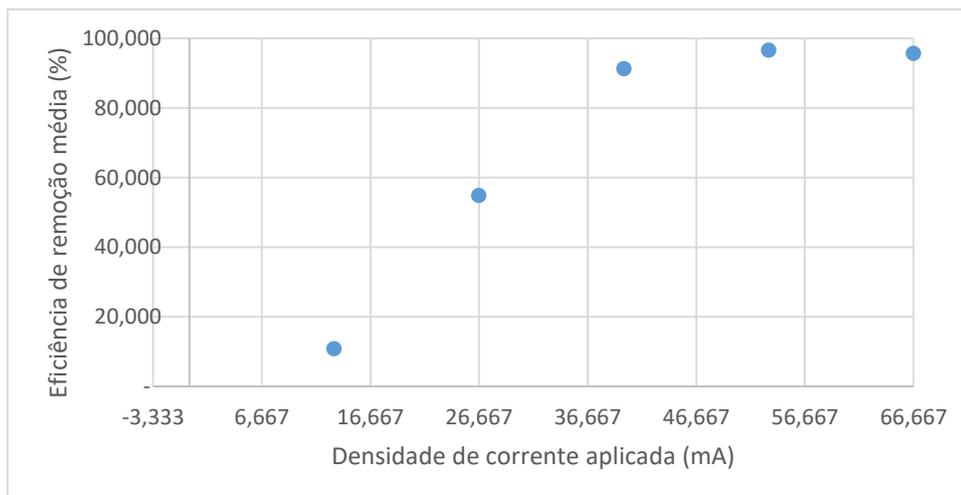


Figura 6. Gráfico da relação entre a corrente aplicada e a eficiência de remoção do ensaio em batelada com TRH de 8 min.
Fonte: Autoria própria (2017).

Estes ensaios com TRH de 8 minutos apresentaram na corrente de 53,333 mA.cm⁻², a capacidade máxima de tratamento do sistema. Ainda, comparando os ensaios cuja densidade de corrente aplicada foi 53,333 e 66,667 mA.cm⁻², com respectivas eficiências médias de remoção do corante de 96,639% e 95,683%, não se observa diferença significativa; podendo esta ser de ordem experimental, da variabilidade inerente de qualquer ensaio. Os valores apresentados pelo desvio padrão indicam uma menor variabilidade e maior precisão no preparo e amostragem dos ensaios B6, B9 e B10.

5.2 TRATAMENTO COM SISTEMA DE FLUXO CONTÍNUO (MÓDULO)

Nos ensaios de eletrocoagulação em sistema de fluxo contínuo, foram adotados tempos de retenção hidráulico (TRH) 4 vezes maior que os aplicados em sistema de batelada, 20 e 32 minutos, respectivamente.

A tabela 9 exhibe os resultados da aplicação do tratamento com TRH de 20 min e, a figura 7 ilustra o gráfico da relação entre a corrente elétrica aplicada com a eficiência de remoção do corante.

Tabela 9 - Aplicação da eletrocoagulação em sistema de fluxo contínuo com TRH de 20 min.

Ensaio	j^1 (mA.cm ⁻²)	Abs _{SB 1} ²	Abs _{T 1} ³	E ₁ ⁴ (%)	Abs _{SB 2} ⁵	Abs _{T 2} ⁶	E ₂ ⁷ (%)	E _M ⁸ (%)	i _{PE} ⁹ (mA)
C1	3,614	1,142	0,837	26,708	1,142	0,863	24,431	25,569	357,74
C2	7,227	1,152	0,115	90,017	1,152	0,104	90,972	90,495	715,49
C3	10,841	1,200	0,054	95,500	1,200	0,158	86,833	91,167	1073,23
C4	14,454	1,181	0,044	96,274	1,181	0,016	98,645	97,460	1430,98
C5	18,068	1,175	0,059	94,979	1,175	0,067	94,298	94,638	1788,72

Fonte: Autoria própria (2017).

¹ j (mA.cm⁻²) – densidade de corrente elétrica aplicada.

²Abs_{SB 1} – absorvância efluente bruto.

³Abs_{T 1} – absorvância efluente tratado.

⁴E₁ (%) – percentual de eficiência do tratamento.

⁵Abs_{SB 2} – absorvância efluente bruto duplicata.

⁶Abs_{T 2} – absorvância efluente tratado duplicata.

⁷E₂ (%) – percentual de eficiência do tratamento duplicata.

⁸E_M (%) – eficiência percentual média de tratamento do ensaio.

⁹i_{PE} (mA) – corrente elétrica por par de eletrodos.

Tabela 10 - Desvio padrão das eficiências de tratamento em sistema de fluxo contínuo com TRH de 20 min.

Ensaio	E ₁ (%)	E ₂ (%)	Desvio padrão
C1	26,708	24,431	1,610
C2	90,017	90,972	0,680
C3	95,500	86,833	6,130
C4	96,274	98,645	1,680
C5	94,979	94,298	0,480
Desvio médio			2,110

Fonte: Autoria própria (2017).

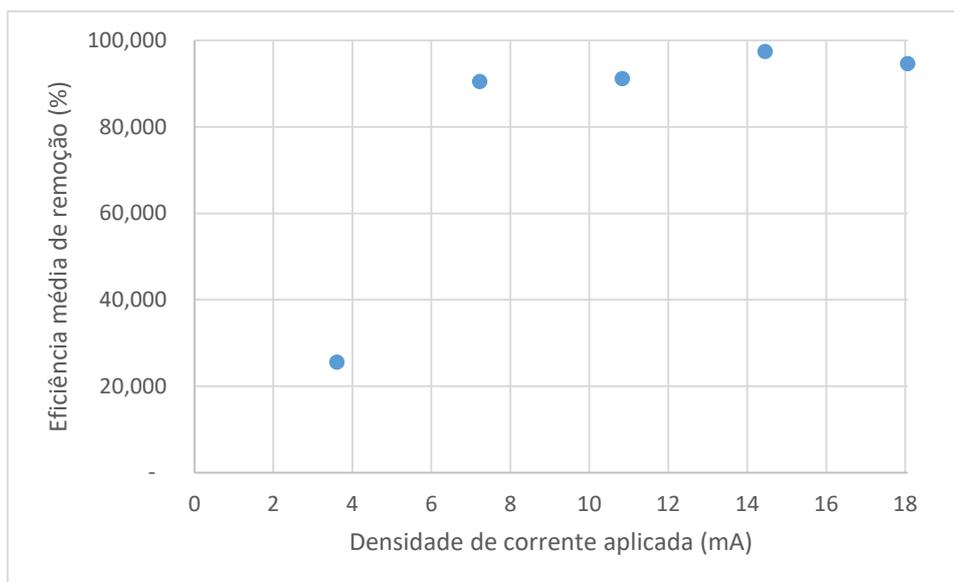


Figura 7. Gráfico da relação entre a corrente aplicada no sistema e a eficiência de tratamento em fluxo contínuo com TRH de 20 min.

Fonte: Autoria própria (2017).

Observou-se com a aplicação da densidade de corrente de $3,614 \text{ mA.cm}^{-2}$, uma eficiência média de remoção abaixo do esperado, de 25,569%. Quanto aos outros ensaios, todos apresentaram uma boa eficiência de remoção do corante, com destaque para o ensaio cuja densidade aplicada foi de $14,454 \text{ mA.cm}^{-2}$, com remoção média do corante de 97,460%. O sistema alcançou sua capacidade máxima de tratamento na densidade de corrente aplicada de $14,454 \text{ mA.cm}^{-2}$. A pequena diferença com relação ao ensaio com densidade de $18,068 \text{ mA.cm}^{-2}$, pode ser de ordem experimental, inerente à qualquer ensaio. O desvio padrão, indicou uma menor variabilidade nos ensaios C2 e C5 e, uma variabilidade mais acentuada no ensaio C3.

Na tabela 11, estão denotados os resultados da eletrocoagulação em sistema de fluxo contínuo com TRH de 32 minutos. Bem como a figura 8, que ilustra a relação carga aplicada e eficiência dos ensaios do respectivo TRH.

Tabela 11 - Aplicação da eletrocoagulação em sistema de fluxo contínuo com TRH de 32 min.

Ensaio	j^1 (mA.cm^{-2})	$\text{Abs}_{\text{B}1}^2$	$\text{Abs}_{\text{T}1}^3$	E_1 (%) ⁴	$\text{Abs}_{\text{B}2}^5$	$\text{Abs}_{\text{T}2}^6$	E_2^7 (%)	E_M^8 (%)	continua
									i_{PE}^9 (mA)
C6	3,614	1,136	0,109	90,405	1,136	0,146	87,148	88,776	1073,23

Tabela 12 - Aplicação da eletrocoagulação em sistema de fluxo contínuo com TRH de 32 min. conclusão

Ensaio	j^1 (mA.cm ⁻²)	Abs _{B 1} ²	Abs _{T 1} ³	E ₁ (%) ⁴	Abs _{B 2} ⁵	Abs _{T 2} ⁶	E ₂ ⁷ (%)	E _M ⁸ (%)	i _{PE} ⁹ (mA)
C7	7,227	1,158	0,016	98,618	1,158	0,059	94,905	96,762	2146,46
C8	10,841	1,148	0,008	99,303	1,148	0,040	96,516	97,909	3219,70
C9	14,454	1,174	0,010	99,148	1,174	0,057	95,145	97,147	4292,93
C10	18,068	1,208	0,017	98,593	1,208	0,023	98,096	98,344	5366,16

Fonte: Autoria própria (2017).

¹ j (mA.cm⁻²) – densidade de corrente elétrica aplicada.

²Abs_{B 1} – absorvância efluente bruto.

³Abs_{T 1} – absorvância efluente tratado.

⁴E₁ (%) – percentual de eficiência do tratamento.

⁵Abs_{B 2} – absorvância efluente bruto duplicata.

⁶Abs_{T 2} – absorvância efluente tratado duplicata.

⁷E₂ (%) – percentual de eficiência do tratamento duplicata.

⁸E_M (%) – eficiência média dos ensaios, percentual.

⁹i_{PE} (mA) – corrente elétrica por par de eletrodos.

Tabela 13 - Desvio padrão das eficiências de tratamento em sistema de fluxo contínuo com TRH de 32 min.

Ensaio	E ₁ (%)	E ₂ (%)	Desvio padrão
C1	90,405	87,148	2,300
C2	98,618	94,905	2,630
C3	99,303	96,516	1,970
C4	99,148	95,145	2,830
C5	98,593	98,096	0,350
Desvio médio			2,020

Fonte: Autoria própria (2017).

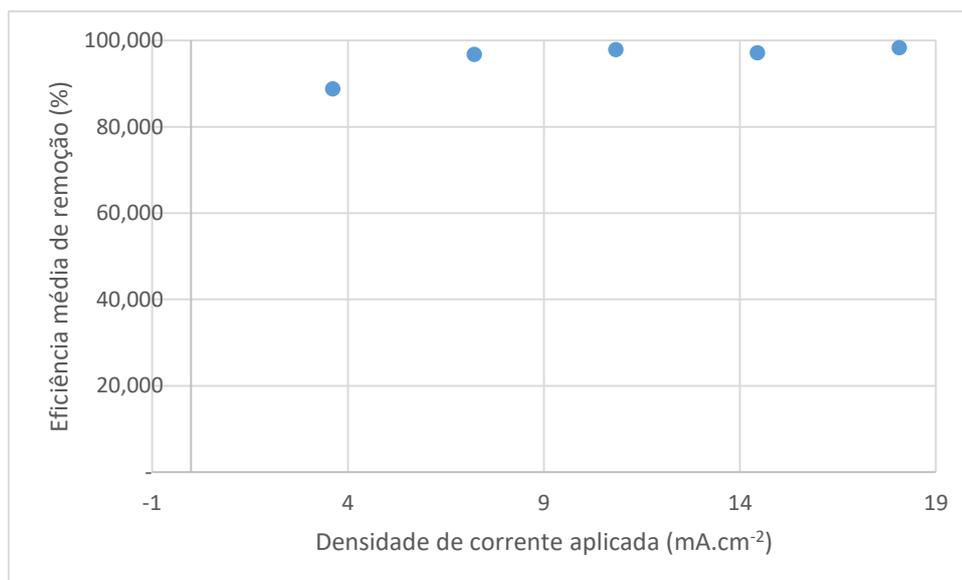


Figura 8. Gráfico da relação entre a corrente aplicada e a eficiência de remoção do corante em sistema de fluxo contínuo com TRH de 32 min.
Fonte: Autoria própria (2017).

Todos os ensaios com TRH de 32 minutos, apresentaram boa eficiência média de remoção do corante. A partir do ensaio com densidade de corrente aplicada de $7,227 \text{ mA.cm}^{-2}$, as eficiências de remoção do corante foram semelhantes, considerando a variabilidade do experimento. O cálculo do desvio padrão apontou uma variabilidade baixa no ensaio C5 e, os demais ensaios foram semelhantes.

5.3 CORRELAÇÃO ENTRE OS ENSAIOS EM BATELADA E FLUXO CONTÍNUO

Para a análise de correlação entre os resultados obtidos pelos ensaios, utilizou-se o software Microsoft Excel. Na tabela 13 estão representados os índices utilizados para esta análise, as eficiências médias de remoção do corante Azul 5G nos tratamentos em fluxo contínuo e batelada. A figura 9 apresenta o gráfico da relação entre os ensaios e a respectiva correlação encontrada.

Tabela 14 – Eficiências médias de remoção nos ensaios de eletrocoagulação em sistema de fluxo contínuo e batelada

Ensaio	Fluxo Contínuo (%)	Ensaio	Batelada (%)
C1	25,569	B1	32,180
C2	90,495	B2	32,180
C3	91,167	B3	33,832
C4	97,460	B4	91,649
C5	94,638	B5	93,971
C6	88,776	B6	10,795
C7	96,762	B7	54,898
C8	97,909	B8	91,271
C9	97,147	B9	96,639
C10	98,344	B10	95,683

Fonte: Autoria própria (2017).

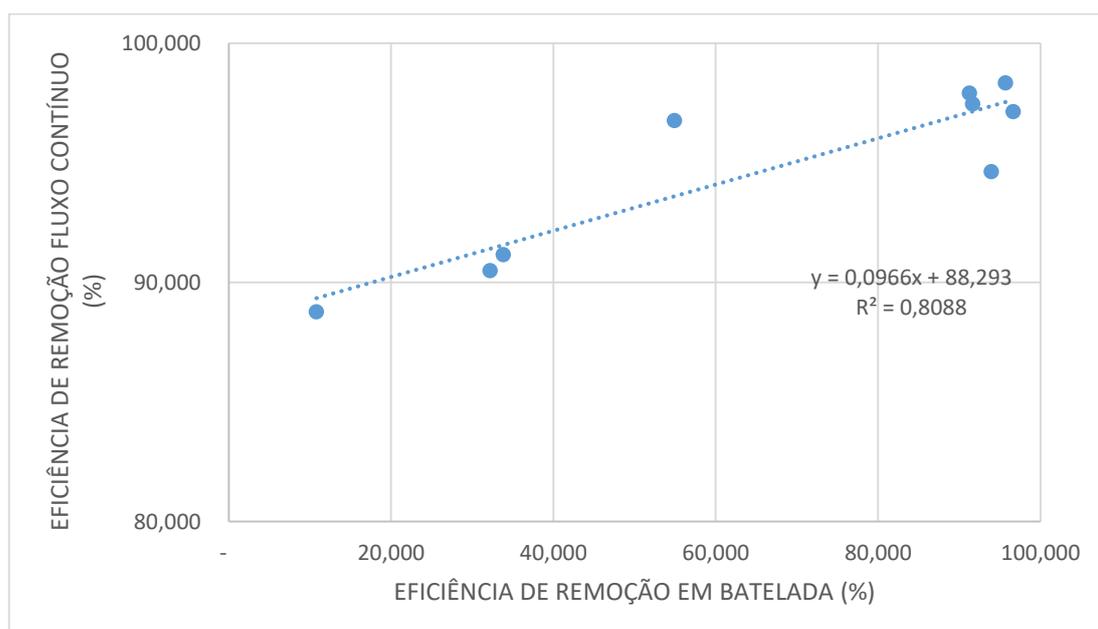


Figura 9. Gráfico de correlação entre os ensaios em sistema de batelada e fluxo contínuo

Fonte: Autoria própria (2017).

A análise de correlação indica o quanto as eficiências médias dos tratamentos em fluxo contínuo e batelada estão vinculadas. Quanto mais o coeficiente de correlação se aproxima de 1, mais fortemente correlacionadas estão as variáveis.

Para o ajuste da correlação, fez-se necessária a exclusão dos ensaios B₁ e C₁, apresentados na tabela 13, pois estes apresentaram uma discrepância acentuada com relação aos outros ensaios.

A correlação foi ajustada para estimar a eficiência de remoção do módulo de fluxo contínuo com base nos resultados do tratamento em batelada, apresentando a seguinte equação linear: $y = 0,0966x + 88,293$; onde x representa o percentual de remoção quando o tratamento é realizado pelo sistema em batelada e, y se refere a estimativa do percentual de remoção do módulo de fluxo contínuo. O coeficiente de correlação encontrado foi $R^2 = 0,8088$, que indicou uma correlação moderada entre as variáveis.

5.4 ENSAIOS DE VALIDAÇÃO

Para validação da correlação encontrada, foram realizados ensaios com condições distintas das apresentadas anteriormente, utilizando condições intermediárias de TRH e densidade de corrente aplicada.

No ensaio em sistema de batelada, fixou-se o TRH em 6,5 minutos e a densidade de corrente elétrica aplicada em 33,333 mA.cm⁻². Quanto ao tratamento no módulo de fluxo contínuo, foi aplicado uma densidade de corrente de 9,034 mA.cm⁻² e um TRH de 26 min. A tabela 15, apresenta os resultados dos ensaios de validação.

Tabela 15 – Aplicação da eletrocoagulação em sistema de batelada com TRH de 6,5 min e fluxo contínuo com TRH de 26 min.

Ensaio	j ¹ (mA.cm ⁻²)	Abs _{B 1} ²	Abs _{T 1} ³	E ₁ ⁴ (%)	Abs _{B 2} ⁵	Abs _{T 2} ⁶	E ₂ ⁷ (%)	E _M ⁸ (%)
Batelada	33,333	1,155	0,269	76,710	1,059	0,186	82,436	79,573
Fluxo contínuo	9,034	1,153	0,162	85,950	1,152	0,110	90,451	88,201

Fonte: Autoria própria (2017).

¹j (mA.cm⁻²) – densidade de corrente elétrica aplicada.

²Abs_{B 1} – absorvância efluente bruto.

³Abs_{T 1} – absorvância efluente tratado.

⁴E₁ (%) – percentual de eficiência do tratamento.

⁵Abs_{B 2} – absorvância efluente bruto duplicata.

⁶Abs_{T2} – absorvância efluente tratado duplicata.

⁷E₂ (%) – percentual de eficiência do tratamento duplicata.

⁸E_M (%) – eficiência média dos ensaios, percentual.

Partindo da equação linear que representou a correlação encontrada, $y = 0,0966x + 88,293$; substituiu-se a eficiência média de remoção do corante do ensaio de validação em sistema de batelada, $x = 79,573\%$, obtendo um valor de eficiência média de remoção no sistema em fluxo contínuo, $y = 95,980\%$. Portanto a correlação apontou que, a eficiência média de remoção no módulo com fluxo contínuo estimada era de 95,980%, porém, a eficiência média encontrada no ensaio de validação com fluxo contínuo foi de 88,201%.

Assim sendo, a correlação proposta apresentou um erro, que foi calculado através da equação 7, apresentada na seção 4.5.

$$e = \frac{Emr_{fc} - Emr_{corr}}{Emr_{fc}} * 100 = \frac{88,201 - 95,980}{88,201} * 100 = -8,82\%$$

Onde:

Emr_{fc} representa a eficiência média de remoção no ensaio com fluxo contínuo.

Emr_{corr} , a eficiência média de remoção estimada pela correlação.

Portanto, o erro da correlação ajustada foi de 8,82%. Dada a complexidade do processo de eletrocoagulação e a variação dos ensaios em sistema de batelada, este erro é dado como aceitável.

6 CONCLUSÃO

Os sistemas de tratamento apresentaram uma alta variabilidade especialmente o sistema de tratamento em batelada. Todavia, a variabilidade é um fator de dificuldade para a correlação entre os modos de operação (batelada e fluxo contínuo) do reator eletroquímico.

Os ensaios realizados cumpriram os objetivos propostos pelo estudo. Inicialmente, obter as condições operacionais iniciais de tratamento pelos sistemas em batelada e fluxo contínuo e analisar a eficiência de remoção do corante reativo Azul 5G que, posteriormente seria replicada no reator eletroquímico de simples canal, através da correlação proposta que indicou o quão vinculado estavam os sistemas de tratamento. Portanto, os resultados encontrados nos dois sistemas de tratamento foram satisfatórios. Mesmo se considerarmos o erro apresentado pela correlação ajustada, de 8,82%, que pode ser vinculado à alta variabilidade dos sistemas.

As eficiências satisfatórias de remoção do corante, superiores a 98% em alguns ensaios, evidenciam que o tratamento de efluentes por eletrocoagulação apresenta-se como uma importante alternativa à indústria têxtil, podendo ser aplicado em ensaios futuros em escala laboratorial e replicado em escala real.

Podem-se propor em planejamentos experimentais futuros, o aprimoramento do procedimento do ensaio em batelada, proporcionando menor variação. O fator utilizado para o ajuste do TRH em sistema de batelada e fluxo contínuo poderia ser incorporado como variável. Neste estudo, para o sistema em fluxo contínuo foi proposto um TRH com fator 4 vezes maior que o aplicado em batelada; portanto, se ajustado um valor mais adequado, o erro apresentado pela correlação proposta poderia ser minimizado. Estas alternativas podem ajustar uma equação de projeto mais precisa.

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA TÊXTIL E CONFECÇÃO. **Indústria Têxtil e de Confecção Brasileira**. 2013. 43 f. Disponível em: <http://www.abit.org.br/conteudo/links/publicacoes/cartilha_rtcc.pdf>. Acesso em: 01 out. 2016.
- BASTIAN, Elza Y. O. **Guia Técnico Ambiental da Indústria Têxtil**. 2009. 81 f. Disponível em: <http://consumosustentavel/cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/39/2013/11/guia_textil.pdf>. Acesso em: 01 out. 2016.
- BELTRAME, Leocádia T. C. **Caracterização de Efluente Têxtil e Proposta de Tratamento**. 2000. 161 f. Dissertação (Pós Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2000.
- BRUNELLI, Tamara F. T. et al. **Degradação fotoeletroquímica de corantes dispersos em efluente têxtil utilizando fotoanodo de Ti/TiO₂**. 2009. Revista Química Nova, São Paulo, v. 32, n. 1, p. 67-71, 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/qn/v32n1/v32n1a13.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2016.
- CAMPOS, Antônio C., PAULA, Nilson M. **A Indústria Têxtil Brasileira em um Contexto de Transformações Mundiais**. Revista Econômica do Nordeste, Fortaleza, v. 37, n. 4, p. 592-608, 2006. Disponível em: <http://www.bnb.gov.br/projwebren/Exec/artigoRenPDF.aspx?cd_artigo_ren=382>. Acesso em: 01 out. 2016.
- CERQUEIRA, Alexandre A. **Aplicação da Técnica de Eletrofloculação no Tratamento de Efluentes Têxteis**. 2006. 111 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- CERVELIN, Patricia. **Avaliação da remoção do corante comercial reativo Azul 5G utilizando macrófita *Salvinia sp.*** 2010. 106 f. Dissertação (Pós Graduação em Engenharia Química) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2010.
- CORDEIRO, Ramon et al. **Purificação e utilização de águas residuárias na produção de biodiesel por meio da eletrofloculação**. 2015. Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade, p. 51-58. ISSN 2359-1412.
- CRESPILHO, F. N., REZENDE, M. O. O. **Eletroflotação: Princípios e Aplicações**. 2004. 96 p. 1ª Edição. Editora Rima. São Carlos, SP.

CRESPILHO, F. N., SANTANA, Claudemir G., REZENDE, Maria O. O. **Tratamento de efluente da indústria de processamento de coco utilizando eletroflotação**. 2004. Revista Química Nova, São Paulo, v. 27, No. 3, p. 387-392.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS. **Guia Técnico Ambiental da Indústria Têxtil**. Disponível em: <http://www7.fiemg.com.br/Cms_Data/Contents/central/Media/Documentos/Biblioteca/PDFs/FIEMG/MeioAmbiente/2014/CartilhasPublica%C3%A7%C3%B5es/FI-0054-14-CARTILHA-PRODUCAO-MAIS-LIMPA-INTRANET.pdf>. Acesso em: 08 out. 2016.

FORNARI, Marilda M. T. **Aplicação da Técnica de Eletro-floculação no Tratamento de Efluentes de Curtume**. 2007. 94 f. Dissertação (Pós Graduação em Engenharia Química) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2007.

GUARATINI, Cláudia C. I., ZANONI, Maria V. B. **Corantes têxteis**. Revista Química Nova, São Paulo, v. 23, n. 1, p. 71-78, Jan/Fev 2000. Disponível em: <http://quimicanova.sbq.org.br/imagebank/pdf/Vol23No1_71_v23_n1_%2812%29.pdf>. Acesso em: 23 out. 2016.

HONORATO, Andressa C., CAETANO, Josiane. **Biossorção do corante reativo azul 5G utilizando biomassa de mandioca**. 2015. 69 f. Dissertação (Pós Graduação em Ciências Ambientais) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2015.

KUNZ, Ayrton et al. **Novas Tendências no Tratamento de Efluentes Têxteis**. Revista Química Nova, São Paulo, v. 25, n. 1, p. 78-82, 2002. Disponível em: <<http://quimicanova.sbq.org.br/default.asp?ed=205>>. Acesso em: 20 out. 2016.

LEITE, Laís S. **Degradação do Corante Comercial Disperse Red 1 por Processo Foto-Fenton e Avaliação Ecotoxicológica**. 2014. 57 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Estadual Paulista, Araraquara, 2014.

MANENTI, Diego. R. et al. **Avaliação do desempenho de um sistema de tratamento utilizando os processos eletrocoagulação e foto-fenton integrados no tratamento de um efluente têxtil**. 2014. Revista Engevista, v. 16, No. 3, p. 420-431.

MATTA, Gleisy K. L. et al. **Dynamic Isotherms of Dye in Activated Carbon**. 2008. Materials Research, v. 11, No. 3, p. 365-369.

MOLLAH, M. Y. A. et al. **Eletrocoagulation (EC) – science and applications**.2000. Disponível em: <http://www.jpcomplex.ir/content/media/image/2013/08/773_orig.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2016.

MOLLAH, M. Y. A. et al. **Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation**. Journal of Hazardous Materials, v. B114, p. 199-210, 2004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389404004170>>. Acesso em: 20 nov. 2016.

NETO, Sidney A. **Tratamento de resíduo de corante por eletrofloculação: Um experimento para cursos de graduação em Química**. 2011. Revista Química Nova, São Paulo, v. 34, n. 8, p. 1468-1471, 2011. Disponível em: <http://quimicanova.sbq.org.br/imagebank/pdf/Vol34No8_1468_29-ED10707.pdf>. Acesso em: 25 nov. 2016.

OLIVEIRA, Marcella C. L. de. **Descoloração de corante industrial por *Pseudomonas oleovorans* CBMAI 0703**. 2010. 60 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Biológicas) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010. Disponível em: <http://repositorio.ufpe.br/bitstream/handle/123456789/1303/arquivo118_1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 03 nov. 2016.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Declaração “ONU Água”**. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/acao/agua/>>. Acesso em: 08 out. 2016.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Novo estudo da ONU indica que mundo terá 11 bilhões de habitantes em 2100**. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/novo-estudo-da-onu-indica-que-mundo-tera-11-bilhoes-de-habitantes-em-2100/>>. Acesso em: 15 nov. 2016.

PASCHOAL, Fabiana M. M., TREMILIOSI-FILHO, Germano. **Aplicação da tecnologia de eletrofloculação na recuperação do corante índigo blue a partir de efluentes industriais**. 2005. Revista Química Nova, São Paulo, v. 28, No. 5, p. 766-762.

PINTO, André H. **Controle baseado em redes neurais artificiais, aplicado a um sistema híbrido de tratamento para remoção do corante reativo azul 5G de solução sintética**. 2016. 67 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2016.

POON, C. P. C., **Electroflotation for groundwater decontamination**. Journal of Hazardous Materials, v. 550, p. 159-170, 1997.

ROYER, Betina. **Remoção de corantes têxteis utilizando casca de semente de *Araucaria angustifolia* como bioissorvente**. 2008. 68 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

Disponível em: <

<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/13665/000651967.pdf?sequence=1>

>. Acesso em: 21 nov. 2016.

SANTOS, Bruna S. **Sistema de tratamento híbrido utilizado na remoção do corante reativo 5G de um efluente têxtil sintético**. 2015. 97 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2015.

SOARES, José L. **Remoção de corantes têxteis por adsorção em carvão mineral ativado com alto teor de cinzas**. 1998. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998. Disponível em: < <https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/77807/PENQ0035-D.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 21 nov. 2016.

SOBREIRA, Leonardo A. D. **Estudo da degradação do corante amarelo ouro remazol RNL 133% através do processo foto-Fenton**. 2009. 71 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2009.