

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE GRADUAÇÃO E EDUCAÇÃO PROFISSIONAL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

ANDRIELI CRISTINA HELMANN

**OTIMIZAÇÃO DE REATOR ELETROQUÍMICO, COM ARRANJO
DE ELETRODOS CILÍNDRICOS, DESTINADO A REMOÇÃO DO
CORANTE REATIVO AZUL 5G DE SOLUÇÕES SINTÉTICAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**MEDIANEIRA
2016**

ANDRIELI CRISTINA HELMANN

**OTIMIZAÇÃO DE REATOR ELETROQUÍMICO, COM ARRANJO DE
ELETRODOS CILÍNDRICOS, DESTINADO A REMOÇÃO DO CORANTE
REATIVO AZUL 5G DE SOLUÇÕES SINTÉTICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental, do Curso de Engenharia Ambiental, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Medianeira.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Eyng

MEDIANEIRA
2016



TERMO DE APROVAÇÃO

OTIMIZAÇÃO DE REATOR ELETROQUÍMICO, COM ARRANJO DE ELETRODOS CILÍNDRICOS, DESTINADO A REMOÇÃO DO CORANTE AZUL REATIVO 5G DE SOLUÇÕES SINTÉTICAS

por

ANDRIELI CRISTINA HELMANN

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado em 22 de junho de 2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Eduardo Eyng
Orientador

Prof. Me. Fábio Orssatto
Membro titular

Me. Leandro Fleck
Membro titular

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

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus acima de tudo.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Eduardo Eyng pelo aprendizado, apoio, paciência e incentivo.

A todos os professores que contribuíram para minha formação.

Ao meu namorado pelo apoio, compreensão e amor.

A minha família que sempre acreditou que eu seria capaz.

Aos amigos que sempre estiveram ao meu lado e que sabem o quanto foi difícil chegar até aqui. Agradeço imensamente pela amizade e paciência.

Enfim, a todos que direta ou indiretamente colaboraram para a realização deste trabalho.

Quem luta com monstros deve velar
por que, ao fazê-lo, não se
transforme também em monstro. E
se tu olhares, durante muito tempo,
para o abismo, o abismo também
olha para dentro de ti. (NIETZSCHE,
Friedrich, 1886)

RESUMO

HELMANN, Andrieli Cristina. **Otimização de reator eletroquímico, com arranjo de eletrodos cilíndricos, destinado a remoção do corante reativo azul 5G de soluções sintéticas**. 2016. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2016.

A crescente preocupação com as questões ambientais tem influenciado diretamente a tomada de decisão dos mais diversos setores industriais. As indústrias têxteis possuem como características desafiadoras, o grande volume de efluentes gerados em seus processos, bem como a presença de corantes no mesmo. Um tratamento que vem sendo estudado é o tratamento eletroquímico, também chamado eletrofloculação. Esse tratamento consiste na geração de coagulantes *in situ*, a partir da oxidação de eletrodos metálicos. Sabe-se que alguns fatores influenciam na eficiência do tratamento, como por exemplo as características dos eletrodos utilizados. Nesse sentido, objetivou-se com o presente estudo otimizar as condições operacionais de um reator eletroquímico, com arranjo de eletrodos cilíndricos, destinado a remoção de corante reativo azul 5G de soluções sintéticas. A escolha do material para construção dos eletrodos levou em conta a facilidade de manipulação e sua disponibilidade no mercado. Optou-se dessa maneira, por utilizar vergalhões que foram ajustados de acordo com o reator eletroquímico existente e a área desejada. Para realização dos ensaios fez-se uso de um delineamento composto central rotacional (DCCR), sendo estudada a influência da intensidade de corrente e o tempo de retenção hidráulico na variável resposta remoção de cor. Realizou-se um total de doze ensaios, sendo 2² ensaios fatoriais, quatro repetições no ponto central e quatro ensaios axiais. Tal experimento possibilitou a geração de um modelo de segundo grau que posteriormente possibilitou a otimização do processo. O melhor resultado obtido nos ensaios foi de 97,84% de remoção de cor, sendo utilizadas as condições operacionais de intensidade de corrente de 3,14 A e tempo de retenção hidráulico de 22,09 min. A partir da realização do teste F, constatou-se a validade de modelo, com um coeficiente de determinação de 0,97. Os ensaios de validação foram realizados nas condições 2,67 A de intensidade de corrente e 15 min de tempo de retenção hidráulica, possibilitando o cálculo do erro implícito no modelo que correspondeu a 2,34%.

Palavras-chave: Delineamento Composto Central Rotacional. Eletrodos. Eletrofloculação. Indústria Têxtil.

ABSTRACT

HELMANN, Andrieli Cristina. **Electrochemical reactor optimization, with arrangement of cylindrical electrodes, for the removal of the blue reactive dye 5G synthetic solutions**. 2016. 46 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2016.

The growing concern about environmental issues has directly influenced the decision making of various industrial sectors. Textile industries have as challenging features, the large volume of effluents generated in its processes, as well as the presence of dyes in it. A treatment that has been studied is the electrochemical treatment, also called electroflocculation. This treatment consists in the generation of coagulants in situ from the oxidation of metallic electrodes. It is known that certain factors influence the efficiency of the treatment, such as the characteristics of the electrodes used. In this sense, the aim of the present study to optimize the operating conditions of an electrochemical reactor, with arrangement of cylindrical electrodes for the blue reactive dye removal 5G synthetic solutions. The choice of material for the construction of electrodes took into account the ease of handling and its availability in the market. It was decided in this way, to use rods that have been adjusted according to the existing electrochemical reactor and the desired area. For the tests was made using a central composite design (CCRD), and studied the influence of the current intensity and the hydraulic retention time in the response variable color removal. We performed a total of twelve tests being 2^2 factor assays, four replicates at the central point and four axial assays. This experiment allowed the generation of a second degree model that later enabled process optimization. The best results obtained in the assays was 97.84% color removal, are used the operating conditions of current density of 3.14 A and the hydraulic retention time 22.09 min. From the completion of the F test showed the validity of model, with a coefficient of determination of 0.97. Validation tests were performed under the conditions 2,67 A current intensity and 15 min of hydraulic retention time, enabling the calculation of the implicit error in the model corresponding to 2.34%.

Keywords: Design Central Composite Rotational. Electrodes. Electroflocculation. Textile Industry.

Lista de Figuras

Figura 1 – Etapas do processo produtivo têxtil simplificado	16
Figura 2 - Vista superior de arranjos de eletrodos (a) horizontal e (b) vertical .	22
Figura 3 - Ilustração do reator eletroquímico.....	24
Figura 4 – Dimensões dos eletrodos (a) e visão 3D (b)	25
Figura 5 – Visão lateral (a) e superior (b) do reator eletroquímico	26
Figura 6 - Remoção da cor da solução aparente no reator	31
Figura 7 - Amostras de diferentes ensaios	33
Figura 8 - Diagrama de Pareto	34
Figura 9 - Superfície de resposta 3D (a) e 2D (b)	36
Figura 10 - Formação de microbolhas durante o tratamento	40
Figura 11 - Retenção de lodo durante o tratamento	40

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Caracterização química de efluente têxtil.....	17
Tabela 2 – Concentrações de metais no efluente	17
Tabela 3 – Delineamento de tratamentos	28
Tabela 4 – Valores reais dos fatores.....	28
Tabela 5 - Resultados obtidos para remoção da cor.....	32
Tabela 6 - Coeficiente de regressão	33
Tabela 7 - Análise de variância	35
Tabela 8 - Resultados dos ensaios de validação do modelo	37
Tabela 9 - Melhores resultados e condições operacionais de estudos de eletrofloculação	38

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	10
2 OBJETIVO GERAL	12
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
3.1 POLUIÇÃO AMBIENTAL	13
3.2 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL.....	14
3.3 PROCESSOS INDUSTRIAIS.....	15
3.4 INDÚSTRIA TÊXTIL	15
3.4.1 Corantes	18
3.5 SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES.....	19
3.5.1 Tratamento Eletroquímico.....	20
3.5.1.1 Eletrodos	21
3.6 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	22
4 MATERIAL E MÉTODOS.....	24
4.1 REATOR ELETROQUÍMICO.....	24
4.1.1 Eletrodos.....	25
4.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	27
4.3 PREPARO DAS SOLUÇÕES	28
4.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	29
4.5 OTIMIZAÇÃO.....	30
4.6 VALIDAÇÃO	30
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	41
REFERÊNCIAS.....	42

1 INTRODUÇÃO

Desde o início dos tempos, o homem modifica o ambiente onde vive. Os resultados de seus hábitos afetam qualidade da água, a atmosfera e o solo.

O cenário atual demonstra uma crescente preocupação com as questões ambientais. A água, elemento essencial para as mais diversas atividades industriais, vem sendo alvo de muitos estudos que objetivam garantir sua qualidade e disponibilidade. Não obstante, a legislação, cada vez mais restritiva, faz com que os usuários busquem por hábitos mais conscientes.

Outro ponto a ser destacado é o da saúde pública, uma vez que a disponibilidade de água de qualidade interfere de maneira direta na saúde da população. Nesse sentido, há uma demanda não apenas de tecnologias que venham à auxiliar nos processos industriais, mas que visem em primeiro lugar a qualidade ambiental e o bem-estar da população ao entorno.

O setor industrial, por sua vez, necessita de tecnologias que permitam atender suas demandas de mercado e reduzir os impactos causados ao meio ambiente. Nesse contexto, surgem tecnologias que visam a reutilização de recursos que além de causarem um bem ambiental, geram uma economia financeira.

Segundo Alvarenga (2009), o setor têxtil consome 15% da fração de água destinada às indústrias e é considerado um dos maiores geradores de efluentes líquidos. Para a produção de 1 tonelada de produto têxtil, são necessárias aproximadamente 200 m³ de água. Em 2011, o Brasil possuía a quinta maior produção de manufaturados têxteis, com uma produção de aproximadamente 2 milhões de toneladas (BELTRAME, 2000; BEZERRA 2014).

As indústrias do setor têxtil possuem como desafio, remover a cor característica de seus efluentes. O mercado oferece tecnologias bastante eficientes para remoção de cor, sendo que muitos estudos vêm sendo desenvolvidos para aumentar a eficiência e reduzir custos. Uma técnica bastante utilizada em outros efluentes e que recentemente vem ganhando espaço nas pesquisas com efluentes têxteis, é a eletrofloculação.

A eletrofloculação, consiste em um tratamento eletroquímico que se utiliza de eletrodos de sacrifício metálicos em meio aquoso para formação de

coagulantes *in situ*. Os coagulantes são formados a partir de uma diferença de potência aplicada aos eletrodos, ocorrendo então a oxidação do ânodo e a deposição no cátodo. Devido ao fato dos eletrodos estarem submersos no efluente a ser tratado, os íons metálicos oxidados no ânodo tendem a desestabilizar as partículas coloidais. Nesse processo ocorre também a formação de microbolhas de hidrogênio, devido à hidrólise da água. Estas microbolhas irão arrastar as partículas recém coaguladas para a superfície, formando lodo.

A eficiência do tratamento, entre outros fatores, está relacionada com os eletrodos. Material, formato, área útil e distância entre cátodo e ânodo são algumas das características que podem influenciar.

Muito se fala sobre o arranjo dos eletrodos, como no estudo realizado por Mollah et al (2014) onde contempla-se arranjos horizontais e verticais. Porém, em sua maioria, são utilizados eletrodos no formato de placas planas, pois estes são comumente encontrados no mercado. Este fato leva a necessidade de testar outros formatos que possuam maior facilidade de construção e manutenção, sem prejudicar a eficiência do tratamento.

2 OBJETIVO GERAL

Otimizar as condições operacionais de um reator eletroquímico, com arranjo de eletrodos cilíndricos, destinado a remoção de corante reativo azul 5G de soluções sintéticas.

2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a remoção do corante reativo azul 5G de soluções aquosas por meio de reator eletroquímico operado em fluxo contínuo;
- Ajustar um modelo preditivo da remoção do corante em função da intensidade de corrente elétrica e tempo de detenção hidráulica;
- Otimizar as condições operacionais do reator para remoção do corante em questão;
- Comparar os resultados obtidos utilizando eletrodos cilíndricos, com trabalhos onde foram utilizados eletrodos na forma de placas planas.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 POLUIÇÃO AMBIENTAL

Desde o início da história da humanidade, o homem promove a alteração do meio ambiente pelos produtos físicos e químicos resultantes de suas atividades. Vinculado a isso, o aumento da população mundial e do consumo de energia, a intensificação do processo de industrialização e urbanização, são consideradas as principais causas da atual crise ambiental. Por outro lado, o desenvolvimento da ciência e da tecnologia, tem auxiliado na melhoria da qualidade de vida da população (LORA, 2000).

O aumento da industrialização acarretou no aumento do volume das águas residuárias a serem eliminadas. Devido a isso, houve grandes prejuízos ambientais que levaram os órgãos responsáveis a adotarem medidas mais rigorosas, como a criação de legislações específicas para a gestão da água, ar e solo (TANKSALI, 2013).

Poluição ambiental é definida por Lora (2000) como sendo as mudanças nas características físico-químicas ou biológicas do ar, água ou solo que afetam negativamente a saúde, a sobrevivência ou as atividades humanas e de outros organismos vivos.

Para Imhoff e Imhoff (2000), a questão da saúde pública está diretamente relacionada à contaminação das águas de abastecimento. Evidentemente que os processos de tratamento não devem se basear apenas na garantia da qualidade da água, mas também na sua disponibilidade (SHREVE; BRINK, 1997).

Nesse sentido, as indústrias devem fundamentar-se nos preceitos do desenvolvimento sustentável, conciliando o desenvolvimento econômico com a preservação do meio ambiente e o uso racional da água, da energia e demais recursos naturais. Cabe a sociedade impor um comportamento ambiental correto através de leis e normas (LORA, 2000).

3.2 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL

Segundo Imhoff e Imhoff (2000), o que irá definir o grau de tratamento necessário de determinado efluente são as especificações de qualidade referentes ao corpo d'água no qual o mesmo será lançado.

Nesse sentido, a Lei 9.433/97 institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), sendo que um de seus instrumentos refere-se ao enquadramento dos corpos d'água em classes, de acordo com os usos que essa possa vir a ter (BRASIL, 2015).

O Ministério do Meio Ambiente (2015), dispõe de resolução que regulamentam as questões relacionadas aos efluentes industriais. Conforme exposto a seguir:

A Resolução CONAMA 357/2005, dispõe sobre a classificação dos corpos d'água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2015). A Resolução CONAMA 430/2011, dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2015).

Os padrões de lançamento de efluentes irão influenciar de maneira direta nos padrões de potabilidade das águas, estabelecidos pelo Ministério de Saúde a partir da Portaria 2914/2011, que estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade (BRASIL, 2015).

Segundo a Organização Mundial da Saúde (2011), a água pode ser considerada potável quando é inofensiva a saúde do homem, agradável aos sentidos e adequada aos usos domésticos. Nesse sentido são determinados os padrões de potabilidade que irão definir os limites de tolerância das substâncias presentes na água, que são divididos em físicos, químicos e bacteriológicos (WOH, 2011).

De maneira geral, para os padrões de potabilidade físicos são considerados cor, turbidez, sabor, odor e temperatura. Para os químicos, considera-se a presença de substâncias químicas e para os bacteriológicos, os microrganismos vivos presentes na água. (CHERNICHARRO et al, 2007).

De acordo com Umbuzeiro (2012), o lançamento de efluentes industriais sem um tratamento prévio eficiente, pode comprometer o atendimento dos padrões de potabilidade. Os parâmetros físicos, por exemplo, em sua maioria, estão relacionados a presença de partículas sólidas em suspensão, dissolvidas e coloidais.

3.3 PROCESSOS INDUSTRIAIS

As características dos efluentes industriais apresentam uma ampla variabilidade. Essa variabilidade é correlata com o tipo de indústria e com o processo industrial utilizado (VON SPERLING, 1996).

De acordo com Lora (2000), é essencial que as indústrias tenham conhecimento do fluxo e composição dos efluentes gerados em seus diferentes processos, bem como da variação destas com o passar do tempo. Com isso, torna-se possível configurar o sistema de tratamento de efluentes que irá depender, além dos fatores citados anteriormente, do custo de implantação e operação do projeto.

Uma técnica bastante utilizada atualmente é o reuso da água. A reutilização industrial tende a controlar e/ou diminuir a poluição. Isso ocorre devido à preocupação que se têm em obter uma água livre de poluentes e que atenda às necessidades da indústria. Nesse sentido, há um controle mais rigoroso dos processos, chegando ao ponto de que em algumas áreas, as águas servidas sejam de qualidade superior às águas oriundas de corpos hídricos (SHREVE; BRINK, 1997; METCALF; EDDY, 1979).

Diante do cenário de crise hídrica, Lora (2000) enfatiza a relevância de se avaliar a possibilidade da reutilização de água nos processos industriais, antes mesmo de projetar processos de tratamento de água.

3.4 INDÚSTRIA TÊXTIL

A indústria têxtil demanda em seus processos industriais de grandes quantidades de água, o que irá variar principalmente de acordo com os

equipamentos utilizados e as fibras processadas (FREITAS, 2002; ALVARENGA, 2009). Outro fator a ser destacado é a ampla utilização de produtos considerados tóxicos, o que conferem um alto potencial poluidor ao efluente gerado (ALVIM et al, 2009).

Não obstante, as indústrias têxteis destacam-se como um dos setores que mais causam poluição ambiental. Além de um efluente líquido com uma composição bastante variável, também gera resíduos sólidos perigosos, emissões atmosféricas, ruídos e odores que impactam de maneira negativa no meio (FRANCO, 2009).

Chaim (2014) simplificou o processo produtivo têxtil em seis etapas, conforme a Figura 1.

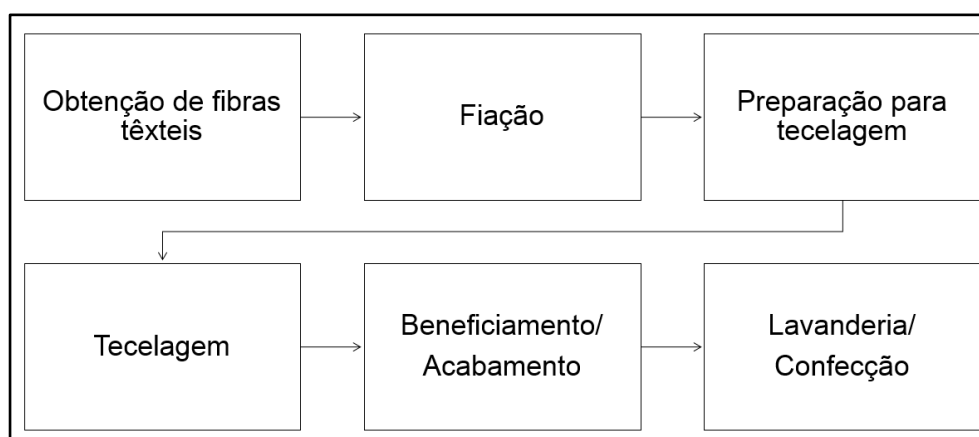


Figura 1 – Etapas do processo produtivo têxtil simplificado
Fonte: Adaptado de Chaim (2014)

Segundo Palácio (2009), o processo de tingimento (beneficiamento) é o que mais contribui para a demanda química de oxigênio presente do efluente, devido aos corantes que não são fixados as fibras.

Devido as variações existentes nos processos industriais têxteis, as características dos efluentes também variam. Palácio (2009) caracterizou quimicamente (Tabela 1) efluente oriundo de lavanderia industrial cujas principais atividades eram tingimento e descoloramento de jeans.

Tabela 1 - Caracterização química de efluente têxtil

Parâmetro	Valor	Unidade
pH	12,49	-
Nitrogênio orgânico	1,91	mg.L ⁻¹
Nitrogênio amoniacal	1,33	mg.L ⁻¹
DQO	1636,36	mg.L ⁻¹
Sulfato	2684,00	mg.L ⁻¹
Turbidez	306,00	(NTU)

Fonte: Adaptado de Palácio (2009)

Palácio (2009) também caracterizou o efluente quanto a presença dos metais: S, Cl, Ca, Fe e Cu, conforme Tabela 2.

Tabela 2 – Concentrações de metais no efluente

Elemento	Concentração (mg.L⁻¹)
S	878,20
Cl	3810,00
Ca	68,26
Fe	1,11
Cu	1,84

Fonte: Adaptado de Palácio (2009)

No decorrer da história da humanidade, é perceptível o aumento do interesse na redução da poluição ambiental pelo setor industrial. Observa-se que, além das tecnologias empregadas nas estações de tratamento de efluentes, as indústrias vêm desenvolvendo métodos que possibilitem a redução de insumos na cadeia produtiva. Isso ocorre através da reutilização, reciclagem e recuperação de produtos, diminuindo os custos e a utilização de recursos naturais. No que se refere a água, grande parte das indústrias do setor têxtil, optam pela reutilização da mesma em seus processos (FREITAS, 2002).

Segundo Alvarenga (2009); Freitas (2002), devido ao grande volume de efluentes líquidos gerado e a elevada quantidade de carga poluidora presente

neste, a reutilização da água no processo produtivo ainda pode ser encarada com um desafio para muitas indústrias do setor têxtil.

3.4.1 Corantes

Os corantes são compostos coloidais que tem como função principal conferir cor quando aplicados em determinado material. Sua molécula é dividida em duas partes principais, o grupo cromóforo que é responsável pela cor e o grupo funcional que proporciona a fixação do corante a fibra (BELTRAME, 2000; FRANCO, 2009).

Os corantes com maior utilização pelas indústrias, são os considerados sintéticos. Tipicamente derivados de alcatrão e derivados do petróleo, eles possuem características interessantes do ponto de vista operacional, como estabilidade à luz, distribuição uniforme, alto grau de fixação e resistência a lavagem. No que se refere a solubilidade, tal característica confere um potencial tóxico ao efluente que o contém (BELTRAME, 2000).

Dentre os corantes sintéticos disponíveis no mercado, existem os conhecidos como reativos. Tais corantes possuem como características a alta solubilidade e solidez, além de possibilitar a obtenção de muitos tons, uma vez que realizam ligações covalentes com os produtos têxteis (ALVARENGA, 2009; FREITAS, 2000).

De acordo com Schimmel (2008), dentre os corantes reativos, um dos mais utilizados para o tingimento do tipo “jeans” é o Azul 5G. Com solubilidade acima de 100 g L^{-1} a 25°C , tal corante pertence à classe dos reativos monoclorotriazina do tipo azo.

Durante o processo produtivo, os corantes que não são totalmente fixados às fibras, são removidos no processo de lavagem, conferindo uma coloração característica no efluente final, sendo de difícil remoção devido à alta solubilidade e baixa degradabilidade do mesmo. No corpo receptor, a presença destas substâncias modifica o ecossistema, uma vez que interfere na passagem da luz solar, altera o pH e a condutividade do meio (BELTRAME, 2000; FRANCO, 2009).

3.5 SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

Segundo Lora (2000), alguns dos principais poluentes a considerar durante o tratamento de efluentes, são: sólidos suspensos, compostos orgânicos biodegradáveis, nutrientes e compostos orgânicos voláteis.

No que tange a eficiência dos sistemas de tratamento, destaca-se a influência do tamanho das partículas existentes. Segundo Imhoff e Imhoff (2000), os colóides podem ser convertidos a substâncias insolúveis tanto por processos físicos, químicos e também eletroquímicos através da coagulação.

A coagulação, refere-se ao processo de desestabilização das partículas coloidais, fazendo com que estas se aglomerem e possam ser eliminadas por floculação. A floculação por sua vez pode ocorrer pelo método hidráulico. Tanto a coagulação, como a floculação são considerados métodos físicos, nos quais são aplicadas forças físicas para realização do tratamento (LORA, 2000).

O sistema de tratamento de efluentes têxteis baseia-se principalmente na redução da cor, carga orgânica e toxicidade, visando atender as legislações vigentes. Na maioria das indústrias, os sistemas adotados contam com processos de tratamento físico-químicos seguidos de sistemas biológicos como lodos ativados (PEREIRA et al, 2010).

Segundo Quadros (2005), com o avanço das pesquisas e a criação de novas tecnologias, o mercado hoje disponibiliza vários métodos e sistemas para o tratamento de efluentes têxteis, desde sistemas mais simples e tradicionalmente usados, até sistemas mais sofisticados e complexos. A eficiência do sistema irá variar de acordo com os processos empregados, as fibras e corantes utilizados, o volume de efluente gerado, entre outros. A escolha do tratamento adequado irá depender dos padrões que devem ser alcançados, da área disponível e da compatibilidade financeira da indústria.

Devido aos grandes impactos que os efluentes têxteis podem causar ao meio, novas tecnologias vêm sendo desenvolvidas de modo a atender a demanda por sistemas cada vez mais eficientes e acessíveis do ponto de vista econômico (KUNZ et al, 2002).

Gili (2016), avaliou a técnica de eletrofloculação (em planta) para tratamento de efluentes têxteis em uma indústria. Os resultados obtidos pelo autor foram favoráveis, sendo que na ocasião foram testados os seguintes parâmetros: cor, sólidos, pH, demanda química de oxigênio (DQO), demanda biológica de oxigênio (DBO), coliformes, fósforo, nitrogênio, óleos e graxas, surfactantes e metais.

3.5.1 Tratamento Eletroquímico

Wiendl (1998) explica que a corrente elétrica, ao passar por um condutor líquido, ocasiona sua decomposição química, denominada eletrólise. Ao mergulhar em um eletrólito, dois eletrodos afastados entre si e ligados a uma fonte de corrente contínua, tem-se um reator eletrolítico, com o ânodo ao polo positivo e o cátodo ao negativo. Alguns fatores poderão influenciar nesse fenômeno, tais como: material dos eletrodos, natureza dos compostos responsáveis pela condutividade da solução, grau de retificação da corrente elétrica, tensão dos eletrodos, densidade de corrente elétrica nas faces dos eletrodos, distância entre eles e condutividade elétrica do eletrólito.

Nesse contexto, a movimentação de íons em direção ao cátodo e ânodo, causa a dissociação das moléculas. No que se refere aos efluentes industriais, ocorre a movimentação de hidrogênio para o cátodo e de oxigênio para o ânodo. No caso de atingirem os eletrodos sem terem reagido com as substâncias existentes no meio, esses íons são neutralizados formando moléculas gasosas que sobem para a superfície sob forma de microbolhas. Quando sobem, arrastam consigo partículas presentes no líquido que formam uma camada de espuma sobrenadante no reator. Estes gases, auxiliam no processo de flotação, que pode ocorrer em conjunto com outras reações, bem como a coagulação e a floculação (WIENDL, 1998).

Outro parâmetro a ser analisado, é o desgaste dos eletrodos. Segundo estudos, o desgaste dos eletrodos de sacrifício provocado pelo tratamento, não reduz a eficiência do mesmo. A troca dos eletrodos deve ser efetivada quando estes apresentarem danos em sua estrutura física de tal modo a não possibilitar mais o tratamento (WIENDL, 1998; FLECK, 2011).

A eletrofloculação, método eletrolítico para tratamento de efluentes, vem sendo estudada e aprimorada ao longo dos anos. Ela consiste basicamente em um sistema composto por um ânodo e um cátodo em meio aquoso, onde ocorre a aplicação de uma diferença de potencial que causará a redução ou deposição redutiva do elemento metálico (MOLLAH et al., 2004; TONES, 2015).

Ainda nos instantes iniciais do tratamento, as partículas terão adquirido cargas de superfície ao passarem pelo campo elétrico gerado. Com isso, após a desestabilização dos colóides, essas partículas agrupam-se na forma de flocos. O material floculado irá flotar devido à existência de gases gerados pela eletrólise. Se tratando de sistemas que utilizam fluxo contínuo, alguns flocos podem ser arrastados em função da vazão de escoamento hidráulico, o que não é interessante do ponto de vista da eficiência do tratamento. Indica-se, portanto, o uso de defletores laterais, que podem auxiliar na retenção do lodo gerado no tratamento, bem como uma distância adequada entre os eletrodos e a saída do reator (WIENDL, 1998).

Tanto para Chen (2004) como para Wiend (1998), alguns parâmetros são essenciais para a avaliação da eficiência dos tratamentos eletroquímicos, tais como: tempo de detenção, taxa de escoamento superficial, velocidade de fluxo horizontal, relação largura/comprimento, profundidade útil, profundidade total.

3.5.1.1 Eletrodos

Mollah et al (2004), indica que para o tratamento de efluentes com alta carga orgânica, se fazem necessárias áreas de superfície grandes, sendo que apenas um par de eletrodos não é suficiente. Além disso, quanto maior a área superficial, maior será o tempo de substituição dos eletrodos, diminuindo os custos com o sistema.

Para Mollah et al (2004), os eletrodos devem ser alocados de modo a garantir a eficiência máxima possível. Dois arranjos são os mais utilizados, os verticais e os horizontais, conforme Figura 2.

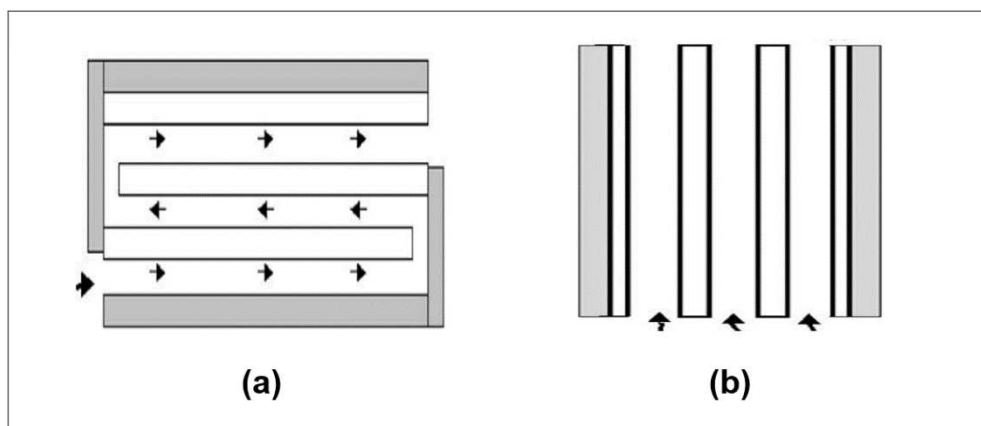


Figura 2 - Vista superior de arranjos de eletrodos (a) horizontal e (b) vertical

Para Santos (2015), a utilização de eletrodos no arranjo horizontal simula a utilização de chicanas o que direciona o fluxo do líquido e auxilia no tratamento. Outro arranjo adotado é o conhecido como colmeia, ou bateria. A colmeia consiste no conjunto de eletrodos metálicos, com formato de chapas planas e dispostos paralelamente entre si. Testes realizados em planta apontam dificuldades na operação com este tipo de configuração, devido ao peso elevado, o que dificulta o transporte (WIENDL, 1998).

3.6 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O cenário atual de mercado, requer a redução de custos e tempo, aumento dos rendimentos e da produtividade, isso sem interferir na qualidade dos produtos gerados. Tal desafio pode ser superado através da utilização de otimização de processos, fazendo com que sejam necessárias técnicas de planejamento de experimentos (RODRIGUES; IEMMA, 2014).

Segundo Rodrigues; Iemma (2014), o planejamento experimental possibilita a avaliação da influência das variáveis independentes sobre a resposta, de maneira confiável. Possibilita a geração de modelos matemáticos preditivos, que quando cabível, poderá otimizar determinado processo e calcular o erro a este associado.

Segundo Fleck (2014), a modelagem matemática possibilita retratar perturbações, naturais e antrópicas, bem como suas consequências em

determinado meio, simulando um cenário futuro. Os resultados concisos que vem sendo obtidos com esses modelos, fazem com que estes sejam cada vez mais utilizados, auxiliando nas mais diversas atividades humanas.

Para alguns fenômenos se faz necessária a utilização de modelos de segunda ordem, onde emprega-se o delineamento composto central rotacional (DCCR). O número de ensaios necessários pode ser obtido por meio da Equação 1 (RODRIGUES; IEMMA, 2014; Yi et al, 2010).

$$\text{Número de ensaios} = 2^k + 2k + n \quad (1)$$

Na Equação 1, k representa o número de fatores (variáveis independentes), 2^k equivale aos ensaios fatoriais, $2k$ aos axiais e n corresponde a quantidade de repetições no ponto central. A realização de repetições no ponto central possibilita avaliar a repetibilidade do processo (FLECK, 2014; SHEN; ZHANG; BJERG, 2012).

A equação que determina os níveis dos pontos axiais está representada na Equação 2.

$$\pm \alpha = (2^k)^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

O DCCR pode ser considerado mais abrangente, quando comparado a outros métodos pois explora a interação entre as variáveis, isto sem resultar numa quantidade de ensaios que torne os mesmos inviáveis.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 REATOR ELETROQUÍMICO

Para aplicação da técnica de eletrofloculação, utilizou-se um reator eletroquímico, em escala laboratorial, operado em fluxo contínuo, conforme Figura 3.

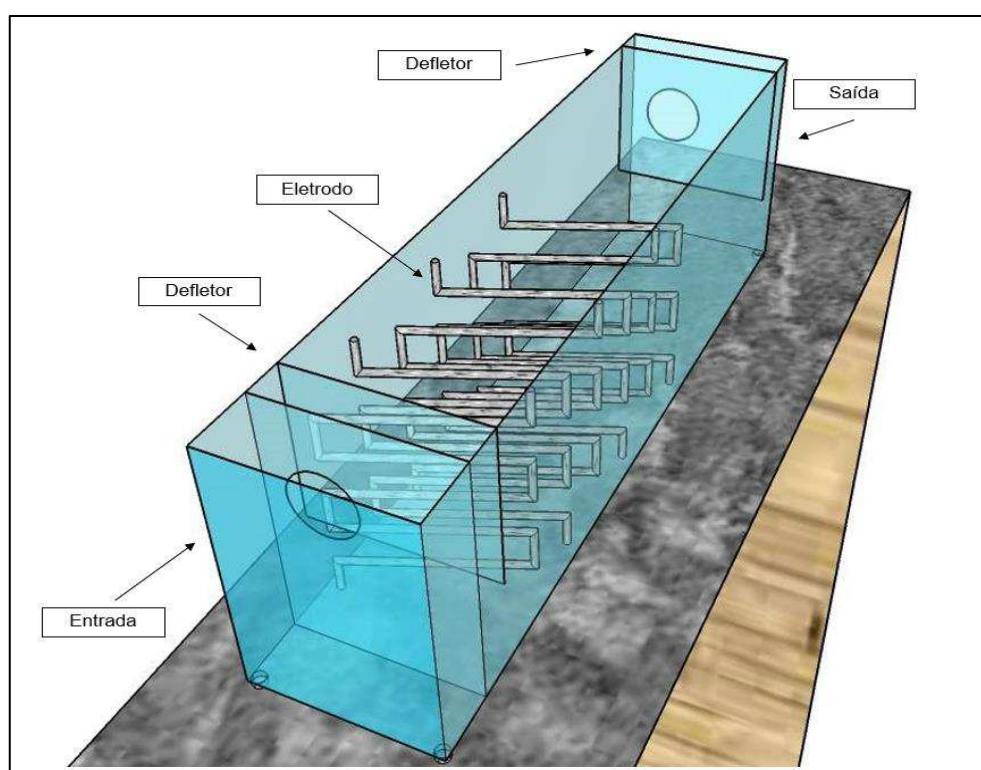


Figura 3 - Ilustração do reator eletroquímico

Acoplou-se ao reator, um reservatório de entrada e um outro reservatório para o armazenamento da solução tratada. Além disso, fez-se uso de uma bomba submersa que auxiliou na alimentação do sistema.

A obtenção da corrente elétrica ocorreu por meio do uso de fontes de alimentação de corrente contínua, sendo necessárias três delas para que a demanda de eletrodos fosse atendida. Utilizou-se fontes da marca *Instrutherm*, modelos “FA – 3050” e “FA – 3005”.

A cuba eletrolítica utilizada, foi confeccionada em vidro temperado e possui as seguintes dimensões: 62 cm de comprimento, 14 cm de largura e 19 cm de altura. As soluções de corante entraram na cuba em queda livre e escoaram ao longo do reator.

Outro dispositivo que integrou o sistema foi o defletor. Sua função foi reter o lodo gerado durante o tratamento, nesse reator foram utilizados dois dispositivos, um na entrada e outro na saída.

4.1.1 Eletrodos

Neste estudo, foram utilizados eletrodos no formato cilíndrico, conforme Figura 4.

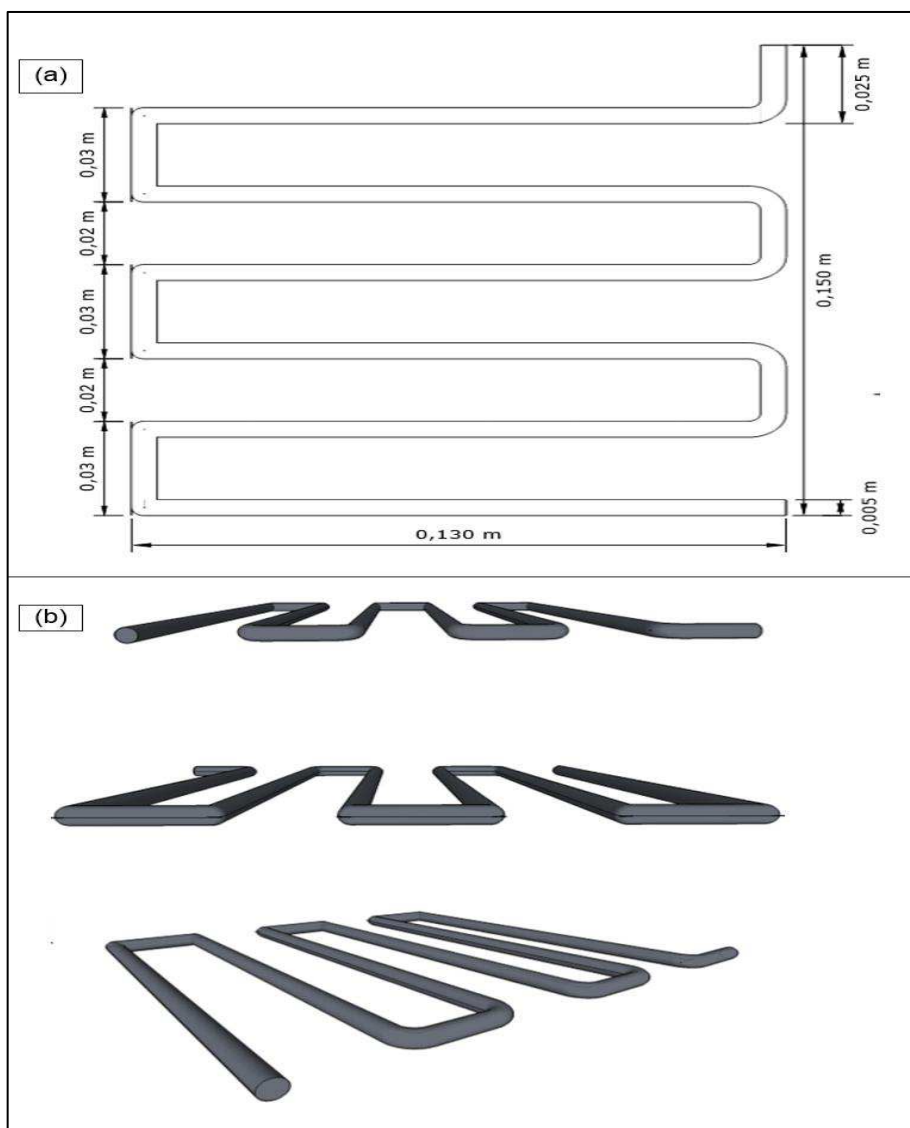


Figura 4 – Dimensões dos eletrodos (a) e visão 3D (b)

Para confecção dos eletrodos, foram utilizados vergalhões de ferro da categoria CA-50, com superfície nervurada e com diâmetro de 6,3 mm. A moldagem ocorreu com o auxílio de uma morsa de bancada e um martelo.

Foram utilizados três pares de eletrodos, que corresponderam a uma área superficial total de 184 cm². A área útil utilizada no tratamento eletroquímico correspondeu a 92 cm², sendo este o somatório de todos os eletrodos.

Depois de prontos, os eletrodos foram alocados na cuba eletrolítica, no sentido transversal ao fluxo do líquido, conforme Figura 5.

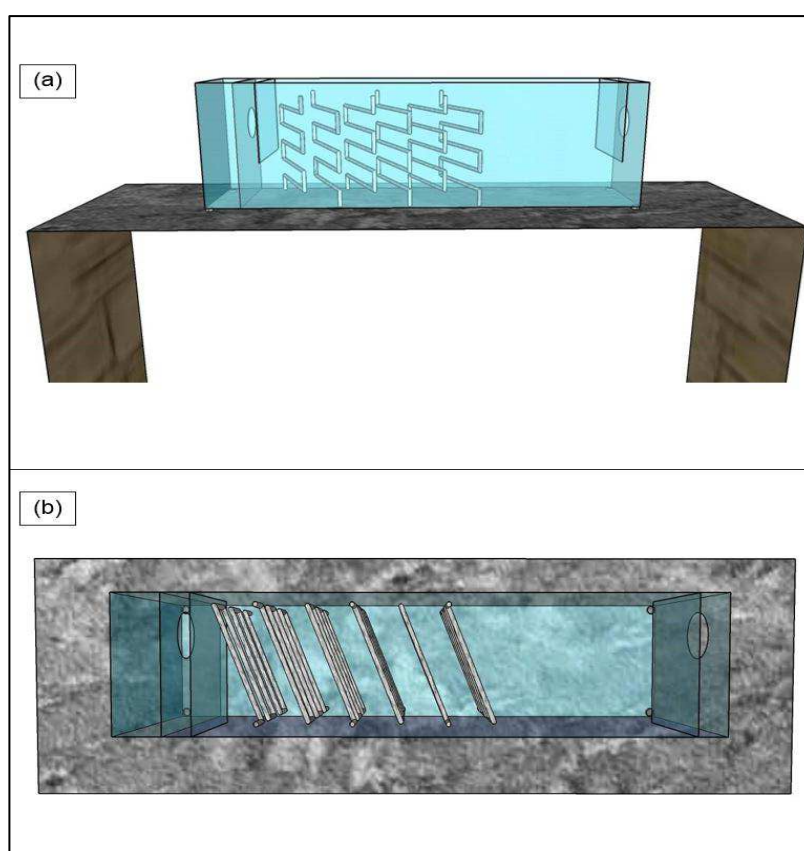


Figura 5 – Visão lateral (a) e superior (b) do reator eletroquímico

Os eletrodos permaneceram a uma distância entre si de 5 cm. A distância entre o defletor inicial e o primeiro eletrodo foi de 10 cm. Depois do último eletrodo, disponibilizou-se um espaço livre até o defletor de 19 cm.

4.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Utilizou-se como ferramenta para realização dos experimentos o delineamento composto central rotacional, DCCR. Avaliou-se a influência dos fatores intensidade de corrente (I) e tempo de detenção hidráulica (TDH) na variável resposta, remoção de cor (RC). A faixa de estudo para os fatores foi definida com base na literatura. No estudo realizado por Pinto et al (2015), a faixa de estudo foi de 1,6 a 5,0 A para a corrente e de 12,9 a 20,0 min para o tempo de detenção hidráulica.

O experimento contou com o total de doze ensaios, sendo 2^2 ensaios fatoriais, quatro repetições no ponto central e quatro ensaios axiais. Tal experimento possibilitou a geração de um modelo de segundo grau, conforme Equação 3. Os parâmetros utilizados foram ajustados de acordo com os dados obtidos no experimento.

$$y = \bar{y} + a_1x_1 + a_2(x_1)^2 + a_3x_2 + a_4(x_2)^2 + a_5x_2x_1 \quad (3)$$

Onde y representa a variável resposta; \bar{y} corresponde à média; a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 são os coeficientes de regressão; x_1 , x_2 são os fatores.

A Tabela 3 representa o delineamento de tratamentos, contendo os valores codificados.

Tabela 3 – Delineamento de tratamentos

	Ensaio	Condições	
		I	TDH
Ensaio Fatoriais	1	-1	-1
	2	-1	1
	3	1	-1
	4	1	1
Ponto Central	5	0	0
	6	0	0
	7	0	0
	8	0	0
Ensaio Axiais	9	0	-1,41
	10	0	1,41
	11	-1,41	0
	12	1,41	0

A Tabela 4 contém os valores reais para os fatores codificados. As correntes especificadas correspondem ao valor utilizado por par de eletrodo.

Tabela 4 – Valores reais dos fatores

	-1,41	-1	0	1	1,41
TDH (min)	5	7,91	15	22,09	25
I (A)	1	1,36	2,25	3,14	3,5

As análises estatísticas foram realizadas no software Action 2.9, integrado ao Office Excel. Com relação ao nível de confiança, adotou-se 95%.

4.3 PREPARO DAS SOLUÇÕES

Para realização dos ensaios de eletrofloculação, foram preparadas soluções sintéticas utilizando o corante reativo azul 5G com concentração de 40

mg.L⁻¹. Além do corante, utilizou-se cloreto de sódio (NaCl) à uma concentração de 2,5 g.L⁻¹. A utilização deste aumenta a condutividade elétrica do meio, auxiliando no tratamento.

4.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Ajustou-se a vazão conforme o TDH necessário para cada ensaio e assim que o reator estivesse com sua capacidade máxima, retirou-se alíquotas, em duplicata, da solução sem tratamento (bruto) para posterior análise. As amostras foram armazenadas em tubos de ensaios. A partir de então, teve início o tratamento sendo que após o ajuste da intensidade de corrente, o tempo começou a ser cronometrado de acordo com o ensaio. Após o término do tempo estipulado, foram retiradas alíquotas, novamente em duplicata, para posterior análise de remoção de cor. As amostras, tanto as sem tratamento, quanto as tratadas, permaneceram decantando por aproximadamente 24 horas.

Após o período de decantação, realizou-se a leitura de absorvância das amostras, sem homogeneização das mesmas, utilizando o espectrofotômetro da marca *Hach* modelo “DR 2800”, no comprimento de onda de 618 nm. Determinou-se o uso de tal comprimento de onda a partir de trabalhos anteriores que utilizaram o mesmo corante (SANTOS, 2015).

Após as leituras de absorvância das amostras, calculou-se a média entre as duplicatas e aplicou-se a Equação 4 para determinação da remoção da cor, em percentual.

$$RC = \frac{(\text{Absorvância inicial} - \text{Absorvância final})}{\text{Absorvância inicial}} \times 100 \quad (4)$$

Os dados obtidos foram analisados pelo software Action e a partir dos resultados, tornou-se possível verificar a validade do modelo gerado bem como a otimização do mesmo e posteriormente a realização de ensaios de validação.

4.5 OTIMIZAÇÃO

A partir do modelo quadrático ajustado foi possível encontrar os pontos críticos (por meio do teste da primeira derivada), e na sequência, avaliar se o(s) ponto(s) crítico(s) encontrado(s) corresponde(m) a ponto(s) de máximo, indicando uma máxima remoção do corante.

A avaliação da validade estatística do modelo, foi realizada a partir da análise de variância (ANOVA), com o intervalo de confiança de 95%.

4.6 VALIDAÇÃO

Após a verificação da validade do modelo preditivo e posterior otimização, tornou-se possível realizar ensaios de validação. Nestes ensaios verificou-se a proximidade dos valores fornecidos pelo modelo preditivo e os obtidos experimentalmente. Com tais resultados, torna-se possível o cálculo do erro vinculado ao modelo.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No decorrer dos ensaios, preferencialmente naqueles que produziram resultados mais eficientes, a diferença de coloração da solução acabou sendo perceptível no próprio reator, conforme Figura 6. Neste ensaio, as condições operacionais foram 1,36 A e 22,09 min.



Figura 6 - Remoção da cor da solução aparente no reator

Os resultados expostos na Tabela 5, referem-se à remoção da cor de acordo com a intensidade da corrente e do tempo de retenção hidráulica. É possível observar a presença dos valores codificados e reais para cada fator.

Tabela 5 - Resultados obtidos para remoção da cor

I (A)	Tempo de detenção hidráulica (min)	Remoção da cor (%)
-1 (1,36)	-1 (7,91)	2,11
-1 (1,36)	1 (22,09)	92,46
1 (3,14)	-1 (7,91)	88,16
1 (3,14)	1 (22,09)	97,84
0 (2,25)	0 (15,00)	89,80
0 (2,25)	0 (15,00)	90,82
0 (2,25)	0 (15,00)	91,15
0 (2,25)	0 (15,00)	94,66
0 (2,25)	-1,41 (5,00)	4,23
0 (2,25)	1,41 (25,00)	96,85
-1,41 (1,00)	0 (15,00)	34,27
1,41 (3,50)	0 (15,00)	97,30

A partir da análise da Tabela 5, observa-se que a maior eficiência alcançada com o estudo foi de 97,84% de remoção de cor, valor este obtido nas condições de 3,14 A e 22,09 min. A menor eficiência, por sua vez foi de 2,11%, com 1,36 A e 7,91 min.

Outra análise que pode ser feita, refere-se à repetibilidade do processo, uma vez que os ensaios realizados no ponto central tiveram respostas semelhantes, sendo a média 91,61% e o desvio padrão de $\pm 2,11\%$.

A Figura 7 refere-se às amostras coletadas em diferentes ensaios. A primeira amostra corresponde ao ensaio com 1,36 A e 7,91 min com uma eficiência de 2,11%. A segunda corresponde a 1,00 A e 15,00 min, com eficiência de 34,27%. A terceira amostra, por sua vez, 3,50 A e 15,00 min, resultando em 97,30% de remoção de cor. A última amostra, resultou em 97,80% de eficiência, sendo utilizado 3,14 A e 22,09 min.

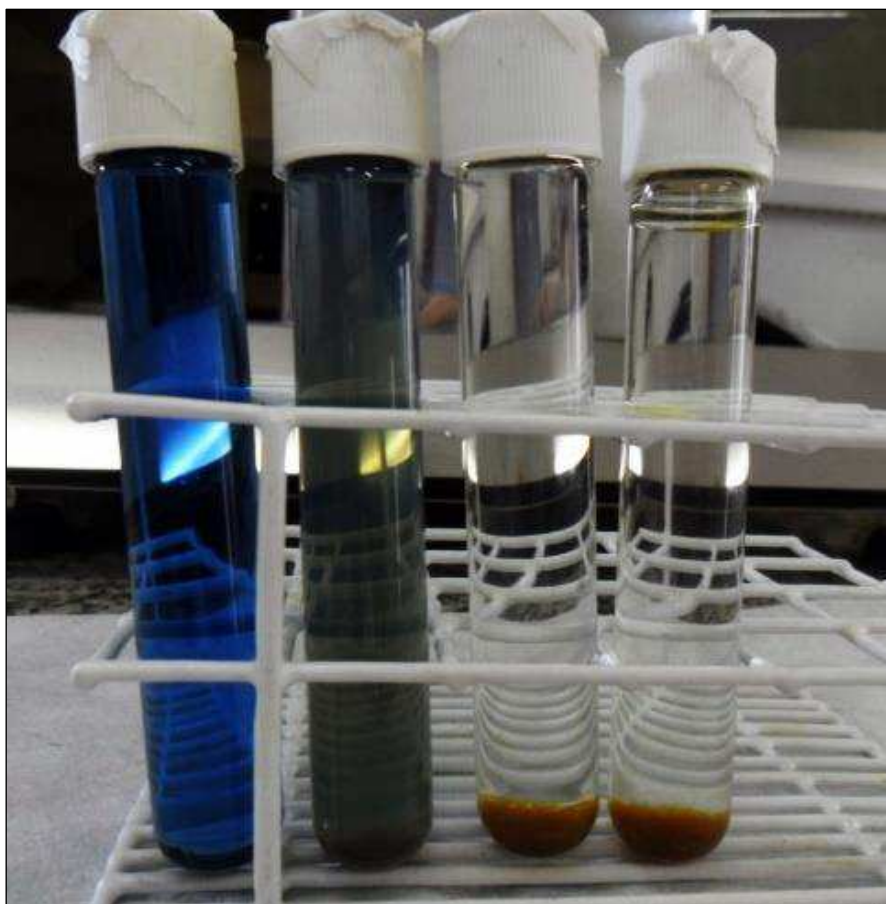


Figura 7 - Amostras de diferentes ensaios

Quando é possível observar que a variação dos fatores e a combinação entre eles provocam mudanças nos resultados, pode-se identificar a influência destes fatores na variável resposta, sendo este um indício de que se trata de um modelo matemático estatisticamente significativo.

A Tabela 6 corresponde aos resultados obtidos com a análise realizada com o software Action 2.9.

Tabela 6 - Coeficiente de regressão

	Efeitos	Coeficientes	Desvio Padrão	p - valor
Média		91,57	4,24	$6,42 \times 10^{-7}$
I	45,21	22,60	3,00	$2,84 \times 10^{-4}$
I ²	-19,81	-9,91	3,36	$2,58 \times 10^{-2}$
TDH	57,83	28,91	3,00	$7,17 \times 10^{-5}$
TDH ²	-35,15	-17,58	3,36	$1,97 \times 10^{-3}$
I x TDH	-40,43	-20,17	4,24	$3,13 \times 10^{-3}$

No que se refere aos efeitos, os termos quadráticos para intensidade de corrente (I^2), tempo de retenção hidráulico (TDH^2) e a interação entre eles ($I \times TDH$), apresentaram influência negativa para o fenômeno estudado. Por outro lado, os termos lineares da intensidade de corrente (I) e tempo de detenção hidráulica (TDH) apresentaram influência positiva.

A Tabela 6 contém também valores de p-valor, que indicam a significância de cada um dos termos. Observa-se que todos os valores foram inferiores a 0,05, o que indica que todos os termos são significantes para o modelo.

Outra maneira de avaliar a significância dos efeitos, é por meio do diagrama de Pareto (Figura 8).

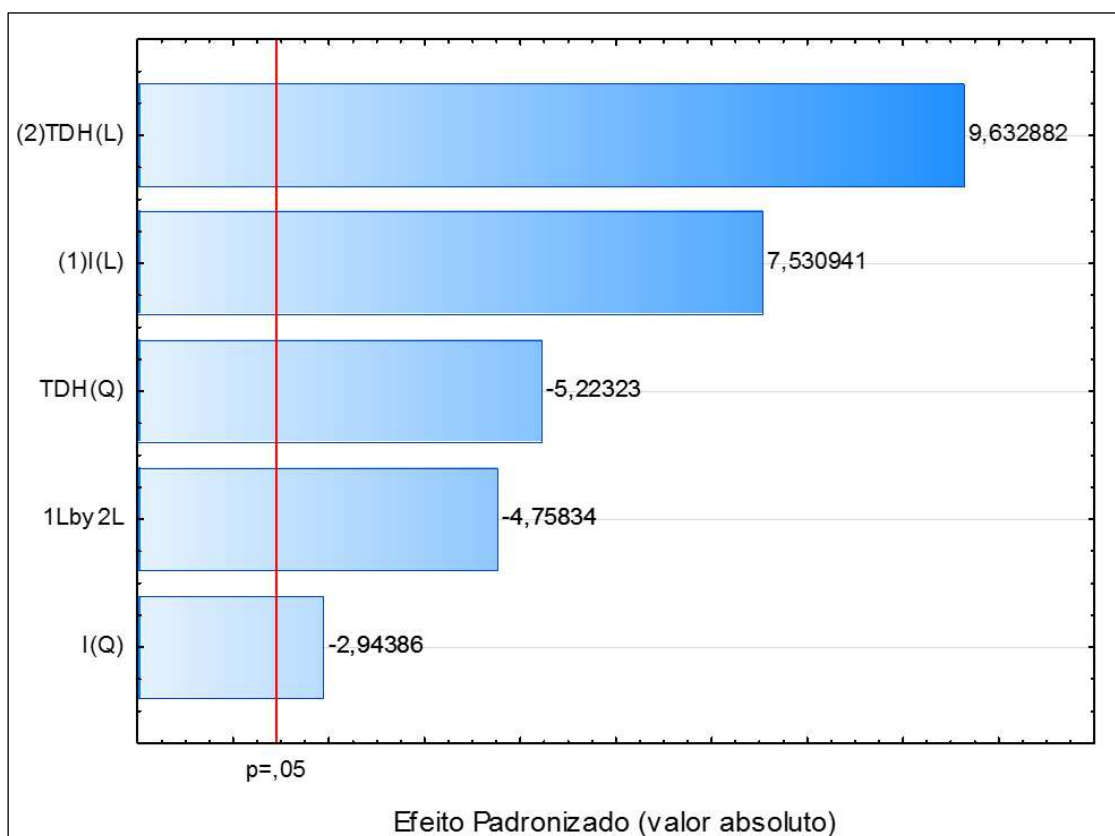


Figura 8 - Diagrama de Pareto

No diagrama de Pareto, as barras que se encontram crescentes a partir de “p”, possuem efeito significativo sobre o processo. Ao observar a Figura 8, fica evidente que todos os efeitos foram significativos pois todas as barras apresentam comprimento superior ao p-valor.

Os coeficientes encontrados (Tabela 6) podem ser substituídos na Equação 1, conforme Equação 5 que corresponde ao modelo matemático de segundo grau referente ao fenômeno estudado, sendo utilizados valores codificados.

$$y = 91,57 + 22,60I - 9,91I^2 + 28,91TDH - 17,58TDH^2 - 20,17I \times TDH \quad (5)$$

Objetivando verificar a significância estatística do modelo, realizou-se o Teste F, conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Análise de variância

Fonte de variação	SQ ¹	GL ²	MQ ³	F _{Calculado}	F _{Tabelado}	p-valor
Regressão	15.036,78	5	3.007,36	41,85	4,38	1,38 × 10 ^{-4*}
Resíduos	431,17	6	71,86			
Total	15.467,95	11				

¹Soma dos Quadrados dos erros; ²Graus de liberdade; ³Média das somas dos quadrados dos erros; * estatisticamente significativo a 5%.

O fato do p-valor apresentar-se menor que 0,05, indica a validade estatística do modelo, além disso, $F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$, o que também indica sua validade. Segundo Rodrigues; lemma (2014), um modelo de qualidade deve apresentar $F_{\text{calculado}}$ quatro vezes maior que F_{tabelado} , nesse caso, o $F_{\text{calculado}}$ é aproximadamente nove vezes maior que o F_{tabelado} . O coeficiente de determinação (R^2) para este estudo foi de 0,97.

Depois de detectada a validade do modelo, tornou-se pertinente a análise da superfície de resposta gerada pelo modelo, conforme Figura 9. A superfície de resposta representa o modelo de maneira gráfica.

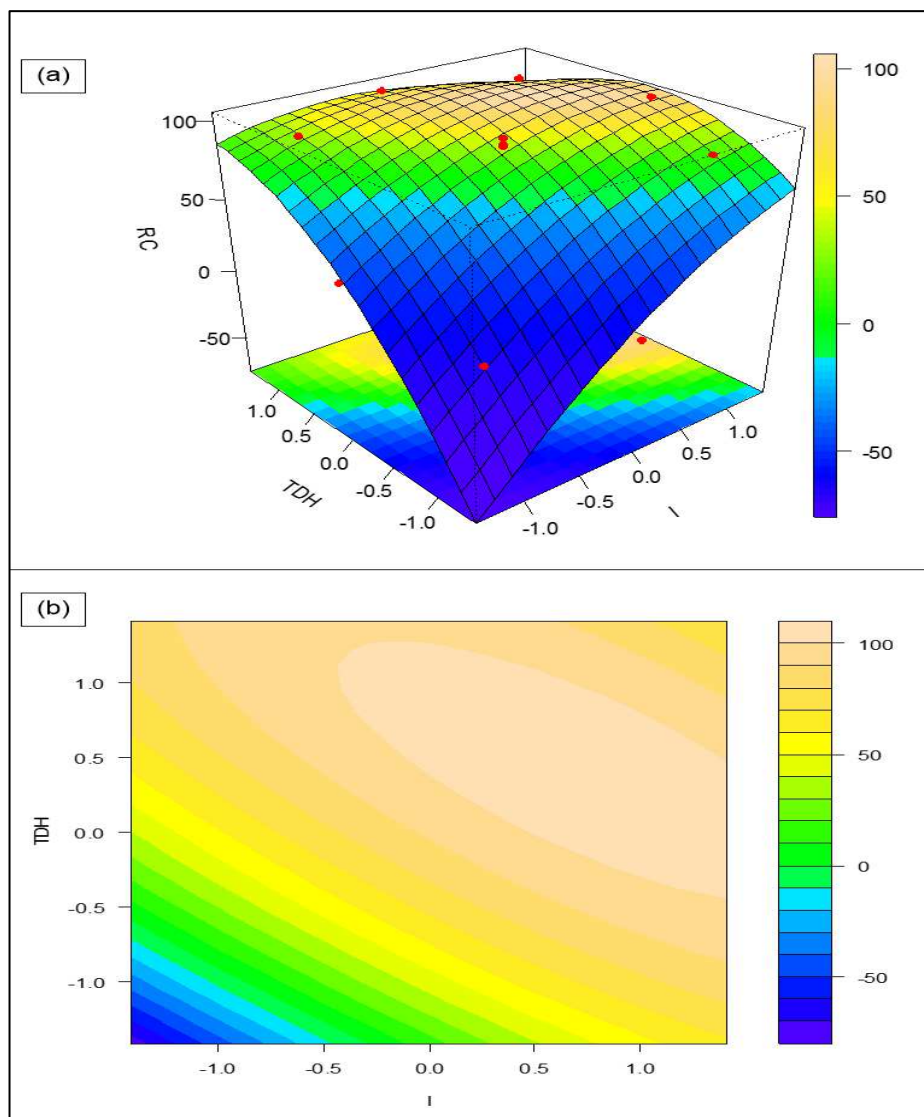


Figura 9 - Superfície de resposta 3D (a) e 2D (b)

A análise da superfície de resposta indica que tanto para a intensidade de corrente, quanto para o tempo de detenção hidráulica, os melhores resultados para remoção da cor encontram-se a partir do valor codificado zero.

A obtenção de um modelo matemático de segunda ordem, possibilitou a otimização do processo. Porém, o valor obtido nas condições de 0,73 (I) e 0,40 (TDH), sendo estes valores codificados, foi superior a 100% (remoção total), isso devido ao erro associado ao modelo.

A validação do modelo pode acontecer realizando ensaios em qualquer condição dentro da faixa de estudo para os fatores. Sendo assim, como a otimização do processo previu uma remoção superior a 100%, optou-se por manter a variável tempo de detenção hidráulico com valor referente ao ponto central e então calcular qual a intensidade de corrente necessária para uma

suposta remoção total. O valor calculado foi de 0,42, sendo este valor codificado que corresponde à 2,67 A. Possibilitando dessa maneira, os ensaios de validação.

Para a validação realizou-se o ensaio em triplicata, conforme Tabela 8.

Tabela 8 - Resultados dos ensaios de validação do modelo

Ensaio	I	TDH	Remoção da Cor (%) (Experimental)	Remoção da Cor (%) (Previsto)	Erro (%)
1	0,6	0	97,27		2,73
2	(2,67 A)	(15 min)	97,96	100	2,04
3			97,76		2,24
Média			97,66		2,34

Os resultados dos ensaios de validação foram próximos, tendo como valor médio, 97,66% de remoção de cor, com desvio padrão de $\pm 0,26$. Com a obtenção destes resultados, tornou-se possível o cálculo do erro implícito no modelo, que foi de 2,34%, valor este considerado aceitável.

A Tabela 9 contém informações sobre resultados e condições operacionais de outros trabalhos. O objetivo é comparar tais estudos com o atual e identificar vantagens e desvantagens.

Tabela 9 - Melhores resultados e condições operacionais de estudos de eletrofloculação

Referência	Melhor resultado	Condições operacionais
BETTAZZOLI; PELEGRINI (2002)	Remoção de 90% de cor de efluente sintético Azul QR (15 mg L ⁻¹)	Eletrodo de titânio com formato cilíndrico; 26,50 mA cm ⁻² ; Regime batelada com recirculação; 60 min de fotoeletrólise.
CERQUEIRA (2006)	Remoção de 95% de cor de efluente têxtil	Eletrodo de ferro com formato de placa plana (colmeia); 25 mA cm ⁻² ; Regime batelada; 10 min de eletrólise.
SANTOS (2015)	Remoção de 90,25% de cor de efluente sintético Azul 5G (50 mg L ⁻¹) e 550 mg L ⁻¹ de coagulante orgânico a base de Moringa oleífera lam	Eletrodo de ferro com formato de placa plana; 3,31 mA cm ⁻² ; Fluxo contínuo; 5 min de eletrólise.
GILI (2016)	Remoção de 55,87% de cor de efluente têxtil	Eletrodo de ferro com formato de placa plana; 46,88 mA cm ⁻² ; Fluxo contínuo; 4,25 min de eletrólise.
Presente estudo	Remoção de 97,84% de cor de efluente sintético Azul 5G (40 mg L ⁻¹)	Eletrodo de ferro com formato cilíndrico; 34,13 mA cm ⁻² ; Fluxo contínuo; 22,09 min de eletrólise.

Fica evidente nas informações da Tabela 9 que cada um dos estudos teve suas contribuições positivas, uma vez que todos possuem características operacionais que os diferem.

Primeiramente, o estudo realizado por Bertazzone; Pelegrini (2002) apresentou uma eficiência bastante elevada, entretanto a concentração do corante pode ser considerada baixa quando comparada aos demais trabalhos, bem como o tempo de tratamento que foi alto. Outro fator que deve ser observado é o uso de eletrodo de titânio, o que encarece significativamente o tratamento.

O estudo realizado por Cerqueira (2006) obteve uma eficiência na remoção de cor bastante elevada. Por se tratar de um ensaio em batelada, o

volume tratado é baixo e seriam necessários ensaios em fluxo contínuo para analisar o comportamento do mesmo, uma vez que o regime poderá influenciar na eficiência do resultado. O uso de efluente oriundo de indústria têxtil pode ter influenciado na concentração do corante que pode ter sido menor, entretanto pode haver a presença de outros poluentes que podem dificultar o tratamento.

Santos (2015) obteve excelentes resultados para remoção de cor, isso com uma densidade de corrente baixa, grande volume tratado e tempo de reação baixo, quando comparado aos demais trabalhos. Entretanto, contou com a utilização do coagulante natural a base de *Moringa oleífera* lam.

Gili (2016) assim como Cerqueira (2006), optou por utilizar efluente têxtil, entretanto os testes foram realizados em escala real, sendo que o sistema de tratamento proposto se encontra instalado na indústria. O melhor resultado obtido com relação a remoção de cor pode ser considerado baixo quando comparado aos demais estudos, entretanto, por se tratar de um ensaio a nível industrial, o atendimento dos padrões exigidos pela legislação constitui um resultado positivo.

Outro ponto a ser destacado é que a grandeza analisada, eficiência em percentual, muitas vezes causa uma falsa impressão. Um efluente com uma concentração elevada de corantes pode apresentar uma eficiência elevada e, entretanto, não atingir os padrões mínimos de lançamento exigidos. Um efluente real por sua vez, pode apresentar baixas concentrações e baixa eficiência de tratamento e atender aos padrões. Outro diferencial nessa escala é a eficiência no tratamento dos demais poluentes presentes no efluente.

No que se refere ao presente estudo, além da alta eficiência na remoção de cor, o arranjo de eletrodos utilizado contribuiu positivamente, facilitando a operação e a manutenção do sistema.

Ainda com relação ao presente estudo, um fator observado durante o decorrer dos ensaios, foi a influência do espaço livre entre o último eletrodo e o defletor. Nos ensaios realizados por Santos 2015, este espaço correspondia a menos de 5 cm, diferentemente do presente estudo onde correspondeu à 19 cm.

Na Figura 10, é possível identificar a formação de microbolhas durante o processo de tratamento, este fenômeno pode fazer com que parte do material que iria flotar, acabe sendo carregado para a saída do reator, no caso do eletrodo se encontrar próximo à saída. O espaço entre o último eletrodo e a saída, no

presente estudo, possibilitou o processo de retenção do lodo aparentemente mais eficiente.



Figura 10 - Formação de microbolhas durante o tratamento

A Figura 11 refere-se à retenção de lodo nos diferentes ensaios.

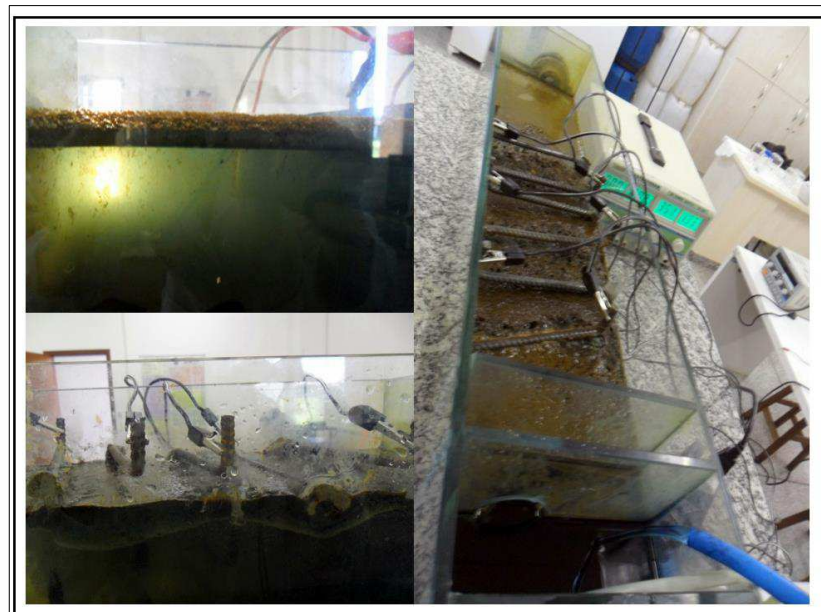


Figura 11 - Retenção de lodo durante o tratamento

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação do tratamento eletroquímico, eletrofloculação, para remoção de cor de soluções contendo o corante azul reativo 5G, mostrou-se bastante eficiente, sendo alcançado a eficiência máxima de 97,84%.

Verificou-se que os efeitos das variáveis estudadas, sobre a remoção da cor foram significativos, o que possibilitou a geração de um modelo matemático de segunda ordem representativo do processo. De acordo com a análise estatística (teste F), tal modelo pôde ser considerado válido com um coeficiente de determinação de 0,97.

A obtenção de um resultado positivo referente a validade do modelo, implicou na otimização do processo e posterior validação. O resultado alcançado, para uma remoção teórica de 100% da cor, operando com TDH e I de 15 min e 2,77 A respectivamente, foi uma eficiência média de 97,66%, que corresponde à um erro de 2,34%.

A eficiência elevada juntamente com as facilidades operacionais dos eletrodos cilíndricos, torna a utilização dos mesmos bastante vantajosa.

Indica-se que para trabalhos futuros sejam testadas novas configurações utilizando as barras cilíndricas, de modo a diminuir a densidade de corrente e conseqüentemente o consumo de energia.

Outra sugestão seria a determinação do tempo de repouso necessário para as amostras, com relação a precipitação do hidróxido ferroso. Além da determinação da real influência do espaçamento entre o último eletrodo e a saída do reator.

Trabalhos futuros poderão realizar testes com efluentes têxteis reais para avaliar a eficiência do tratamento em outros parâmetros além de cor.

REFERÊNCIAS

ALVARENGA, Rodrigo Neder. **Tratamento de efluente têxtil através de processo redox e separação com membranas combinados**. Dissertação (Mestrado Engenharia Química). Universidade de São Paulo - USP. Lorena: 2009.

ALVIM, Luige Biciati; KUMMROW, Fábio; BEIJO, Luiz Alberto; BARBOZA, Sandro. **Citogenotoxicidade de efluentes de indústrias têxteis**. 55º Congresso Brasileiro de Genética. Águas de Lindóia: 2009.

BELTRAME, Leocádia Terezinha Cordeiro. **Caracterização de efluente têxtil proposta de tratamento**. Dissertação (Mestrado Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN. Natal: 2000.

BERTAZZOLI, Rodnei; PELEGRINI, Ronaldo. Descoloração e degradação de poluentes orgânicos em soluções aquosas através do processo fotoeletroquímico. **Química Nova**. v. 25, n.3, p. 470-476, 2002.

BEZERRA, Francisco Diniz. Análise Retrospectiva e Prospectiva do Setor Têxtil no Brasil e no Nordeste. **Informe Macroeconomia, Indústria e Serviços**. Fortaleza, Ano VIII, n.2, 2014.

BRASIL. **Lei nº 9.433/97**. Constituição Federal. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L9433.htm> Acesso em: 22 de outubro de 2015.

BRASIL. **Portaria 2914/2011**. Ministério da Saúde. Disponível em: <<http://portalsaude.saude.gov.br/images/pdf/2015/maio/25/Portaria-MS-no-2.914-12-12-2011.pdf>> Acesso em: 09 de fevereiro de 2016.

BRASIL. **Resolução CONAMA 357/2005**. Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=459>> Acesso em: 07 de outubro de 2015.

BRASIL. **Resolução CONAMA 430/2011**. Ministério do Meio Ambiente. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>> Acesso em: 07 de outubro de 2015.

CERQUEIRA, Alexandre Andrade. **Aplicação da técnica de eletrofloculação no tratamento de efluentes têxteis**. Dissertação (Mestrado em Ciências). Universidade do Estado do Rio de Janeiro- UERJ. Rio de Janeiro: 2006.

CHAIM, Marcos Souza. **Guia Técnico Ambiental da Indústria Têxtil**. Federação das Indústrias do Estado de Minas Gerais (FIEMG), Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM). Minas Gerais, 2014.

CHEN, Guohua. Electrochemical Technologies in Wastewater Treatment. **Separation and purification Technology**, n. 38, p. 11-41, 2004.

CHERMICHAO, Carlos Augusto Lemos; RUTKOWSKI, Emília Wanda; VOLSCHAN, Issac Júnior; CASSINI, Sérgio Túlio Alves. **Qualidade da Água e Padrões de Potabilidade: Abastecimento de Água: guia do profissional em treinamento: nível 2**. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Belo Horizonte, 2007.

FLECK, Leandro. **Aplicação do controle estatístico de processos ao tratamento de um efluente têxtil por eletrofloculação**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso superior em Tecnologia em Gestão Ambiental. UTFPR, Medianeira: 2011.

FLECK, Leandro. **Modelagem matemática de cinética da decomposição aeróbia da matéria orgânica**. Dissertação (Mestrado Engenharia Agrícola). Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Unioeste. Cascavel: 2014.

FRANCO, Luciana Cristina Andrade Costa. **A gestão dos efluentes das indústrias têxteis e os princípios da responsabilidade social em Sergipe, 2008**. Dissertação (Mestrado em Saúde e Ambiente). Universidade Tiradentes. Aracajú: 2009.

FREITAS, Kátya Regina. **Caracterização e reuso de efluentes do processo de beneficiamento da indústria têxtil**. Dissertação (Mestrado Engenharia Química). Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC. Florianópolis: 2002.

GILL, Itamar. Eletrólise aplicada ao tratamento de efluentes têxteis. **Hydro**. Ano X, n. 115, p. 34-41, 2016.

IMHOFF, Karl. IMHOFF, Klaus R. **Manual de tratamento de águas residuárias**. São Paulo, SP: Editora Edgard Blücher Ltda, 2000.

KUNZ, Airton; PERALTA-ZAMORA, Patrício; MORAES, Sandra Gomes; DURÁN, Nelson. Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. **Química Nova**. v. 25, n.1, p. 78-82, 2002.

LORA, Electo Silva. **Prevenção e controle da poluição nos setores energéticos, industrial e de transporte**. Brasília, DF: ANEEL, 2000.

MOLLAH, Mohammad Y.A.; MORKOVSKY Paul; GOMES, Jewel A. G.; KESMEZ, Mehmet; PARGA, J.; COCKE, David L. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. **Journal of Hazardous Materials**. v. B114, p. 199-210, 2004.

METCALF & EDDY. Inc. **Wastewater engineering treatment disposal reuse**. 3 ed. Revised by TCHOBANOGLIOUS, George; BURTON, Frank. New York: McGraw-Hill, 1979.

PALÁCIO, Soraya Moreno. **Aplicação de processo de eletrocoagulação seguido por degradação fotocatalítica utilizando TiO₂ no tratamento de efluente têxtil**. Tese (Doutorado em Ciências). Universidade Estadual de Maringá- UEM. Maringá: 2009.

PEREIRA, Aline Ramalho Brandão; BUENO, Frank Lucarini; SANTOS, Samantha Cristine; LIMA, Cláudio Antônio Andrade; DIAS, Amanda Latércia. Biodegradação de corantes e efluentes têxteis por fungos. **Holos Environment**. v. 10, n.2, p. 165-179, 2010.

PINTO, André Hoffmann; HELMANN, Andrieli Cristina; EYNG, Eduardo; BARALDI, Ilton José; FRARE, Laercio M. **Otimização de reator eletroquímico aplicado ao tratamento de soluções de corante reativo azul 5G**. V Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção. Associação Paranaense de Engenharia de Produção. Ponta Grossa, 2015

QUADROS, Silvana Stefanel. **Tratamento e reutilização de efluentes têxteis gerados nos tingimentos de tecidos de algodão.** Dissertação (Mestrado Química). Universidade Regional de Blumenau. Blumenau: 2005.

RODRIGUES, Maria Isabel; IEMMA, Antonio Francisco. **Planejamento de experimentos e otimização de processo.** - 3 ed. – Campinas, SP: Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor, 2014.

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

SCHIMMEL, Daiana. **Adsorção dos corantes reativos azul 5G e azul turquesa QG em carvão ativado comercial.** Dissertação (Mestrado Engenharia Química). Universidade Estadual do Oeste do Paraná - Unioeste. Toledo: 2008.

SHEN, Xiong; ZHANG, Guoquiang; BJERG, Bjarne. Investigation of response surface methodology for modelling ventilation rate of a naturally ventilated building. **Building and Environment - Elsevier.** v. 54, p.174-185, 2012.

SHREVE, R. Norris; BRINK Jr., Joseph A. **Indústrias de processos químicos.** 4. ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 1997.

TANKSALI, A. S. Treatment of sugar industry wastewater by upflow anaerobic sludge blanket reactor. **International Journal of ChemTech Research.** v. 5, n. 3, p.1246-1253, 2013.

TONES, Aline Raquel Müller. **Estudo da aplicação da técnica de eletrofloculação na remoção da cor em misturas de corantes têxteis.** Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais). Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Medianeira: 2015.

UMBUZEIRO, Gisela de Aragão. **Guia de Potabilidade para Substâncias Químicas.** Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES). São Paulo: Limiar, 2012.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 2. ed. v.1. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais; 1996.

WIENDL, Wolfgang Guilherme. **Processos eletrolíticos no tratamento de esgotos sanitários**. Rio de Janeiro: ABES, 1998.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **World Health Statistics 2011**. Department of Health Statistics and Informatics of the Innovation, Information, Evidence and Research Cluster. France, 2011.

YI, Shouliang; SU, Yi; QI, Benkun; SU, Zhigou; WAN, Yinhua. Application of response surface methodology and central composite rotatable desing in optimizing the preparation conditions of vinyltriethoxysilane modified silicate/polydimethylsiloxane hybrid pervaporation membranes. **Separation and Purification Technology - Elsevier**. v. 71, p.252-262, 2010.