

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS AMBIENTAIS
PPGTAMB**

BRUNA SOUZA DOS SANTOS

**SISTEMA DE TRATAMENTO HÍBRIDO UTILIZADO NA REMOÇÃO
DO CORANTE REATIVO 5G DE UM EFLUENTE TÊXTIL SINTÉTICO**

DISSERTAÇÃO

MEDIANEIRA

2015

BRUNA SOUZA DOS SANTOS

**SISTEMA DE TRATAMENTO HÍBRIDO UTILIZADO NA REMOÇÃO
DO CORANTE REATIVO 5G DE UM EFLUENTE TÊXTIL SINTÉTICO**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Tecnologias Ambientais, do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Eyng

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Rodrigo Stival Bittencourt

MEDIANEIRA

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

S237s Santos, Bruna Souza dos.

Sistema de tratamento híbrido utilizado na remoção do corante reativo 5G de um efluente têxtil. / Bruna Souza dos Santos. – 2015.

97f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Eduardo Eyng.

Co-orientador: Paulo Rodrigo Stival Bittencourt.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais. Medianeira, 2015.

Inclui bibliografias.

1. Indústria têxtil. 2. Águas residuais – Aspectos ambientais. 3. Resíduos industriais. I. Pletsch, Adelmo Lowe, orient. II. Periotto, Fernando, co-orient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais. IV. Título.

CDD: 628.3 - Ed. 22

Biblioteca CâmpusUTFPR Medianeira
Marci Lucia NicodemFischborn 9/1219



TERMO DE APROVAÇÃO

SISTEMA DE TRATAMENTO HÍBRIDO UTILIZADO NA REMOÇÃO DO CORANTE REATIVO 5G DE UM EFLUENTE TÊXTIL SINTÉTICO

por

BRUNA SOUZA DOS SANTOS

Essa dissertação foi apresentada às catorze horas, do dia vinte e cinco de março de dois mil e quinze, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Tecnologias Ambientais, Linha de Pesquisa Tecnologias de Tratamento e Valorização de Resíduos, no Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. 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 – PPGTAMB)

Prof. Dr. Paulo Rodrigo Stival Bittencourt (Coorientador – PPGTAMB)

Prof. Dr. Carlos Eduardo Borba (Membro externo – UNIOESTE)

Prof. Dr. Ilton José Baraldi (Membro interno – UTFPR)

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Programa

Dedico este trabalho à minha família e meu namorado, pelos momentos de apoio e infinita compreensão em todos os momentos de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Certamente estes breves parágrafos não serão suficientes para agradecer todas as pessoas que estiveram presentes nessa etapa da minha vida. Portanto, peço desculpas por aqueles importantes nomes que não estão entre essas palavras, mas saibam que estão em meu coração.

O agradecimento primordial faço a Deus, que me concedeu dedicação, determinação e fortaleza para que pudesse realizar e concluir este trabalho, além de meus planos e desejos.

À minha família, pelo apoio e dedicação para que este sonho se tornasse realidade, amo todos vocês.

Aos professores Eduardo Eyng e Paulo Rodrigo Stival Bittencourt, pela orientação, dedicação, conhecimento, paciência, compreensão, amizade e por acreditarem em mim.

Aos colegas e amigos de jornada, meus agradecimentos pelo convívio e contribuições ao longo desse período.

Aos professores da banca examinadora pela atenção e contribuição ao aceitarem o convite para participarem do meu trabalho.

A Fundação Araucária e Fundação Parque Tecnológico Itaipu pelo suporte financeiro.

Enfim, a todos aqueles que, de alguma maneira, contribuíram para o sucesso deste trabalho, declaro o mais sincero **MUITO OBRIGADA!**

RESUMO

SANTOS, Bruna Souza. **Sistema de tratamento híbrido para a remoção do corante reativo 5G de um efluente têxtil sintético**. 2015. 97 folhas. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2015.

Nos últimos anos observou-se um crescimento das atividades industriais que provocou impactos significativos aos recursos naturais, e as preocupações com o ambiente em geral adquirem especial importância. Neste contexto, a indústria têxtil considerada uma importante atividade responsável por parte desse desenvolvimento, se caracteriza como geradora de efluente líquido amplamente poluidor devido ao grande volume de água necessária nesse processo produtivo. Levando em consideração os métodos convencionais e também as dificuldades no tratamento dos efluentes têxteis, o processo eletrolítico conhecido como eletrofloculação se constitui em uma possibilidade importante. Este processo envolve a desestabilização de poluentes emulsificados, ou em suspensão, em meio aquoso. Desta forma o objetivo deste trabalho foi implantar um sistema de tratamento híbrido utilizado na remoção do corante reativo azul 5G de um efluente têxtil sintético, através da eletrofloculação associada a adição de coagulante natural a base de Moringa oleífera Lam, a fim de potencializar o nível de tratamento que seria alcançado com as técnicas utilizadas isoladamente. Inicialmente trabalhou-se exclusivamente com a eletrofloculação para a remoção do corante. As variáveis analisadas foram: ddp (diferença de potencial aplicado), tempo e pH. Considerando o intervalo de confiança de 95% somente o termo quadrático da ddp e o termo linear do pH se mostraram significativos. Os valores de remoção da cor para os ensaios variaram de 64,38 a 90,87% e para a validação uma remoção média de 89,01%, valores muito próximos do predito pelo modelo. Na sequência foi realizada a otimização das condições para obtenção do extrato aquoso de Moringa oleífera. Avaliou-se as seguintes condições: salinidade e tempo de extração. A concentração do coagulante obtido, em água turva sintética também foi um dos fatores estudados. As melhores condições para o extrato aquoso de Moringa oleífera foram: 20 segundos de agitação em ultrassom, e solução de 20% em cloreto de sódio. Para potencializar o nível de tratamento as duas técnicas (eletrofloculação e coagulante natural a base de Moringa oleífera), foram testadas inicialmente em batelada e na sequência em fluxo contínuo. Os ensaios em batelada foram divididos em duas partes, o primeiro DCCR avaliou a intensidade de corrente elétrica (I), o tempo da eletrofloculação e a concentração do coagulante (MO), o qual obteve uma remoção de cor de 77,27% a 91,33%. Porém, nenhum termo foi significativo, mas o tempo apresentou menor efeito. Sendo assim, um novo planejamento foi realizado, o segundo DCCR, fixando o tempo na condição mínima, além das faixas de I e MO que também foram reduzidas. Obteve-se então uma remoção da cor para os ensaios de 13,45 a 80,8%, e para a validação uma remoção média de 86,56%. Para o módulo contínuo, as variáveis estudadas foram a intensidade de corrente elétrica (I), concentração do coagulante (MO) e tempo de retenção hidráulica (TRH). Dentre elas somente o TRH não se mostrou significativo. A remoção da cor variou de 8,46% a 90,25%. Nestes ensaios também foram realizados as análises das concentrações

de Ferro Residual, e os valores obtidos variaram de 3,70 mg.L⁻¹ a 9,03 mg.L⁻¹, ficaram abaixo do valor máximo permissível pela Legislação (15 mg.L⁻¹). Para maximizar a remoção da cor e minimizar a concentração de ferro residual, a função desejabilidade do software STATISTICA™ foi utilizada e nessas condições somente a I e a MO foram significativas. A partir da validação foi possível observar a tendência de remoção prevista pelo modelo. Obteve-se uma remoção da cor para a validação de 71,38% e uma concentração média de ferro residual de 5,2237 mg. L⁻¹, porém, com um erro distante do esperado (32,85%).

Palavras-chave: Efluente têxtil. Sistema de Tratamento Híbrido. Tratamento eletroquímico. Coagulante Natural.

ABSTRACT

SANTOS, Bruna Souza. **Hybrid treatment system for removing 5G reactive dye from synthetic textile effluent**. 2015. 97 folhas. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2015.

In recent years there has been a growth of industrial activities that caused significant impacts to natural resources, and concerns about the environment in general are of particular importance. In this context, the textile industry considered an important activity responsible for part of that development is characterized as liquid effluent generating widely polluter due to the large volume of water needed in this production process. Taking into account the conventional methods and also the difficulties in treating textile effluents, the electrolytic process known as eletrofloculation constitutes an important possibility. This process involves the destabilization of the emulsified pollutants, or suspension in aqueous medium. Thus the aim of this study was to implement a hybrid treatment system used in removing the blue reactive dye 5G of a synthetic textile effluent by eletrofloculation associated with adding natural coagulant the basis of Moringa Oleifera Lam, in order to enhance the level treatment would be achieved with the techniques used alone initially worked up exclusively with eletrofloculation to remove the dye. The variables analyzed were: ddp (potential difference applied), time and pH. Whereas the 95% confidence interval only the quadratic term of the linear term DDP and pH were significant. The removal of color values for the tests ranged from 64.38 to 90.87% and validating an average removal of 89.01%, very close values predicted by the model. Following was carried out to optimize the conditions for obtaining the aqueous extract of Moringa oleifera. Salinity and extraction time: The following conditions were evaluated. The concentration of the coagulant obtained in synthetic turbid water was also one of the factors studied. The best conditions for the aqueous extract of Moringa oleifera were 20 seconds of ultrasound in agitation, and solution of 20% sodium chloride. To enhance the level of treatment the two techniques (eletrofloculation and natural coagulant Moringa oleifera the base), were initially tested in batch and following streaming. The batch tests were divided into two parts, the first CCRD evaluated the intensity of electric current (I), the time eletrofloculation and concentration of the coagulant (MO), which obtained a color removal of 91 to 77.27% 33%. But no term was significant, but time showed less effect. Thus, a new planning was done, the second CCRD, setting the time at a minimum, in addition to the R and MO tracks that were also reduced. There was thus obtained a removal color for testing 13.45 to 80.8%, and validating an average removal of 86.56%. For the continuous form, the variables studied were the intensity of electric current (I), the coagulant concentration (MO) and hydraulic retention time (HRT). Among them only HRT was not significant. The color removal ranged from 8.46 % to 90.25%. In these assays were also performed the analysis of the residual iron concentrations, and the values obtained ranged from 3.70 mg L⁻¹ to 9.03 mg.L⁻¹, were below the maximum value allowable by law (15 mg.L⁻¹). To maximize the removal of color and minimize the residual concentration of iron, the desirability function STATISTICA™ software was used and under these conditions

only I and MO were significant. From the validation was observed removing trend predicted by the model. Obtained was a color removal for the validation of 71.38 % and an average concentration of 5.2237 mg.L⁻¹ of residual iron, but with a far from the expected error (32.85%).

Keywords: Textile effluent. Treatment Hybrid System. Electrochemical treatment. Natural coagulant.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Exemplo de uma estrutura química característica de um grupo cromóforo de um azocorante.....	23
Figura 2- Estrutura molecular do corante Reativo Azul 5G	26
Figura 3- Processos disponíveis para o tratamento de efluentes industriais.....	28
Figura 4- Mecanismo de adsorção e formação de pontes	32
Figura 5- Árvore e sementes de Moringa oleífera, respectivamente	34
Figura 6- Reator de eletro-coagulação em escala de bancada com eletrodos monopolares conectados em paralelo.....	37
Figura 7- Ilustração do processo de adsorção e formação das partículas coloidais que geram os flóculos com as moléculas de corantes. IS = íon de sacrifício: $Al(OH)_3$ ou $Fe(OH)_3$, conforme esquema empregado	38
Figura 8 - Módulo experimental para o tratamento do efluente têxtil por eletrofloculação (sistema em batelada).....	47
Figura 9 - Representação esquemática do módulo de eletrofloculação	54
Figura 10 - Barrilete para agitação do coagulante natural de Moringa oleífera	55
Figura 11 - Câmara eletrolítica para o tratamento do efluente têxtil sintético.....	55
Figura 12 - Gráfico do Espectro de Varredura do Corante Azul 5G	57
Figura 13 – Diagrama de Pareto para o processo de remoção da cor, com 95% de confiança.....	59
Figura 14 - Gráfico de superfície de resposta para o parâmetro remoção da cor (%), em função do pH e da ddp	60
Figura 15 - Gráfico de curvas de contorno para o parâmetro remoção da cor (%), em função do pH e da ddp	61
Figura 16 - Gráfico de superfície de resposta para o parâmetro remoção da cor (%), em função do tempo e da ddp para o pH 7	62
Figura 17 - Diagrama de Pareto para o processo de remoção da turbidez, com 95% de confiança.....	66
Figura 18 - Gráfico da superfície de resposta para o parâmetro remoção da turbidez (%)......	67
Figura 19 - Diagrama de Pareto para o processo de remoção da cor, com 95% de confiança.....	73
Figura 20 - Gráfico da superfície de resposta para o parâmetro remoção da cor (%)	74
Figura 21 - – Gráfico da curva de contorno para o parâmetro remoção da cor (%) ..	75
Figura 22 - Diagrama de Pareto para remoção da cor, com 95% de confiança	78
Figura 23 - Gráfico da superfície de resposta para o parâmetro remoção da cor (%)	79
Figura 24 - Gráfico da curva de contorno para o parâmetro remoção da cor (%)	79
Figura 25 - Amostra bruta e tratada, respectivamente - Ensaio 12	80
Figura 26 - Gráfico de varredura do efluente tratado – Ensaio 12.....	80

Figura 27 - Amostra bruta e tratada, respectivamente - Ensaio 13	81
Figura 28 - Gráfico de varredura do efluente tratado – Ensaio 13.....	81
Figura 29 - Diagrama de Pareto para o processo de ferro residual, com 95% de confiança.....	84
Figura 30 - – Gráfico de Superfície de resposta para o parâmetro concentração de ferro residual	85
Figura 31 – Gráfico de curva de contorno para o parâmetro concentração de ferro residual.....	85
Figura 32 – Gráficos estatísticos para a função desirability global.....	86
Figura 33 - Gráficos da função desejabilidade global, em função de I e MO	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores reais correspondentes aos codificado	48
Tabela 2 – Valores reais correspondentes aos codificados	50
Tabela 3 - Valores reais correspondentes aos codificados	51
Tabela 4 - Valores reais correspondentes aos codificados	52
Tabela 5 - Valores reais correspondentes aos codificados	53
Tabela 6 - Matriz do delineamento experimental e eficiência de remoção da cor (%)	58
Tabela 7 - Coeficientes de regressão.....	59
Tabela 8 - Análise de variância para a resposta remoção de cor (intervalo de confiança de 95%).....	60
Tabela 9 - Resultados validação das condições experimentais	63
Tabela 10 - Matriz do delineamento experimental e resultado de remoção da turbidez (%).....	64
Tabela 11 - Remoção da turbidez (%) ensaios do Branco	64
Tabela 12 - Coeficientes de regressão.....	65
Tabela 13 - Coeficientes de regressão para a remoção da cor (%), modelo reduzido	65
Tabela 14 - Análise de variância (intervalo de confiança de 95%)	66
Tabela 15 - Remoção da turbidez (%) ensaios validação	68
Tabela 16 - Teste T – amostras independentes	68
Tabela 17 - Matriz do delineamento experimental eletrofloculação com adição de Moringa oleífera em batelada (primeiro DCCR)	70
Tabela 18 - Remoção da cor (%) para os ensaios do Branco em batelada (primeiro DCCR).....	70
Tabela 19 - Coeficientes de regressão para a variável-resposta remoção da cor.....	71
Tabela 20 - Matriz do delineamento experimental eletrofloculação com adição de Moringa oleífera em batelada (segundo DCCR)	72
Tabela 21 - Remoção da cor (%) para os ensaios do Branco em batelada (segundo DCCR).....	72
Tabela 22 - Coeficientes de regressão para a remoção da cor (%)	73
Tabela 23 - Análise de variância (intervalo de confiança de 95%)	74
Tabela 24 - Matriz do delineamento experimental Validação da eletrofloculação e adição Moringa oleífera em batelada	76
Tabela 25 - Matriz do delineamento experimental eletrofloculação e adição Moringa oleífera em escoamento contínuo	76
Tabela 26 - Coeficientes de regressão para a remoção da cor (%)	77
Tabela 27 - Coeficientes de regressão para a remoção da cor (%), modelo reduzido	78
Tabela 28 - Análise de variância (intervalo de confiança de 95%)	78

Tabela 29 - Matriz do delineamento experimental para o Ferro Residual	82
Tabela 30 - Coeficientes de regressão para o ferro residual (Modelo completo)	83
Tabela 31 - Coeficientes de regressão para o ferro residual (Modelo reduzido)	83
Tabela 32 - Análise de variância (intervalo de confiança de 95%)	84
Tabela 33 - Matriz do delineamento experimental Validação eletrofloculação e adição Moringa oleífera em regime de escoamento contínuo	88
Tabela 34 - Matriz do delineamento experimental para o Ferro residual (Validação)	88

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 INDUSTRIA TÊXTIL E SEUS EFLUENTES	20
2.2 CORANTES TÊXTEIS.....	22
2.2.1 FIXAÇÃO DO CORANTE	23
2.2.2 CLASSIFICAÇÃO DOS CORANTES	24
2.3 CORANTE REATIVO AZUL 5G	26
2.4 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES TÊXTEIS	27
2.4.1 TRATAMENTO BIOLÓGICO.....	28
2.4.2 TRATAMENTO FÍSICO.....	29
2.4.3 TRATAMENTO QUÍMICO	30
2.5 COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO	30
2.5.1 MECANISMOS DE COAGULAÇÃO.....	31
2.5.2 COAGULANTES CONVENCIONAIS	33
2.5.3 MORINGA OLEÍFERA COMO COAGULANTE NATURAL	33
2.6 ELETROFLOCULAÇÃO.....	35
2.6.1 REATORES DE ELETROFLOCULAÇÃO	36
2.6.2 FATORES QUE INFLUENCIAM NO PROCESSO DE ELETROFLOCULAÇÃO.....	39
2.6.3 PRINCIPAIS VANTAGENS E DESVANTAGENS DA ELETROFLOCULAÇÃO.....	41
2.6.4 APLICAÇÕES DA ELETROFLOCULAÇÃO PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES TÊXTEIS	42
3 OBJETIVOS	44
3.1 OBJETIVO GERAL	44
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	44
4 MATERIAIS E MÉTODOS	45
4.1 METODOLOGIA ANALÍTICA	45
4.2 TRATAMENTO POR ELETROFLOCULAÇÃO ASSOCIADA A ADIÇÃO DO COAGULANTE NATURAL A BASE DE MORINGA OLEÍFERA (SISTEMA EM BATELADA)	45
4.2.1 PREPARAÇÃO DA SOLUÇÃO DE CORANTE REATIVO AZUL 5G	46
4.2.2 TRATAMENTO POR ELETROFLOCULAÇÃO	46
4.2.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL PARA APLICAÇÃO DA ELETROFLOCULAÇÃO VISANDO A REMOÇÃO DE CORANTE REATIVO AZUL 5G DE EFLUENTE TÊXTIL SINTÉTICO.....	47
4.2.4 PREPARO DO EXTRATO AQUOSO DE SEMENTES DE MORINGA OLEÍFERA.....	48
4.2.5 PREPARAÇÃO DA ÁGUA TURVA SINTÉTICA PARA ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO.....	49

4.2.6 ENSAIOS DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO	49
4.2.7 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL PARA OTIMIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE OBTENÇÃO E UTILIZAÇÃO DO EXTRATO AQUOSO DE MORINGA OLEÍFERA	50
4.2.8 ENSAIOS DE ELETROFLOCULAÇÃO ASSOCIADOS À ADIÇÃO DE COAGULANTE NATURAL A BASE DE MORINGA OLEÍFERA	50
4.2.9 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL APLICAÇÃO DA ELETROFLOCULAÇÃO ASSOCIADA A ADIÇÃO DE COAGULANTE NATURAL A BASE DE MORINGA OLEÍFERA EM SOLUÇÃO AQUOSA DE CORANTE AZUL REATIVO AZUL 5G ..	51
4.2.9.1 PRIMEIRO DCCR (ANÁLISE DOS FATORES: INTENSIDADE DE CORRENTE ELÉTRICA, TEMPO DE ELETROFLOCULAÇÃO E CONCENTRAÇÃO DE COAGULANTE A BASE DE MORINGA OLEÍFERA)	51
4.2.9.2 SEGUNDO DCCR (ANÁLISE DOS FATORES: INTENSIDADE DE CORRENTE ELÉTRICA E CONCENTRAÇÃO DE COAGULANTE A BASE DE MORINGA OLEÍFERA, AMBOS COM FAIXAS DE ESTUDO MAIS RESTRITAS) ..	52
4.3 TRATAMENTO POR ELETROFLOCULAÇÃO ASSOCIADA A ADIÇÃO DO COAGULANTE NATURAL A BASE DE MORINGA OLEÍFERA (SISTEMA EM FLUXO CONTÍNUO	52
4.3.1 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL APLICAÇÃO DA ELETROFLOCULAÇÃO ASSOCIADA A ADIÇÃO DE COAGULANTE NATURAL A BASE DE MORINGA OLEÍFERA EM SOLUÇÃO AQUOSA DE CORANTE REATIVO AZUL 5G EM FLUXO DE ESCOAMENTO CONTÍNUO	53
4.3.2 CONSTRUÇÃO E FUNCIONAMENTO DO MÓDULO EXPERIMENTAL PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTE TÊXTIL, EM REGIME DE ESCOAMENTO CONTÍNUO	54
4.3.3 ANÁLISE DE FERRO RESIDUAL	56
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
5.1 ESPECTRO DE VARREDURA DO CORANTE AZUL 5G.....	57
O COMPRIMENTO DE ONDA NO QUAL A ABSORÇÃO DO CORANTE REATIVO AZUL 5G FOI MAIOR CORRESPONDE A 618NM, CONFORME SE OBSERVA NA FIGURA 12. A PARTIR DESTES RESULTADOS OS DEMAIS ENSAIOS FORAM BASEADOS NO COMPRIMENTO DE ONDA DE MAIOR ABSORÇÃO.....	57
5.2 APLICAÇÃO DA ELETROFLOCULAÇÃO PARA REMOÇÃO DO CORANTE REATIVO AZUL 5G EM BATELADA.....	57
5.3 OTIMIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE OBTENÇÃO E UTILIZAÇÃO DO EXTRATO AQUOSO DE MORINGA OLEÍFERA	63
5.3.1 ENSAIOS PARA A VALIDAÇÃO.....	68
5.4 ELETROFLOCULAÇÃO ASSOCIADA A ADIÇÃO DE COAGULANTE NATURAL A BASE DE MORINGA OLEIFERA EM SOLUÇÃO DE AQUOSA DE CORANTE REATIVO AZUL 5G EM BATELADA.....	69
5.4.1 PRIMEIRO DCCR (ANÁLISE DOS FATORES: INTENSIDADE DE CORRENTE ELÉTRICA, TEMPO DE ELETROFLOCULAÇÃO E CONCENTRAÇÃO DE COAGULANTE A BASE DE MORINGA OLEÍFERA)	69
5.4.2 SEGUNDO DCCR (ANÁLISE DOS FATORES: INTENSIDADE DE CORRENTE ELÉTRICA E CONCENTRAÇÃO DE COAGULANTE A BASE DE MORINGA OLEÍFERA, AMBOS COM FAIXAS DE ESTUDO MAIS RESTRITAS) ..	72

5.4.3 VALIDAÇÃO DO MODELO DE REMOÇÃO DO CORANTE REATIVO AZUL 5G POR ELETROFLOCULAÇÃO E ADIÇÃO DE EXTRATO DE MORINGA OLEÍFERA PARA O SISTEMA EM BATELADA	75
6 RESULTADOS DO MÓDULO EXPERIMENTAL PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTE TÊXTIL, EM REGIME DE ESCOAMENTO CONTÍNUO	76
6.1 ANÁLISE DE FERRO RESIDUAL.....	82
6.2 DESEJABILIDADE GLOBAL.....	86
6.3 VALIDAÇÃO DO TRATAMENTO DE EFLUENTE TÊXTIL, EM REGIME DE ESCOAMENTO CONTÍNUO.....	87
CONCLUSÃO	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos é possível observar o crescimento econômico nacional, principalmente devido ao desenvolvimento das atividades industriais. A indústria têxtil é caracterizada como uma atividade responsável por parte deste desenvolvimento (BAÊTA *et al.*, 2012; CERQUEIRA *et al.*, 2009). Porém, ao tempo que contribui trazendo benefícios à vida moderna, se caracteriza como importante agente causador de degradação do ambiente.

O efluente industrial têxtil é caracterizado por sua baixa biodegradabilidade e relativa toxicidade (CERQUEIRA *et al.*, 2009). Além disso, a vasta gama de corantes passíveis de serem utilizados para o atendimento às demandas oscilatórias do mercado dificulta a estabilização da operação do sistema de tratamento. Deste modo, o estudo de tecnologias alternativas para o tratamento deste é de suma importância, uma vez que este setor é responsável por um grande consumo de água no processo, e a necessidade de proporcionar o reuso desta água se torna cada vez mais imprescindível.

De acordo com dados oriundos do Sistema de Informações Ambientais (IAP, 2013) para o período de 2004 a 2013, considerando-se empreendimentos que envolvem: Beneficiamento de fibras têxteis, vegetais, de origem animal e sintético; fabricação e acabamento de fios e tecidos; tingimento, estamparia e lavanderias, existem 62 (sessenta e dois) estabelecimentos licenciados nas regiões oeste, sudoeste e centro-sul do estado do Paraná, o que representa um potencial poluidor elevado levando-se em consideração os corpos d'água normalmente empregados como receptores dos efluentes tratados.

Neste contexto, o desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias de tratamento de efluentes se fazem necessários, não exclusivamente sob a ótica da viabilidade técnica na remoção de poluentes, mas também no âmbito sócio-ambiental, pois a minimização dos resíduos do próprio sistema de tratamento é de suma importância, assim como a otimização dos recursos naturais para tal.

Várias tecnologias têm sido empregadas para o tratamento destes resíduos. Processos convencionais para descoloração de rejeitos vêm sendo utilizados e

envolvem procedimentos de adsorção, precipitação, degradação química, biodegradação, floculação, etc (PASCHOAL & TREMILIOSI-FILHO, 2005).

No entanto o emprego de técnicas que utilizam reatores eletroquímicos tem apresentado resultados promissores para o tratamento de vários tipos de efluente (CRESPILHO & REZENDE, 2004). Este processo é denominado de eletrofloculação, eletroflotação ou eletrocoagulação.

Além destes processos convencionais, e ainda na busca por tecnologias alternativas de tratamento de efluentes têxteis, algumas iniciativas merecem destaque. Um dos produtos que tem encontrado campo para estudos em coagulação/floculação é a semente de Moringa oleífera Lam, seja na sua forma *in natura* ou ainda como extrato.

Sendo assim, a combinação das técnicas supracitadas, em especial a eletrofloculação e a adição de coagulante natural à base de Moringa oleífera, fornecerá resultados que demonstrem a eficiência do sistema de tratamento como sendo superior à utilização das referidas tecnologias quando empregadas isoladamente.

A proposta apresentada busca contribuir com tecnologias mais limpas de tratamento, pois visa a eficiência na remoção de poluentes do efluente têxtil (especificamente o Corante Reativo Azul 5G), por meio de técnicas menos agressivas ao meio ambiente, reduzindo-se a aplicação de produtos químicos. Para tanto, objetiva-se a aplicação de um sistema híbrido, composto pela eletrofloculação e a adição de coagulante natural à base de Moringa oleífera, operando em regime contínuo.

O tratamento por eletrofloculação atuando em conjunto com o potencial da Moringa oleífera se apresenta como uma alternativa sob o ponto de vista da viabilidade técnico-econômica-ambiental. Com esta proposta, na forma de um sistema híbrido, duas tecnologias promissoras de tratamento de efluente têxtil podem ser empregadas, utilizando-se condições operacionais mais brandas. Sendo assim, busca-se potencializar o nível de tratamento que seria alcançado com as técnicas quando utilizadas isoladamente, sem que haja um maior impacto ao meio ambiente, uma vez que as tecnologias empregadas são classificadas como “mais limpas”.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INDUTRIA TÊXTIL E SEUS EFLUENTES

Indústrias têxteis são complexas e com elevado consumo de energia em seu processo produtivo, além disso, são formadas por setores fragmentados e heterogêneos, dominados por pequenas e médias empresas (HASANBEIGI *et al.*, 2012). Apesar de o setor têxtil no Brasil possuir um grande potencial econômico, as indústrias do ramo representam um grande problema ambiental. Um dos motivos pelos quais elas são assim designadas é o fato de que necessitam de um alto consumo de água, gerando efluentes potencialmente poluidores com elevada carga orgânica, e que são caracterizados por sua biodegradabilidade dificultada e relativa toxicidade (ZAFRILLA *et al.*, 2008; PASCHOAL & TREMILIOSI-FILHO, 2005).

De acordo com Carmo (1991), os efluentes gerados por uma indústria têxtil têm características que podem sofrer modificações de acordo com o tipo de fibras processadas. Outro fator relevante é a vasta gama de corantes passíveis de serem utilizados para o atendimento às demandas oscilatórias do mercado, que por consequência modificam as características químicas e físicas do efluente gerado (CERQUEIRA *et al.*, 2009) assim como, os surfactantes, os detergentes, ácidos, álcalis, sais, solventes e auxiliares (MISHRA & TRIPATHY, 1993). No entanto, dependendo do tipo de corante e do modo de aplicação requerido, a etapa final da tintura pode contribuir significativamente no lançamento de rejeitos de diversas substâncias químicas com composição variável (GUARATINI & ZANONI, 2000).

Os processos e despejos gerados pela indústria têxtil variam à medida que a pesquisa e o desenvolvimento produzem novos reagentes químicos, novos processos e técnicas, e também de acordo com a demanda do consumo por outros tipos de tecidos e cores (HASSEMER & SENS, 2002).

Devido a alta concentração de matéria orgânica, materiais não-biodegradáveis, substâncias tóxicas, detergente, soda, óleos e graxas, os resíduos de indústrias têxteis geralmente são de elevada complexidade (RODRIGUEZ *et al.*, 2002). Também se caracterizam por serem altamente coloridos, devido à

presença de corantes que não se fixam na fibra durante o processo de tingimento (KUNZ *et al.*, 2002).

O lançamento de efluentes têxteis não tratados num corpo receptor poderá provocar uma considerável degradação ambiental. De acordo com Guaratini & Zanoni (2000), em maior ou menor nível de concentração, o despejo desse resíduo poderá interferir na absorção de luz do ambiente aquático, prejudicando o processo de fotossíntese, além de contribuir para a contaminação dos mananciais e da água distribuída a população e transportados pelos corpos receptores até as estações de tratamento de água municipais.

Segundo Guaratini & Zanoni (2000), do ponto de vista ambiental, a remoção da cor do banho de lavagem é um dos principais problemas dentro do processamento têxtil. Parte da produção mundial de corantes é perdida para o meio ambiente durante a síntese, processamento ou aplicação desses corantes, devido a sua incompleta fixação na etapa de tingimento das fibras.

Bastian (2009) destaca os tópicos a seguir considerando-os mais relevantes dentro do processamento têxtil no que se refere a impactos causados:

a) Geração de efluente e cor: a composição dos efluentes têxteis varia de acordo com as diversas características dos processos produtivos, dificultando a consolidação de dados gerais. Os setores produtivos de tinturaria, estamparia e engomagem/desengomagem são os principais geradores de efluentes com concentrações de carga orgânica por matéria-prima ou produto.

b) Odor do óleo de enzimação: os óleos de enzimação são utilizados com a finalidade de lubrificar os fios das fibras têxteis, sejam naturais ou sintéticas, visando impedir o acúmulo de cargas estáticas nas fibras (provocam a repulsão e eriçamento das fibrilas, podendo levar a quebra ou rompimento dos fios no processo), facilitar o deslizamento dos fios nas guias e maquinários e aumentar a coesão das fibras.

c) Geração de resíduos: ao longo da cadeia têxtil existem diversas operações que geram resíduos, desde o descaroçamento do algodão até restos de fios e tecidos nas confecções, variando estes rejeitos quanto à característica e quantidade. Em especial, merecem destaque os resíduos perigosos oriundos de embalagem ou mesmo do uso de produtos químicos, como por exemplo, a perda de pasta na

estamparia, a geração de lodos biológicos de tratamento, entre outros. No que se refere ao lodo biológico é importante salientar que este possui poder calorífico e poderá ser utilizado com substituto de combustível em caldeiras de biomassa.

d) Ruído e Vibração: diversos equipamentos utilizados nas sucessivas etapas da cadeia têxtil podem ser fonte potencial de emissões de ruído e de vibração, que se não controladas podem gerar incômodo à vizinhança das indústrias.

Para Kunz & Zamora (2002), a poluição dos corpos d'água por corantes têxteis provoca, além da poluição visual, alterações em ciclos biológicos afetando principalmente processos de fotossíntese. Desta forma, pode estar inibindo o crescimento da biota aquática e interferindo na solubilidade de gases no corpo d'água (GARG *et al.*, 2004).

2.2 CORANTES TÊXTEIS

Corantes são, por definição, substâncias consideradas altamente coloridas e que possuem a propriedade de dar cor quando aplicadas a um material (ABIQUIM, 2014). Estes compostos químicos orgânicos fazem parte de um grupo de materiais chamados colorantes, que por sua vez são caracterizados por sua habilidade em absorver luz visível (400 a 700 nm) (MÓDENES *et al.*, 2011; GUARANTINI & ZANONI, 2000).

O grupo cromóforo mais utilizado é o da família dos “azo” corantes, ligados a sistemas aromáticos conforme observado na Figura 1, que corresponde a, aproximadamente, 60 a 70% de todos os corantes têxteis produzidos. A outra parte da molécula do corante é constituída pelo grupo auxocromo, responsável pela fixação do corante à fibra têxtil e intensificação da sua cor. Os grupos auxocromos mais comuns são: etila, nitro, amino, sulfônico, hidroxila, metóxi, etóxi, cloro e bromo (KIMURA *et al.*, 1999). Normalmente, a fixação do corante à fibra é feita por meio de reações químicas ou pela adsorção do corante ou derivado gerados por reações químicas durante o processo de tingimento (ZANONI & CARNEIRO, 2001).

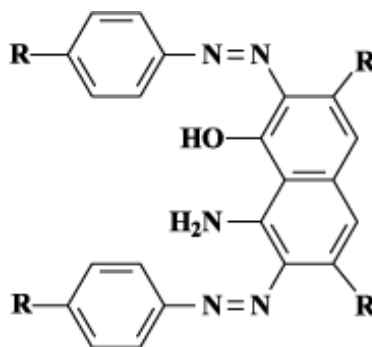


Figura 1- Exemplo de uma estrutura química característica de um grupo cromóforo de um azocorante

Fonte: KUNZ *et al.*, (2002).

As fibras têxteis podem ser divididas em dois grupos denominados fibras naturais e sintéticas. As fibras naturais mais utilizadas são baseadas em celulose (cadeias poliméricas lineares de glucose) e proteína (polímero complexo composto de diferentes aminoácidos) presentes na lã, seda, algodão e linho. As fibras sintéticas são comercializadas como viscose (xantato de celulose obtida da madeira, acetato de celulose e triacetato de celulose obtido da madeira), poliamida (condensação do ácido adípico e hexametileno diamina), poliéster (polímero do ácido tereftálico e etilenoglicol) e acrílico (polimerização da acrilonitrila) GUARANTINI & ZANONI, 2000).

2.2.1 Fixação do Corante

A fixação da molécula do corante às fibras ocorre através de reações químicas, geralmente é feita em solução aquosa e pode envolver basicamente quatro tipos de interações químicas: ligações iônicas, ligações de hidrogênio, interações de Van Der Waals e ligações covalentes (IMMICH, 2006). Segundo Guarantini & Zanoni, 2000 seguem abaixo:

a) Ligação Iônica - São tingimentos baseados em interações mútuas entre o centro positivo dos grupos amino e carboxilato presentes na fibra, e a carga iônica da

molécula do corante ou vice-versa. Exemplos característicos deste tipo de interações são encontrados na tintura da lã, seda e poliamida.

b) Ligação Covalente - São provenientes da formação de uma ligação covalente entre a molécula do corante contendo grupo reativo (grupo eletrofílico) e resíduos nucleofílicos da fibra. Exemplos característicos deste tipo de interação são tinturas de fibra de algodão.

c) Interações de Van Der Waals - São tingimentos baseados na interação proveniente da aproximação máxima entre orbitais do corante e da molécula da fibra, de tal modo que as moléculas do corante são “ancoradas” firmemente sobre a fibra por um processo de afinidade, sem formar uma ligação propriamente dita. Exemplos característicos deste tipo de interação são encontrados na tintura de lã e poliéster com corantes com alta afinidade por celulose.

d) Ligação de Hidrogênio - São tinturas provenientes da ligação entre átomos de hidrogênio covalentemente ligados no corante e pares de elétrons livres de átomos doadores em centros presentes na fibra. Exemplos característicos deste tipo de interação são encontrados na tintura de lã, seda e fibras sintéticas como acetato de celulose.

2.2.2 Classificação dos Corantes

As moléculas de corante compreendem dois elementos principais: o grupo cromóforo, responsável pela cor e o grupo funcional, que se liga às fibras do tecido. A classificação dos corantes pode ser feita de acordo com a sua estrutura química ou com o método pelo qual é fixado à fibra têxtil (KUNZ & ZAMURA, 2002).

Segundo Bastian (2009), os principais grupos de corantes, classificados pelo modo de fixação, são apresentados abaixo:

a) Corantes a tina: são subdivididos em dois grupos: os indigóides e os antraquinônicos. Além da insolubilidade em água, a presença de um grupo cetônico é outra característica destes corantes.

b) Corantes reativos: caracterizam-se por terem pelo menos um grupo cromóforo, responsável pela cor e um grupo reativo que é a parte química do corante que reage com os grupamentos hidroxílicos (OH). A sua principal característica é a solubilidade em água.

c) Corantes dispersos ou plasto solúveis: a principal característica deste corante é a insolubilidade em água e o caráter não iônico, possuindo afinidade com fibras hidrofóbicas. São empregados geralmente no tingimento de tecidos tipo poliéster, acetato, triacetato e em alguns casos poliamida e acrílicas.

d) Corantes diretos: são corantes aniônicos, com grande afinidade para a celulose. Tiveram como concepção original o tingimento do algodão.

e) Corantes 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.

f) Corantes catiônicos (básicos modificados): são corantes solúveis em água que produzem soluções coloridas catiônicas devido à presença de grupamento amino (NH₂). Geralmente aplicados em fibras acrílicas, fornecendo cores vivas e algumas até mesmo fluorescentes de boa solidez.

g) Corantes ao enxofre (sulfurosos): Estes corantes são insolúveis em água e sua aplicação assemelha-se a dos corantes a tina. Tem como característica a existência de compostos macromoleculares com pontes dissulfídicas (-S-S-).

h) Corantes naturais: obtidos a partir de substâncias vegetais ou animais, com pouco ou nenhum processamento químico e são principalmente do tipo mordente, embora existam alguns a tina, solventes, pigmentos, diretos e ácidos. Sua principal

aplicação ocorre em tingimentos do tipo mordente, ou seja, esses corantes não liberam sua cor nas fibras, a menos que estejam na presença de certos metais.

2.3 CORANTE REATIVO AZUL 5G

O corante Azul Reativo 5G é um dos principais corantes utilizados pelas lavanderias industriais. Sua estrutura molecular pode ser observada na Figura 2. Possui solubilidade acima de 100 g.L^{-1} a 25°C , pH em solução aquosa entre 6,0 e 9,0 e possui massa molar de 815 g.mol^{-1} (TEXPAL, 2008).

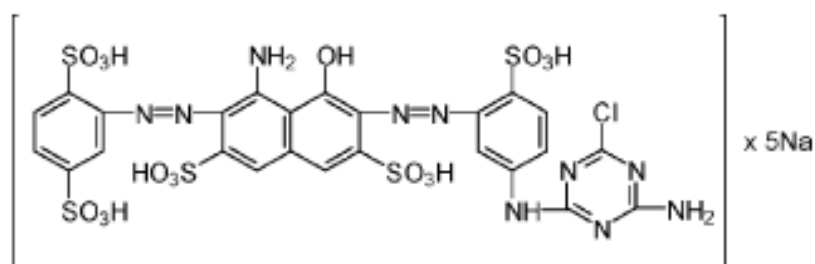


Figura 2- Estrutura molecular do corante Reativo Azul 5G

Fonte: KOPRIVANAC *et al.*, (2005).

Este corante pertence à classe dos corantes reativos monoclorotriazina do tipo azo (KOPRIVANAC *et al.*, 2005). É classificado como um corante azo devido à presença de grupamentos $-\text{N}=\text{N}-$ ligados a anéis aromáticos. Este corante é amplamente utilizado em processos de lavanderias industriais e tingimento têxtil por se apresentar com um excelente comportamento tintório e boa penetração (TEXPAL, 2005).

Processos de remoção do corante Azul 5G são muito estudados, pois esse corante é um dos mais utilizados pelas indústrias e lavanderias têxteis no tingimento de tecido de algodão.

2.4 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES TÊXTEIS

Os processos desenvolvidos para determinar a viabilidade de tratamento de efluentes devem ser direcionados a cada tipo em particular, uma vez que não existem procedimentos padronizados que possa ser aplicada a grande variedade de resíduos existentes, isso tudo devido à extrema complexidade e diversidade dos compostos nele encontrados. Em função disto, muitas alternativas têm sido estudadas (RODRIGUES, 2001).

A remoção de corantes de efluentes têxteis é uma tarefa desafiadora, porque em geral, eles são estáveis e de difícil degradação devido à presença de estruturas aromáticas complexas que resistem à luz solar, agentes oxidantes e microrganismos,(PASCHOAL & TREMILIOSI-FILHO, 2005; CHU, 2001). Processos convencionais de remoção de corantes vêm sendo utilizados, com destaque para a adsorção (KANNAN; SUNDARAM, 2001; MESHKO *et al.*, 2001), precipitação, degradação química, degradação fotoquímica e biodegradação (GONZALEZ-GUTIERREZ; ESCAMILLA-SILVA,2009).

Muitos são os métodos utilizados no tratamento de efluentes industriais e estes podem ser divididos em três categorias: químicos, físicos e biológicos. Os tratamentos de efluentes industriais envolvem processos necessários à remoção de impurezas geradas na fabricação de produtos de interesse. Os métodos de tratamento estão diretamente relacionados ao tipo de efluente gerado, ao controle operacional da atividade industrial e das características da água utilizada (CERQUEIRA, *et al.*,2009). A Figura 3 esquematiza de maneira generalizada os principais métodos disponíveis para o tratamento de efluentes.

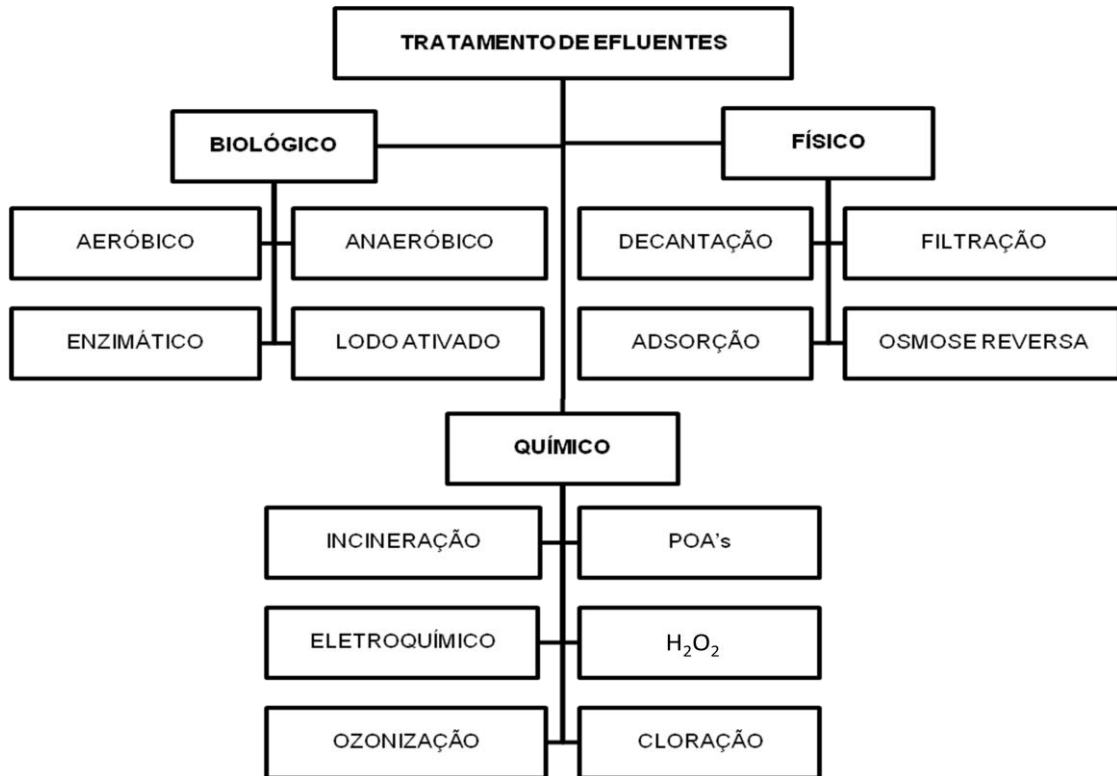


Figura 3- Processos disponíveis para o tratamento de efluentes industriais

Fonte: RODRIGUES, 2001.

2.4.1 Tratamento Biológico

Segundo Inoue (2008), os processos biológicos têm a finalidade de transformar a carga orgânica despejada em rios e lagoas em material celular através da ação de microrganismos. Esses excessos de nutrientes provenientes dos despejos causam desequilíbrio e os seres aeróbicos tendem a morrer por falta de oxigênio. As estações de tratamento biológico procuram evitar que esses despejos causem tal desequilíbrio, removendo a carga de nutrientes na própria estação.

Os principais processos biológicos utilizados em rotinas de tratamento são fundamentados em processos de oxidação biológica aeróbia, por exemplo, sistemas de lodos ativados, filtros biológicos e lagoas de estabilização, processos anaeróbios (reatores anaeróbios de fluxo ascendente) e processos mistos (digestão do lodo e fossas sépticas) (BRAILE & CAVALCANTI, 1993).

O tratamento biológico, adotado na forma de lagoas de estabilização, requer uma grande extensão de área e é limitado pela sensibilidade das variações

climáticas, bem como pela toxicidade de alguns produtos químicos e também é menos flexível em projetos e operações. O tratamento biológico é incapaz de obter uma eliminação satisfatória da cor com processos de biodegradação convencional. Além disso, apesar de algumas moléculas serem degradadas, muitas outras são recalitrantes devido a sua estrutura química complexa e origem orgânica sintética (CRINI, 2006; AKSU & TEZER, 2005).

2.4.2 Tratamento Físico

Nos processos físicos, há predominância de um sistema ou dispositivo que permite a remoção das substâncias que são fisicamente separáveis dos líquidos. Em geral, os principais tratamentos físicos estão representados por processos de separação de fases (decantação, sedimentação, filtração, centrifugação e flotação), transição de fases (destilação, evaporação, cristalização), transferência de fases (extração por solventes, adsorção), e separação molecular (hiperfiltração, ultrafiltração, osmose reversa e diálise). Dentre estes processos, o uso de membranas permite realizar a separação de substâncias de diferentes propriedades fundamentando-se na semipermeabilidade das membranas (GULYAS, 1997).

Diferentes métodos físicos são também amplamente usados para a remoção de cor, tais como os processos de filtração com membranas denominadas nanofiltração, osmose reversa, eletrodialise, além de troca iônica e técnicas de adsorção (ROBINSON *et. al*, 2001; AKSU & TEZER, 2005; CRINI, 2006).

Em geral, são utilizados grades, peneiras simples ou rotativas, filtros, tanques de remoção de óleo e graxas, decantadores e outros, onde são removidos os resíduos grosseiros do efluente com o objetivo de proteger as tubulações e os equipamentos dos tratamentos posteriores (QUADROS, 2005).

2.4.3 Tratamento Químico

Em tratamentos de despejos, os métodos químicos podem ser utilizados para remover material coloidal, cor e turbidez, odor, ácidos, álcalis, metais pesados e óleos (BRAILE & CAVALCANTI, 1993). Alguns métodos químicos para tratamento de efluentes industriais incluem coagulação ou floculação combinados com flotação e filtração, precipitação-floculação, eletroflotação, coagulação eletrocínética, métodos de oxidação convencionais por agentes oxidantes (ozônio), irradiação ou processos eletroquímicos. Estes métodos obtêm bons níveis de redução da carga orgânica, temperatura e em alguns casos, coloração dentro da para despejo (INOUE, 2008).

2.5 COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO

O processo de coagulação/floculação tem por finalidade a remoção do material sólido em suspensão e/ou dissolvido. É considerado normalmente como um pré-tratamento que tem por objetivo o condicionamento do despejo para o tratamento subsequente (VAZ, 2009).

Esse material sólido em suspensão e/ou dissolvido é conhecido como substância coloidal. Esses colóides podem ser definidos como partículas de grande dificuldade de remoção, pois entre duas partículas existem uma força de repulsão eletrostática que os mantém separados. Esta força é desenvolvida por íons positivos adsorvidos em sua superfície provenientes da solução (RATTMAN *et al.*, 2004).

Ainda de acordo com os autores, uma suspensão coloidal permanece dispersa e estável infinitamente, ou seja, não sedimenta, quando as forças de repulsão excedem ou se igualam às forças de atração de modo que não permitam colisões entre as partículas. Uma técnica de tratamento que permite a colisão entre as partículas com a finalidade de sedimentá-las é a coagulação. A coagulação/floculação são processos físico-químicos usados para agregarem colóides e partículas dissolvidas em flocos maiores, que podem ser facilmente

sedimentados por gravidade e em seguida removidos (LICSKÓ, 1997; KAWAMURA, 1996). Segundo Di Bernardo (1993), essa aglomeração ou agregação das partículas resulta da ação conjunta de dois fenômenos: a desestabilização das partículas e o transporte das mesmas para permitir os contatos.

De acordo com Bassin & Dezotti (2008), a aglomeração das impurezas é um fenômeno do processo de desestabilização das cargas superficiais das partículas em suspensão provocada pela adição de agentes químicos (eletrólitos), os quais neutralizam as forças elétricas superficiais de modo que anulam as forças repulsivas, por meio de mecanismos de ligação e adsorção na superfície desses colóides. Após a etapa de coagulação ocorre o processo de aglomeração dos colóides descarregados até a formação de flocos que sedimentam. Esse processo é conhecido como floculação e é favorecido pela agitação suave que facilita o contato dos coágulos e evita a quebra dos flocos que são formados.

2.5.1 Mecanismos de coagulação

O fenômeno da coagulação caracteriza-se pela alteração da força iônica do meio e a literatura apresenta quatro principais formas de desestabilização de partículas coloidais: a) compressão da camada difusa, b) adsorção e neutralização, c) varredura, d) adsorção e formação de pontes.

a) Compressão da Camada Difusa

Segundo Rattman *et al.* (2004), existem duas camadas de íons positivos que envolvem a superfície da partícula coloidal: uma camada fixa com uma carga oposta ao da partícula, que adere à superfície da partícula e se desloca com ela; uma camada difusa que se adere menos firmemente à partícula.

Quando um eletrólito indiferente é adicionado à suspensão coloidal estável não ocorrem interações químicas significativas e os efeitos são predominantemente eletrostáticos. Para ocorrer redução na barreira de energia que envolve a partícula coloidal é necessária uma força iônica suficientemente grande (BACHE & GREGORY, 2007).

b) Adsorção e neutralização

Neste mecanismo a neutralização de carga ocorre quando uma quantidade suficiente de coagulante é adicionada à água, de modo que, a carga negativa sobre os contaminantes seja eliminada, ou seja, atinja valores de potencial zeta próximos de zero. Como a carga e a barreira de energia são reduzidas, o processo de coagulação avança. Quando a superfície de carga é neutralizada, as interações entre as partículas são dominadas pelas forças de Van der Waals, permitindo uma rápida coagulação (BACHE & GREGORY, 2007).

c) Varredura

Segundo Bache & Gregory (2007), o processo de coagulação por varredura ocorre, pois as partículas coloidais arranjam-se em precipitados volumosos pela introdução de coagulantes, como o alumínio e o ferro. Na medida em que essas partículas passam a serem recolhidas pelas estruturas floculantes, elas são recobertas por uma carga positiva fortemente aderida ao precipitado.

d) Adsorção e formação de pontes

Este mecanismo ocorre por intermédio da utilização de compostos orgânicos sintéticos ou naturais, utilizados como coagulantes. Segundo Rattman *et al.* (2004) existe uma variedade de compostos naturais e sintéticos com grande cadeia molecular e com cargas elétricas ao longo da cadeia, de modo que os tornam capazes de agir como coagulante. Conforme ilustração da Figura 4.

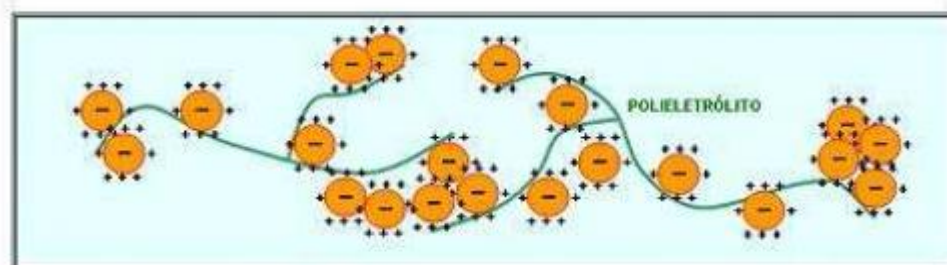


Figura 4- Mecanismo de adsorção e formação de pontes

Fonte: RATTMAN *et al.* (2004).

2.5.2 Coagulantes convencionais

Os coagulantes convencionais empregados geralmente são de origem inorgânica, como os sais de ferro ou de alumínio. Eles são capazes de produzir hidróxidos insolúveis que envolvem e adsorvem impurezas (LIN, 2001; BASSIN & DEZOTTI, 2008).

Para reagir e formar flocos é necessário que a água contenha alcalinidade natural ou alcalinidade adicionada através dos auxiliares de coagulação. Os principais auxiliares de coagulação são: bicarbonato de sódio, carbonato de sódio, hidróxido de sódio, hidróxido de cálcio e óxido de cálcio (GÓES, 2007). Os dois produtos, coagulante e auxiliar de coagulação, são aplicados na água com agitação para se obter uma melhor homogeneização e formação dos flocos.

2.5.3 Moringa oleífera como coagulante natural

Segundo Gassenshmidt *et al.*, (1995), a Moringa oleífera é conhecida, principalmente, por apresentar propriedades coagulantes, sendo utilizada em diversos países como um método natural, eficiente e econômico de purificação de água. Além disso, aliada a estas características também pode ser utilizada na alimentação e na indústria de cosméticos, devido ao seu valor protéico e ao alto teor de óleo.

No Brasil, foi introduzida por volta de 1950, sendo encontrada na região Nordeste, principalmente nos Estados do Maranhão, Piauí e Ceará. Pode ser explorada tanto em condições irrigadas quanto de sequeiro, apresentando grande potencial diante de sua multiplicidade de usos (LORENZI & MATOS, 2002).

Os estudos científicos iniciais relacionados a utilização desta planta como coagulante, foram desenvolvidos na Alemanha e na Inglaterra, na década de 80 (ARANTES, RIBEIRO & PATERNIANI, 2012). Pesquisas realizadas na década de 90 (NDABIGENGESERE *et al.*, 1995; OKUDA *et al.*, 1999) demonstraram que proteínas com alto peso molecular presentes nas sementes de Moringa oleífera são

responsáveis pelo processo de coagulação, cujas constatações são confirmadas em estudos mais recentes (GHEBREMICHAEL *et al.*, 2005; AGRAWAL *et al.*, 2007).

Os coagulantes naturais têm demonstrado diversas vantagens em relação aos químicos, especificamente no que se refere à biodegradabilidade, baixa toxicidade e baixo índice de produção de lodo residual (MORAES, 2004). A capacidade de coagulação do extrato aquoso de sementes de Moringa oleífera é equivalente ao sulfato de alumínio, podendo atuar também como coadjuvante de coagulação, em associação com sais de ferro e alumínio (FRIGHETO *et al.*, 2007; GUEDES, 2004).

A utilização do agente coagulante da Moringa oleífera apresentou resultados muito significativos como coagulante natural, podendo ser considerada como uma técnica alternativa para o tratamento de água (SANTANA, 2009). Na literatura a obtenção de solução coagulante à base de sementes de Moringa oleífera, é reportada de diferentes maneiras não havendo padronização para o procedimento (ARANTES, RIBEIRO & PATERNIANI, 2012).

A Moringa oleífera é eficiente para tratar água com alta turbidez sem apresentar riscos para o homem (GUEDES, 2004). E quando comparada com o alumínio, não altera significativamente o pH e a alcalinidade da água após o tratamento e não causa problemas de corrosão nas tubulações. Na Figura 5 observa-se a árvore e as sementes de Moringa oleífera.



Figura 5- Árvore e sementes de Moringa oleífera, respectivamente

Fonte: PRITCHARD *et al.* (2010).

A dinâmica do pH para o uso de Moringa oleífera como coagulante é inversa aos coagulantes convencionais. Para este com o acréscimo da concentração do coagulante o pH da água torna-se mais ácido, fato esse que não ocorre com extratos da semente de Moringa oleífera, onde o aumento da sua concentração contribui para o aumento de pH, ou seja, mais básico (AMAGLOH E BENANG, 2009). No entanto, segundo Ndabigengesere & Narasiah (1998), essa alteração não parece ser muito significativa, pois o uso da Moringa oleífera praticamente não afeta tão somente o pH, mas também a condutividade.

2.6 ELETROFLOCULAÇÃO

Nos últimos anos especial destaque tem sido dado à utilização de processos eletroquímicos para o tratamento de efluentes potencialmente poluidores, como por exemplo, a técnica de eletrofloculação que vem ganhando popularidade e se tornando uma alternativa viável frente ao processo convencional de coagulação/floculação (CERQUEIRA, 2009; HARIF & ADIN, 2007).

Pesquisadores estão desenvolvendo processos de tratamento que utilizam reatores eletroquímicos para descontaminar diversos tipos de efluentes. Esses processos acontecem no interior de um reator eletroquímico com eletrodos onde ocorrem as reações de coagulação. A eletrofloculação também é conhecida como eletro-coagulação e eletro-flotação (CRESPILHO & REZENDE, 2004) que envolve a desestabilização de poluentes emulsificados, ou em suspensão, em meio aquoso (AQUINO NETO *et al.*, 2011).

Essa técnica pode ser considerada uma alternativa aos processos convencionais de coagulação/floculação, porém ao contrário destes métodos, onde os coagulantes são adicionados ao efluente na forma de sais, no processo de eletrofloculação os coagulantes (ferro ou alumínio) são adicionados à suspensão por meio da dissolução do ânodo que é oxidado e o cátodo reduzido, a partir de uma voltagem aplicada, o que provoca a agregação das partículas posteriormente removidas por sedimentação ou filtração (SASSON & ADIN, 2010; BRITO, FERREIRA & SILVA, 2012).

A seguir serão apresentados os principais tipos de reatores utilizados na eletrofloculação, com seus princípios, fatores que influenciam e principais aplicações.

2.6.1 Reatores de Eletrofloculação

Em sua forma mais simples um reator utilizado para eletrofloculação é composto de um ânodo e um cátodo. Quando um potencial é aplicado, por uma fonte externa, o material do ânodo é oxidado, da mesma forma o cátodo estará sujeito à redução ou deposição redutiva do elemento metálico. As principais reações com o metal (M) são apresentadas resumidamente, nas Equações 1 a 4. (MOLLAH *et al.*, 2004).

No ânodo:



No cátodo:



De acordo com a equação 4, microbolhas de hidrogênio podem ser formadas no cátodo e oxigênio no ânodo, devido ao potencial aplicado. Essas microbolhas podem carrear partículas geradas no interior do reator. Ao chegar à superfície do reator, a suspensão (flotado) pode ser removida por processos convencionais, tais como: raspagem, sucção, etc (CRESPILHO & REZENDE, 2004). De acordo com a Figura 6 pode-se observar o desenho esquemático de um reator de eletrocoagulação em escala de bancada com eletrodos monopolares conectados em paralelo e com agitação magnética constante.

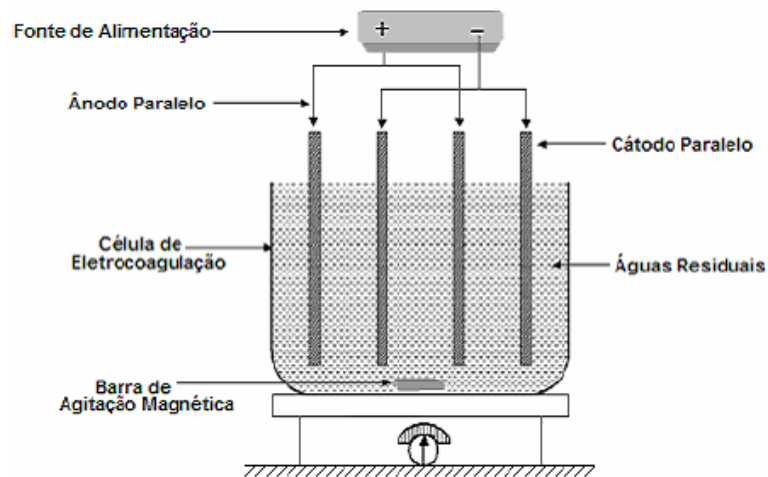


Figura 6- Reator de eletro-coagulação em escala de bancada com eletrodos monopolares conectados em paralelo

Fonte: MOLLAH *et al.* (2004).

Segundo Aquino Neto *et al.* (2011) este processo eletroquímico ocorre em três etapas. Primeiramente o coagulante é gerado pela oxidação de um ânodo metálico de sacrifício, em seguida os respectivos cátions são gerados na fase anódica e reagem com moléculas de água para formação dos hidróxidos e polihidróxidos. Em conjunto ocorre a eletrólise da água e a formação de microbolhas de oxigênio no ânodo e hidrogênio no cátodo que carregarão, na última etapa, o material floculado para a superfície.

Na segunda etapa, os hidróxidos que são formados adsorvem-se em partículas coloidais originando os flóculos e ocorre o transporte dessas espécies que entram em contato com as impurezas. Na última etapa do processo ocorre a flotação, em consequência da formação das microbolhas que são geradas da eletrólise da água (Figura 7).

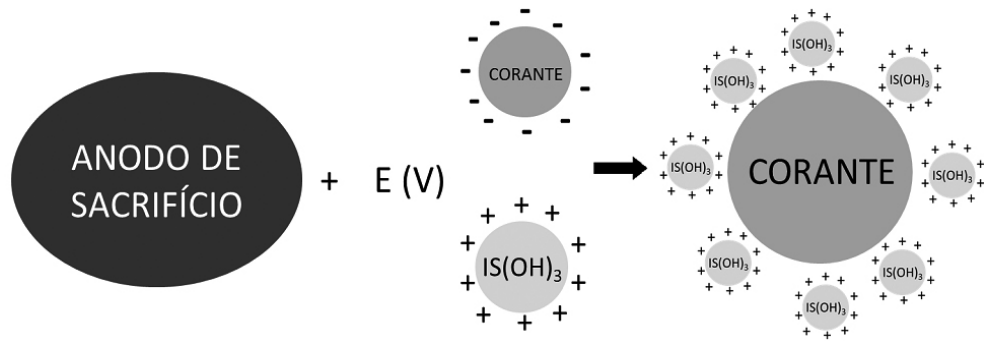


Figura 7- Ilustração do processo de adsorção e formação das partículas coloidais que geram os flóculos com as moléculas de corantes. IS = íon de sacrifício: $\text{Al}(\text{OH})_3$ ou $\text{Fe}(\text{OH})_3$, conforme esquema empregado

Fonte: AQUINO NETO *et al.* (2011).

Nessa forma simplificada de reator é requerido o uso de eletrodos com grandes áreas superficiais. Uma melhora no desempenho pode ser alcançada usando-se células de eletro-coagulação com eletrodos monoplares tanto em conexões em série quanto em paralelo. Um arranjo em paralelo consiste essencialmente em pares de placas de metais condutores, localizados entre dois eletrodos paralelos e uma fonte de alimentação. Em um arranjo monopolar cada par de “eletrodos de sacrifício” está internamente conectado um ao outro, e sem interconexão com os eletrodos externos (MOLLAH *et al.*, 2004).

No caso do reator bipolar, os eletrodos de sacrifício são colocados entre os dois eletrodos em paralelo (placas condutoras), sem qualquer conexão elétrica, só os dois eletrodos monoplares são conectados à fonte de energia elétrica, sem interconexão entre os eletrodos de sacrifício. Quando a corrente elétrica atravessa os dois eletrodos, os lados neutros da placa adquirem carga oposta à do eletrodo monopolar (CRESPILHO & REZENDE, 2004).

O tratamento eletroquímico surge como uma alternativa para realizar a oxidação e não apenas a transferência de fase do material orgânico de interesse (AQUINO NETO *et al.*, 2011). Diversos tipos de reatores foram propostos na literatura para a técnica de eletrofloculação, porém, este tipo de reator é o mais utilizado em tratamento de efluentes industriais (MOLLAH *et al.*, 2001; CERQUEIRA, 2006).

2.6.2 Fatores que Influenciam no Processo de Eletrofloculação

Os principais fatores relacionados a eficiência da técnica de eletrofloculação para o tratamento de efluentes industriais são: condutividade do meio, temperatura e disposição dos eletrodos (FORNARI, 2007). Além disso, segundo Chen (2004), a eficiência de um sistema de eletrofloculação é refletido diretamente na remoção dos poluentes e na potência aplicada. Também uma seleção apropriada dos materiais é muito importante, e os mais comuns são alumínio e ferro, pois são baratos, eficazes e prontamente disponíveis (CRESPILHO & REZENDE, 2004).

A seguir serão apresentados e comentados as principais variáveis do processo de eletrofloculação que interferem na reação eletroquímica aplicada em efluentes industriais. Se destacam dentre elas: a) Efeito do pH; b) Potência dissipada da corrente; c) Condutividade; d) Temperatura; e) Distância dos eletrodos; f) Passivação e polarização dos eletrodos; g) Inversão de polaridade; h) Consumo de eletrodos; i) Consumo de energia elétrica.

a) Efeito do pH

Segundo Chen (2004), quando aplicado a técnica em efluentes ácidos o valor deste tende a aumentar devido a redução de hidrogênio do cátodo. Porém, outras soluções participam deste equilíbrio, como por exemplo hidrólise do alumínio e/ou ferro, formação de oxigênio no ânodo, liberação de CO_2 e formação de outros hidróxidos insolúveis.

b) Potência dissipada da corrente

Quando aplicada uma diferença de potencial (ddp) entre dois eletrodos dentro de uma célula eletrolítica imersos em solução, reações de oxidação e redução ocorrem no ânodo e cátodo. Dessa forma a eletrofloculação está diretamente relacionada com o desgaste do eletrodo no processo de geração do coagulante, ou seja, a geração do alumínio e/ou ferro está relacionada à carga de corrente elétrica, que por sua vez, pode ser controlada pela corrente obtida.

c) Condutividade

Segundo Cerqueira (2006), a condutividade do efluente é a capacidade de conduzir corrente elétrica e que deve ser diretamente proporcional a quantidade de íons condutores presentes no líquido, íons estes que são responsáveis pela condução da corrente elétrica. Quanto maior a concentração destes íons no efluente, maior será a capacidade de condução de corrente elétrica e maior será a possibilidade de ocorrerem reações entre as substâncias presentes no efluente, o que mostra um fator positivo que possibilita a redução do consumo energético.

d) Temperatura

Cerqueira (2006) afirma que a temperatura influencia nas reações químicas que ocorrem no interior da célula eletrolítica, pois pode acelerar ou retardar as reações no interior da célula. Além disso, com o aumento da temperatura, aumenta a condutividade e diminui o consumo de energia elétrica.

e) Distância dos eletrodos

Quanto maior a distância aplicada nos eletrodos, maior deverá ser a diferença de potencial aplicada, pois a solução possui resistividade à passagem da corrente elétrica. Portanto, dependendo das características do efluente, a distância dos eletrodos pode variar para melhorar a eficiência do processo (CRESPILHO & REZENDE, 2004).

f) Passivação e polarização dos eletrodos

Segundo Crespilho & Rezende (2004), uma vez formado um filme passivo, o processo de eletrofloculação pode estar comprometido pela perda de eficiência em decorrência do aumento da resistividade do eletrodo. Esse filme passivo pode ser formado quando a superfície do eletrodo de metal está em contato com o ar, esse filme muito fino de óxido faz com que o eletrodo não sofra corrosão facilmente. Durante a eletrólise, na região próxima ao cátodo há excesso de OH^- , fazendo com que a superfície seja atacada por estes ânions e promovendo a formação de um filme passivo.

g) Inversão de polaridade

Com a inversão da polaridade o eletrodo que se comporta como cátodo por determinado tempo, passa a se comportar como ânodo após a inversão da polaridade. Essa inversão diminui a passivação, aumentando a vida útil do eletrodo em até duas vezes, e ao mesmo tempo diminuindo a resistividade do sistema. Sendo assim, a intensidade da corrente elétrica no reator não decai rapidamente e o eletrodo passa a liberar mais íons alumínio e/ou ferro na solução e a formar maior quantidade de grupos hidroxila, aumentando o pH e a eficiência de remoção dos poluentes (MOLLAH, *et al.*, 2001).

2.6.3 Principais Vantagens e Desvantagens da Eletrofloculação

As principais vantagens da técnica de eletrofloculação são descritas a seguir (MOLLAH *et al.*, 2001):

- Os equipamentos utilizados são simples e de fácil operação, onde a corrente e o potencial aplicado podem ser medidos e controlados de maneira automatizada;
- Em comparação aos processos físico-químicos convencionais na eletrofloculação há um maior controle na liberação do agente coagulante;
- Limita o uso de substâncias químicas, diminuindo o impacto causado ao meio quando dispostos;
- As bolhas de gás produzidas na eletrólise levam o contaminante ao topo do reator, onde pode ser removido com facilidade;
- A célula eletrolítica é controlada eletricamente, não necessitando de dispositivos adicionais, o que requer menos manutenção;
- Remoção de óleos e graxas devido a facilidade de coagulação e flotação das moléculas desses compostos.

Crespilho & Rezende (2004), destacam ainda outras vantagens da utilização desta técnica:

- Remove as partículas menores, pois o campo elétrico aplicado promove um contato mais rápido entre elas, o que facilita a coagulação;

- Essa técnica pode ser aplicada também em áreas rurais onde a eletricidade não é disponível, desde que um painel solar seja acoplado à unidade;
- Variando a densidade de corrente dá-se a possibilidade de variar concentração do gás no meio, aumentando a colisão das bolhas.

Os processos eletrolíticos apresentam porém, algumas desvantagens como:

- Há a necessidade de substituição dos eletrodos regularmente, quando sofram desgaste;
- O consumo de energia elétrica pode ser dispendioso em algumas regiões;
- Um filme de óxido impermeável pode ser formado no cátodo, conduzindo a perda de eficiência da unidade;
- Requer alta condutividade do efluente.

2.6.4 Aplicações da eletrofloculação para o tratamento de efluentes têxteis

O interesse em torno da eletrofloculação vem crescendo nos últimos anos, principalmente no que diz respeito à sua simplicidade de operação e aplicação em diversos tipos de efluentes. No entanto, o número reduzido de estações em funcionamento, torna-se um obstáculo natural à sua consequente disseminação (CERQUEIRA, 2009). Dentre a ampla gama de aplicações do processo de eletrofloculação os principais estudos realizados avaliam a remoção de matéria orgânica e material coloidal (HOLT *et al.*, 2002; YILDIZ *et al.*, 2008; SUN *et al.*, 2009) e o tratamento de águas residuais (EMAMJOMEH & SIVAKUMAR, 2009).

O estudo da viabilidade técnica da aplicação do processo eletrolítico para a remoção da cor a partir de soluções sintéticas de corantes têxteis sulfurosos foi avaliada utilizando eletrodos de aço carbono e alumínio. A remoção foi de aproximadamente 97% para a solução de corante castanho e de 99% para a solução de corante azul com eletrodos de aço, enquanto com eletrodos de alumínio, a remoção de cor foi menor que 96%. Os resultados obtidos indicaram que o processo eletrolítico, nas condições operacionais estudadas, é uma alternativa viável

para a remoção de cor relacionada com corantes sulfurosos (SILVA, WILL & FILHO, 2000).

Na aplicação da técnica de eletrofloculação para o tratamento de efluente têxtil utilizando eletrodos de ferro e/ou alumínio em célula eletrolítica, foram avaliados os parâmetros natureza e distância do eletrodo, variação de pH, potencial elétrico aplicado e tempo de reação sobre a eficiência do processo. Os resultados obtidos indicaram que o processo de eletrofloculação nas condições operacionais estudadas é uma técnica viável para a remoção de DQO, cor e turbidez, a qual foi respectivamente de 87%, 95% e 100% (CERQUEIRA, 2006).

A descoloração da solução do corante laranja II utilizando o método da eletrofloculação foi estudada. Os resultados experimentais revelaram que a remoção de cor da fase aquosa foi de 98% com uma remoção 84% de DQO utilizando eletrodo de ferro (DANESHVAR *et al.*, 2006).

Floss & Callegaro (2011) aplicaram a técnica de eletrofloculação utilizando eletrodos de sacrifício de ferro para o tratamento de efluente têxtil. Avaliou-se a eficiência de remoção dos parâmetros cor e turbidez sob diferentes condições de pH, intensidade de corrente elétrica e tempo de reação. Os resultados se mostraram viáveis para a aplicação da técnica de eletrofloculação no tratamento de efluentes têxteis, obtendo uma remoção de 68,9% para a turbidez e 69,05% para a cor. Com resultados semelhantes, Cerqueira & Marques (2011), utilizaram eletrodos com 4 placas de alumínio intercaladas e separadas por espaçadores de diferentes tamanhos, em água oleosa sintética. Obtiveram 99% de remoção de cor e 99% de remoção da turbidez.

A problemática do tratamento de efluentes têxteis vem sendo objeto de estudo de várias pesquisas, entretanto, o que se observa é a busca por eficiência de tratamento, sem grandes preocupações com os insumos requeridos para alcançar tal objetivo, como produtos químicos, e ainda, com os resíduos gerados pelo próprio sistema de tratamento.

Neste contexto, o uso de tecnologias mais limpas de tratamento, como a eletrofloculação e coagulante natural a base de Moringa Oleífera, podem se tornar uma interessante alternativa, sendo que tais tecnologias podem ser conciliadas de modo a assegurar eficiência de tratamento a economia de insumos, uma vez que quando aplicadas em conjunto, podem ser empregadas condições operacionais mais brandas.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Realizar o tratamento de efluente têxtil por meio de um sistema híbrido (eletrofloculação conciliada à adição de coagulante natural à base de Moringa oleífera).

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obter os limiares das condições operacionais do sistema de tratamento híbrido de efluente têxtil, em batelada;
- Implementar, em escala laboratorial, um sistema em fluxo contínuo, de tratamento híbrido de efluente têxtil;
- Otimizar as condições de obtenção do extrato aquoso de Moringa oleífera;
- Otimizar condições operacionais do sistema de tratamento híbrido de efluente têxtil, em fluxo contínuo.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 METODOLOGIA ANALÍTICA

As soluções de corantes utilizadas foram preparadas a partir do corante comercial Reativo Azul 5G. A determinação da concentração do corante nas amostras foi realizada no Espectrofotômetro de absorção molecular UV-Vis de varredura com feixe duplo, marca PerkinElmer, modelo Lambda 45. O fundamento desta técnica é a absorção de radiação eletromagnética na região do visível por parte dos compostos coloridos de interesse.

A determinação do comprimento de onda no qual o composto a ser quantificado absorve o máximo de radiação é feito mediante uma varredura ao longo da faixa espectral de interesse.

4.2 TRATAMENTO POR ELETROFLOCULAÇÃO ASSOCIADA A ADIÇÃO DO COAGULANTE NATURAL A BASE DE MORINGA OLEÍFERA (SISTEMA EM BATELADA)

Neste item serão apresentados os procedimentos empregados nos ensaios para o tratamento do efluente têxtil sintético em batelada. Inicialmente realizou-se o tratamento exclusivamente por eletrofloculação, depois otimizou-se a metodologia de preparo do extrato de Moringa oleífera, sendo na sequência realizado o tratamento híbrido, conciliando as duas tecnologias.

4.2.1 Preparação da Solução de Corante Reativo Azul 5G

Para a realização dos experimentos, foram preparadas soluções do corante reativo Azul 5G com uma concentração de 50 mg.L⁻¹, obtida pela dissolução em água destilada.

4.2.2 Tratamento por Eletrofloculação

Soluções aquosas de mesma concentração inicial de corante reativo Azul 5G (50 mg.L⁻¹) foram preparadas para posterior tratamento por eletrofloculação. O procedimento experimental consistiu em ensaios de eletrofloculação em batelada, sendo o sistema composto por um béquer de 1L, agitador magnético, fonte de corrente contínua e os eletrodos de sacrifício de ferro, de dimensões: 100 mm de comprimento, 50 mm de largura e espessura aproximada de 0,6 mm. Para cada teste foi utilizado 500 mL de solução de corante reativo azul 5G. O par de eletrodos foi separado por uma distância aproximada de 1 cm, e a área efetivamente utilizada para a eletrofloculação de $2,5 \times 10^{-3} \text{ m}^2$.

Antes de realizar a eletrólise o pH foi ajustado de acordo com a matriz do delineamento experimental (Tabela 1), sendo utilizadas soluções de hidróxido de sódio e ácido clorídrico conforme necessário. Manteve-se fixa a condutividade elétrica da solução em $4,23 \pm 0,45 \text{ mS.cm}^{-1}$ mediante a adição de 1 g de cloreto de sódio à solução do corante. Após o tratamento, deixou-se estabilizar amostras por 10 minutos e em seguida realizou-se a medida da absorbância. Para uma melhor visualização na Figura 8 é apresentado o módulo experimental para o sistema em batelada.

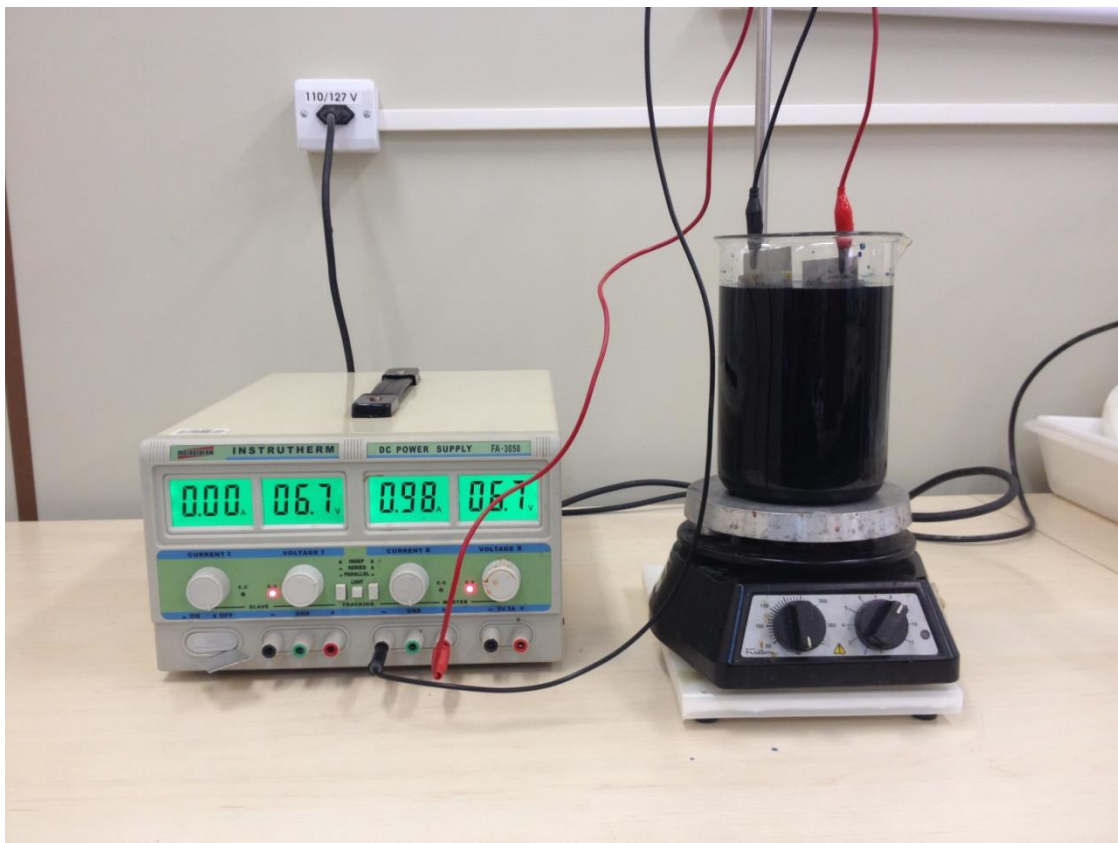


Figura 8 - Módulo experimental para o tratamento do efluente têxtil por eletrofloculação (sistema em batelada)

4.2.3 Planejamento Experimental para Aplicação da Eletrofloculação Visando a Remoção de Corante Reativo Azul 5G de Efluente Têxtil Sintético

Por meio de um Delineamento Composto Central Rotacional – DCCR avaliou-se a influência das seguintes variáveis: diferença de potencial (ddp) aplicada nos eletrodos de sacrifício, pH inicial do efluente a ser tratado e tempo de retenção hidráulica. A variável-resposta foi a remoção percentual de cor, parâmetro físico-químico de qualidade do efluente sintético. Para avaliar a cor utilizou-se a absorvância, no comprimento de onda de 618 nm, definido como ideal em espectro de absorção do corante Azul Reativo 5G.

De acordo com o planejamento experimental DCCR, foram executados 2³ ensaios fatoriais, somados a três repetições no ponto central e seis ensaios nos pontos axiais, totalizando-se 17 ensaios, que foram feitos em triplicata. Os valores

reais, correspondentes à faixa de estudo das variáveis foram determinados por testes preliminares e são apresentados na Tabela 1:

Tabela 1 - Valores reais correspondentes aos codificado

	-1,68	-1	0	1	+1,68
pH	4	5,2	7	8,8	10
Tempo (min)	10	14	20	26	30
ddp (V)	5	8	12,5	17	20

A partir deste planejamento experimental foram realizados os ensaios de eletrofloculação em batelada.

4.2.4 Preparo do Extrato Aquoso de Sementes de Moringa oleífera

Foram utilizadas sementes de Moringa oleífera (MO) procedente do município de Medianeira - PR e de Marechal Cândido Rondon - PR, as quais foram selecionadas conforme uniformidade, tamanho e coloração.

Inicialmente removeram-se as cascas das sementes de MO e em seguida elas foram maceradas manualmente em um gral com pistilo, de forma que um material homogêneo fosse obtido. Utilizou-se esta torta produzida para o preparo da solução coagulante na proporção de 5g de MO para 100 mL de solução salina (concentrações de NaCl de acordo com a matriz do delineamento experimental – Tabela 2). Em seguida essa solução foi colocada por 20 segundos em agitação no ultrassom, em uma frequência de 80 kHz e 100 % de potência, com a finalidade de extrair o princípio ativo da semente de MO. Ao término do tempo de extração a solução foi submetida a uma filtração a vácuo com o uso de papel filtro de poro 3 micras. Encerrando esse procedimento a solução pode ser utilizada nos ensaios de coagulação/floculação, apresentando uma razão de MO de 50.000 mg.L⁻¹ (solução matriz do coagulante).

4.2.5 Preparação da Água Turva Sintética Para Ensaios de Coagulação/Floculação

Para os ensaios de coagulação/floculação foi preparada uma solução de água turva sintética a fim de poder comparar os resultados obtidos com outros trabalhos que utilizaram argila simulando um efluente com turbidez moderada. Além disso, por se tratar de um corante de difícil remoção, a utilização somente da amostra aquosa com o corante reativo Azul 5G poderia mascarar os resultados da ação do coagulante natural.

A água turva sintética utilizada para os testes de coagulação/floculação foi preparada adicionando-se 10g de Kaolin (Argila Branca) em um litro de água destilada. A solução foi agitada para dispersão das partículas e em seguida permaneceu por 1 hora em decantação. Amostras do material sobrenadante foram retiradas após a decantação para utilizar como água turva sintética padronizada nos testes de coagulação/floculação (Água Bruta).

4.2.6 Ensaios de Coagulação/Floculação

Um Jar Test foi utilizado para a realização dos ensaios de Coagulação/Floculação. Colocou-se a água turva sintética em béqueres de 500 mL e para cada teste foram adicionadas diferentes concentrações do coagulante natural, definidas através do planejamento experimental, definidas através do planejamento experimental (Tabela 2). As amostras foram agitadas a 250 RPM para um tempo de mistura rápida de 1 minuto e em seguida 30 RPM para um tempo de mistura lenta de 20 minutos. Após sedimentação de 1 hora, uma alíquota de 5 mL foi amostrada do material sobrenadante para análises de turbidez. Não foi necessário o ajuste de pH pois a faixa de atuação do coagulante a base de MO é bem ampla. Também foram realizados 5 ensaios em branco, em triplicata, somente com a água turva sintética sem adição de coagulante.

4.2.7 Planejamento Experimental para Otimização das Condições de Obtenção e Utilização do Extrato Aquoso de Moringa oleífera

Utilizou-se como estratégia de Planejamento Experimental o Delineamento Composto Central Rotacional – DCCR, tendo como fatores estudados: a concentração de cloreto de sódio (percentual em massa) adicionada a solução extratora, tempo de extração e concentração do coagulante adicionada a água turva sintética padronizada. A variável-resposta empregada foi a remoção percentual de turbidez.

De acordo com o planejamento experimental DCCR, foram executados 2³ ensaios fatoriais, somados a quatro repetições no ponto central e seis ensaios nos pontos axiais, totalizando-se 18 ensaios, que foram feitos em triplicata. Os valores reais, correspondentes à faixa de estudo das variáveis foram determinados por testes preliminares e são apresentados na Tabela 2:

Tabela 2 – Valores reais correspondentes aos codificados					
	-1,68	-1	0	1	+1,68
NaCl (%)	0	4,05	10	15,95	20
M.O (mg L ⁻¹)	25	60,4	112,5	164,6	200
Tempo (s)	20	40,2	70	99,8	120

4.2.8 Ensaios de Eletrofloculação Associados à Adição de Coagulante Natural a Base de Moringa oleífera

Após os ensaios de eletrofloculação e a preparação do extrato de Moringa oleífera aliados aos testes de coagulação/floculação, obteve-se os resultados das melhores condições a partir do planejamento experimental aplicado. Com estes resultados, foram realizados ensaios com a associação das duas técnicas citadas, ou seja, eletrofloculação com adição de coagulante natural de Moringa oleífera que foram realizadas em batelada.

4.2.9 Planejamento Experimental Aplicação da Eletrofloculação Associada a Adição de Coagulante Natural a Base de Moringa oleífera em Solução Aquosa de Corante Azul Reativo Azul 5G

O procedimento experimental consistiu em ensaios de eletrofloculação em batelada associado à adição de diferentes concentrações de coagulante natural de Moringa oleífera. O procedimento utilizado para os ensaios da eletrofloculação seguiu conforme descrito no item 4.2.2.

4.2.9.1 Primeiro DCCR (análise dos fatores: intensidade de corrente elétrica, tempo de eletrofloculação e concentração de coagulante a base de moringa oleífera)

Utilizou-se como estratégia de Planejamento Experimental o Delineamento Composto Central Rotacional – DCCR, tendo como fatores estudados: intensidade de corrente elétrica (I) aplicada nos eletrodos de sacrifício, tempo de eletrofloculação e concentração do coagulante adicionada à solução aquosa de corante reativo azul 5G. A variável-resposta empregada foi a remoção percentual de cor.

De acordo com o planejamento experimental DCCR, foram executados 2³ ensaios fatoriais, somados a quatro repetições no ponto central e seis ensaios nos pontos axiais, totalizando-se 18 ensaios, que foram feitos em duplicata. Os valores reais, correspondentes à faixa de estudo das variáveis foram determinados por testes preliminares, conforme podem ser observados na Tabela 3:

Tabela 3 - Valores reais correspondentes aos codificados					
	-1,68	-1	0	1	+1,68
I (A)	0,25	0,70	1,38	2,04	2,50
M.O (mg L ⁻¹)	1000	1809	3000	4190	5000
Tempo (min)	5	7	10	13	15

4.2.9.2 Segundo DCCR (análise dos fatores: intensidade de corrente elétrica e concentração de coagulante a base de moringa oleífera, ambos com faixas de estudo mais restritas)

Por meio de um Delineamento Composto Central Rotacional – DCCR avaliou-se a influência das seguintes variáveis: Intensidade de corrente elétrica (I) aplicada nos eletrodos de sacrifício e concentração do coagulante adicionada à solução aquosa de corante reativo azul 5G. A variável-resposta foi a remoção percentual de cor, parâmetro físico-químico de qualidade do efluente sintético.

De acordo com o planejamento experimental DCCR, foram executados 2² ensaios fatoriais, somados a quatro repetições no ponto central e quatro ensaios nos pontos axiais, totalizando-se 12 ensaios, que foram feitos em duplicata. Os valores reais, correspondentes à faixa de estudo das variáveis foram determinados a partir do Primeiro DCCR, conforme podem ser observados na Tabela 4. Fixou-se o tempo de reação para os ensaios em 5 minutos.

Tabela 4 - Valores reais correspondentes aos codificados

	-1,41	-1	0	1	+1,41
I (A)	0,10	0,30	0,80	1,30	1,50
M.O (mg L ⁻¹)	250	504,4	1125	1745,6	2000

4.3 TRATAMENTO POR ELETROFLOCULAÇÃO ASSOCIADA A ADIÇÃO DO COAGULANTE NATURAL A BASE DE MORINGA OLEÍFERA (SISTEMA EM FLUXO CONTÍNUO)

Soluções aquosas de mesma concentração inicial de corante reativo Azul 5G (50 mg.L⁻¹) foram preparadas para posterior tratamento por eletrofloculação com a adição de extrato de Moringa oleífera (a qual preparada conforme descrita no item 4.2.4) em fluxo de escoamento contínuo.

4.3.1 Planejamento Experimental Aplicação da Eletrofloculação Associada a Adição de Coagulante Natural a Base de Moringa oleífera em Solução Aquosa de Corante Reativo Azul 5G em Fluxo de Escoamento Contínuo

A partir dos resultados obtidos com os testes preliminares e os planejamentos experimentais executados, pretendeu-se avaliar o sistema de tratamento de efluente têxtil operando em regime de escoamento contínuo, empregando-se a tecnologia de eletrofloculação na forma de um arranjo híbrido com a utilização do extrato aquoso de sementes de Moringa oleífera.

Por meio de um Delineamento Composto Central Rotacional – DCCR avaliou-se a influência das seguintes variáveis: Intensidade de corrente elétrica (I) aplicada nos eletrodos de sacrifício, concentração do coagulante de Moringa oleífera adicionada à solução aquosa de corante reativo azul 5G e tempo de retenção hidráulica. As variáveis-resposta foram a remoção percentual de cor, parâmetro físico-químico de qualidade do efluente sintético e a concentração de ferro residual.

De acordo com o planejamento experimental DCCR, foram executados 2³ ensaios fatoriais, somados a três repetições no ponto central e seis ensaios nos pontos axiais, totalizando-se 17 ensaios, que foram realizados em duplicata. Os valores reais, correspondentes à faixa de estudo das variáveis foram determinados por testes preliminares, conforme podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5 - Valores reais correspondentes aos codificados					
	-1,68	-1	0	1	+1,68
I (A)	0,10	0,28	0,55	0,82	1,00
M.O (mg L ⁻¹)	100	282,1	550	817,9	1000
TRH (min)	5	6	7,5	9	10

4.3.2 Construção e Funcionamento do Módulo Experimental para o Tratamento de Efluente Têxtil, em Regime de Escoamento Contínuo

Na Figura 9 pode ser observado o sistema de tratamento de efluente têxtil sintético de corante reativo azul 5G operando em regime de escoamento contínuo, empregando-se a tecnologia de eletrofloculação na forma de um arranjo híbrido com a utilização do extrato aquoso de sementes de Moringa oleífera.

Na câmara “a” o efluente têxtil sintético (preparado conforme item 4.2.1) foi depositado e na sequência realizou-se a etapa de mistura do coagulante a base de Moringa oleífera. Este efluente é então bombeado para a câmara eletrolítica “b”, em seguida se depara com os eletrodos de sacrifício de ferro, que possui duas finalidades: a viabilização da eletrofloculação, fornecendo íons Fe^{3+} ao efluente e também atuando como chicanas que auxiliam na hidráulica do sistema. Por fim, o efluente tratado passa para câmara “c”, onde o mesmo é coletado.

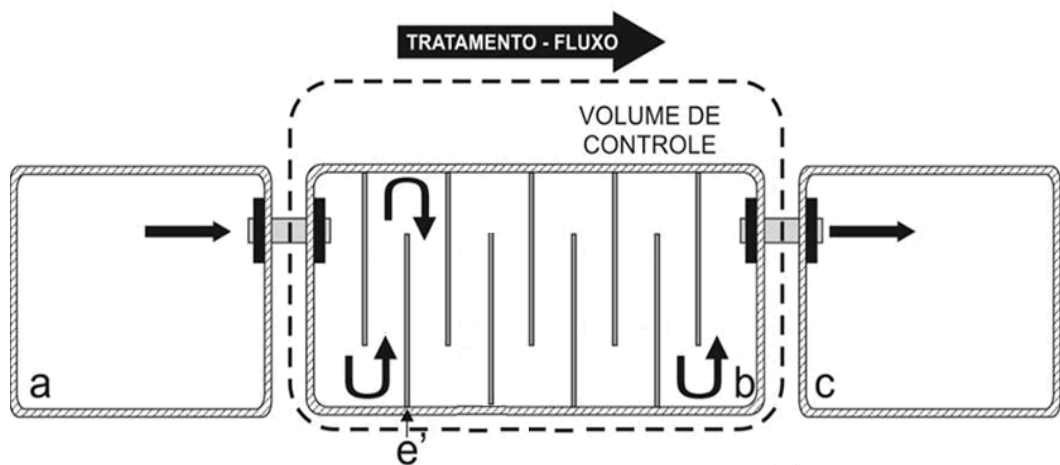


Figura 9 - Representação esquemática do módulo de eletrofloculação

Conforme pode ser observado na Figura 10, o efluente sintético bruto foi preparado em um barrilete com capacidade para 20 L. Um motor de 12 volts foi instalado neste barrilete para realizar a agitação do coagulante natural. Na sequência o extrato aquoso de Moringa oleífera foi adicionado e permanecia por aproximadamente 3 minutos em agitação para completa homogeneização.



Figura 10 - Barrilete para agitação do coagulante natural de Moringa oleífera

Na Figura 11 observa-se a câmara eletrolítica onde o efluente têxtil sintético foi tratado. O sistema foi construído em vidro temperado e os eletrodos de ferro intercalados para distribuição da corrente elétrica aplicada e também para atuarem na hidráulica do sistema.

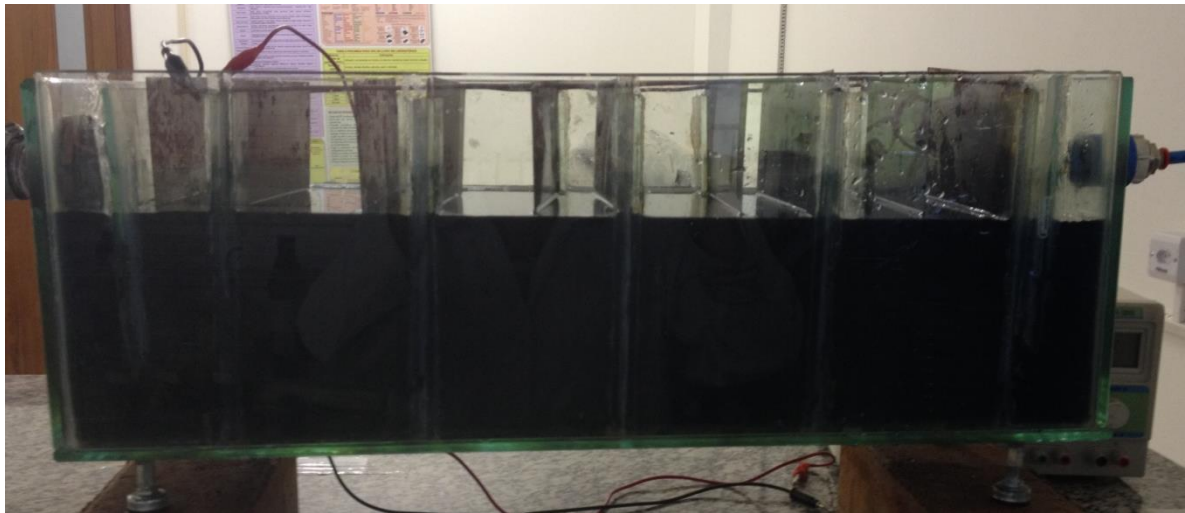


Figura 11 - Câmara eletrolítica para o tratamento do efluente têxtil sintético

Após o ensaio de eletrofloculação associado a adição do extrato aquoso de Moringa oleífera, amostras do efluente tratado foram coletadas em duplicata e ficaram 1 hora em decantação para posterior coleta do sobrenadante e análise de remoção de cor (espectrofotômetro) e ferro residual (absorção atômica).

4.3.3 Análise de Ferro Residual

A análise de Ferro Residual foi realizada com a finalidade de adequação a legislação ambiental para lançamento de efluentes, considerando que os eletrodos utilizados oxidam e liberam no efluente tratado parte deste ferro residual. A Resolução nº 430, de 13 de Maio de 2011, referente a lançamento de efluentes, dispõe que efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados, direta ou indiretamente, nos corpos de água, após o devido tratamento e desde que obedeçam às condições, padrões e exigências dispostos na mesma, e em outras normas aplicáveis. Para o lançamento de efluentes o teor máximo de ferro solúvel é de 15 mg.L^{-1} (GARRIDO, 2003).

Previamente às determinações analíticas de ferro residual procedeu-se o preparo das amostras. Para tanto, foram utilizados 50 mL do efluente tratado após 1 hora de decantação. Na sequência a amostra do efluente tratado foi colocada em erlenmeyer e adicionou-se 5 mL de ácido nítrico. Estas amostras permaneciam em manta térmica para redução do volume a 20 mL e foram transferidas para um balão volumétrico, depois foram completadas com água destilada até a marcação de 50 mL novamente. Após este procedimento todas as amostras foram etiquetadas e armazenadas para posterior análise de concentração residual de ferro.

As determinações das concentrações residuais de ferro foram realizadas através de espectrometria de absorção atômica de chama: método direto de chama ar-acetileno, a qual mede a radiação luminosa emitida por uma lâmpada que irradia o espectro do elemento a ser determinado. Essas análises seguiram as seguintes condições: vazão do acetileno = $2 \text{ (L.min}^{-1}\text{)}$; vazão do ar = $13,5 \text{ (L.min}^{-1}\text{)}$; corrente da lâmpada = 10 (mA); $\lambda = 248,3 \text{ (nm)}$ e fenda = 0,2 (nm). A diluição do padrão de ferro utilizado seguiu as seguintes concentrações: 0,5, 1, 2,5, 5 e 10 (g.L^{-1}).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 ESPECTRO DE VARREDURA DO CORANTE AZUL 5G

O comprimento de onda no qual a absorção do corante reativo azul 5G foi maior corresponde a 618nm, conforme se observa na Figura 12. A partir destes resultados os demais ensaios foram baseados no comprimento de onda de maior absorção.

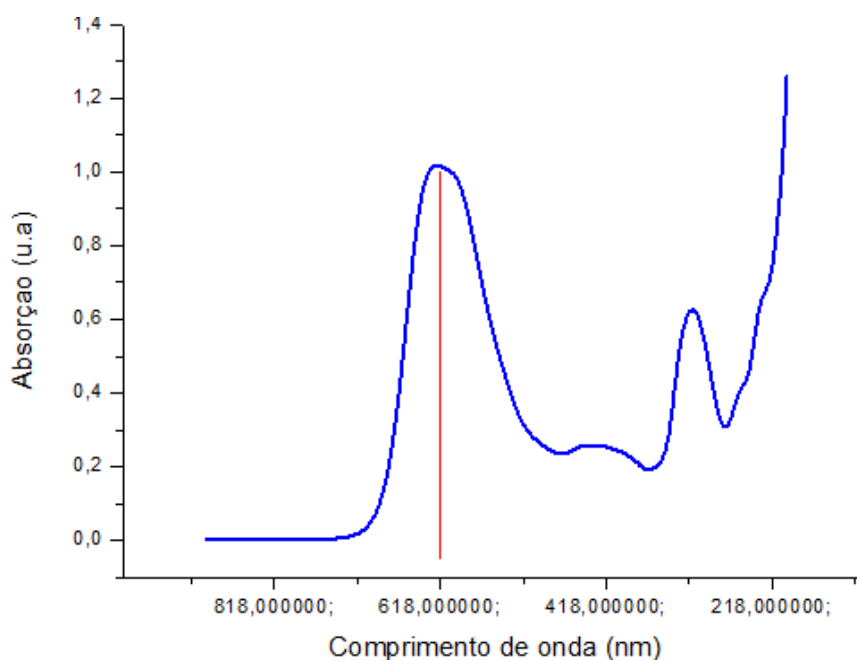


Figura 12 - Gráfico do Espectro de Varredura do Corante Azul 5G

5.2 APLICAÇÃO DA ELETROFLOCULAÇÃO PARA REMOÇÃO DO CORANTE REATIVO AZUL 5G EM BATELADA

Neste tópico foram abordados os resultados obtidos a partir da aplicação do sistema de tratamento de efluente têxtil sintético de corante reativo azul 5G operando em batelada, empregando-se a tecnologia de eletrofloculação.

Na Tabela 6 observam-se os valores da variável resposta cor após o tratamento da solução de corante. Através da absorbância da solução sem tratamento de cada ensaio foi possível calcular a eficiência de remoção da cor (%). Cabe salientar que os dados apresentados são valores médios, pois os testes foram realizados em duplicata.

Tabela 6 - Matriz do delineamento experimental e eficiência de remoção da cor (%)

	DDP (V)	TEMPO (min)	pH	EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DA COR (%)
1	8 (-1)	14 (-1)	5,2 (-1)	72,28±0,0042
2	17 (1)	14 (-1)	5,2 (-1)	64,38±0,0085
3	8 (-1)	26 (1)	5,2 (-1)	75,02±0,0071
4	17 (1)	26 (1)	5,2 (-1)	76,99±0,0085
5	8 (-1)	14 (-1)	8,8 (1)	86,73±0,0014
6	17 (1)	14 (-1)	8,8 (1)	90,87±0,0438
7	8 (-1)	26 (1)	8,8 (1)	90,13±0,0198
8	17 (1)	26 (1)	8,8 (1)	83,33±0,0163
9	12,5 (0)	20 (0)	7 (0)	82,55±0,0028
10	12,5 (0)	20 (0)	7 (0)	85,76±0,0085
11	12,5 (0)	20 (0)	7 (0)	89,66±0,0184
12	20 (1,68)	20 (0)	7 (0)	67,11±0,0940
13	5 (-1,68)	20 (0)	7 (0)	79,30±0,0028
14	12,5 (0)	30 (1,68)	7 (0)	87,37±0,0361
15	12,5 (0)	10 (-1,68)	7 (0)	89,58±0,0120
16	12,5 (0)	20 (0)	10 (1,68)	87,75±0,0233
17	12,5 (0)	20 (0)	4 (-1,68)	87,82±0,0537

Observa-se que a eficiência encontrada teve uma variação de 64,38% a 90,87% para a cor removida, e que o desvio-padrão das duplicatas se manteve baixo para todos os ensaios.

Na Figura 13 observa-se o Gráfico de Pareto para os parâmetros estudados. Este gráfico permite verificar o efeito de cada parâmetro, bem como quais termos são estatisticamente significativos. Pela análise da figura é possível verificar que, considerando o intervalo de confiança de 95%, somente o termo quadrático da diferença de potencial (ddp) e o termo linear do pH se mostraram significativos na remoção da cor do corante reativo azul 5G. Optou-se por reduzir o número de termos do modelo, mantendo-se os termos significativos, além do termo linear da

ddp. A soma dos quadrados dos termos excluídos do modelo foi incorporada ao resíduo.

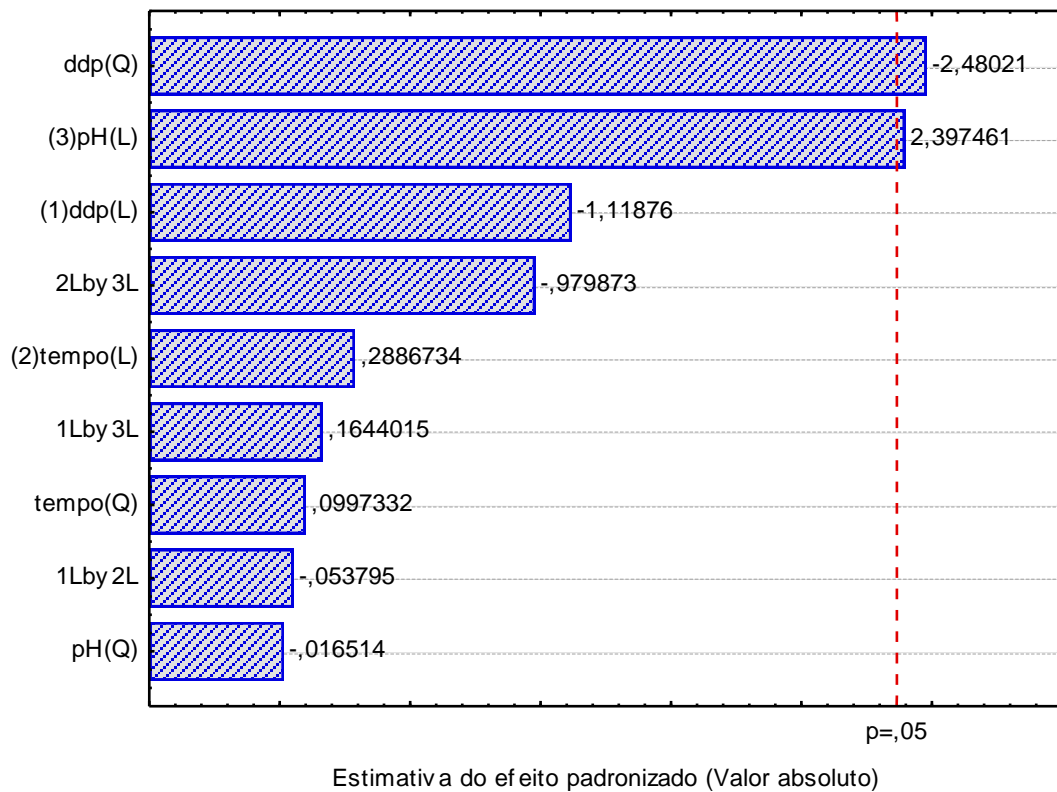


Figura 13 – Diagrama de Pareto para o processo de remoção da cor, com 95% de confiança

Através dos resultados obtidos foram calculados os coeficientes de regressão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 - Coeficientes de regressão

	EFEITOS	COEFICIENTES DE REGRESSÃO	ERRO PADRÃO	P - VALOR
Média		86,36138837	1,826451022	6,17632E-16
ddp	-4,259692756	-2,129846378	1,501409778	0,179552865
l(ddp^2)	-10,48304561	-5,241522807	1,53937366	0,004697245
pH	9,128402363	4,564201181	1,501409778	0,009481676

Para realização do teste F e conseqüente avaliação da validade do modelo é necessário a análise de variância (ANOVA) para a resposta remoção de cor, conforme pode ser observada na Tabela 8. Este modelo de análise é o mais utilizado para se avaliar numericamente a qualidade do ajuste de um modelo, fazendo um exame dos resíduos.

Tabela 8 - Análise de variância para a resposta remoção de cor (intervalo de confiança de 95%)

Tabela FONTE DE VARIÇÃO	SQ ^A	GL ^B	QM ^C	F _{CALCULADO}	P-VALOR
Regressão	702,753	3	234,251	7,616	0,0034
Resíduos	399,861	13	30,759		
Total	1102,614	16			

% variação explicada (R^2) = 63,73% $F_{3; 13; 0,05} = 3,41^a$ = soma de quadrados; ^b = graus de liberdade; ^c = quadrados médios.

De acordo com a Tabela 8 o valor de Fcalculado é maior que o Ftabelado determinando a validade do modelo a 95% de confiança, o que também pode ser observado pelo fato do p-valor ser menor que 0,05.

A partir do modelo, foi possível gerar os gráficos de superfície de resposta e curvas de contorno para a variável remoção da cor. Nas Figuras 14 e 15 observa-se o gráfico da resposta em função das variáveis pH inicial e diferença de potencial (ddp), que foram considerados significativos, fixando a variável tempo no valor inferior da faixa de estudo, ou seja, 10 min (-1,68).

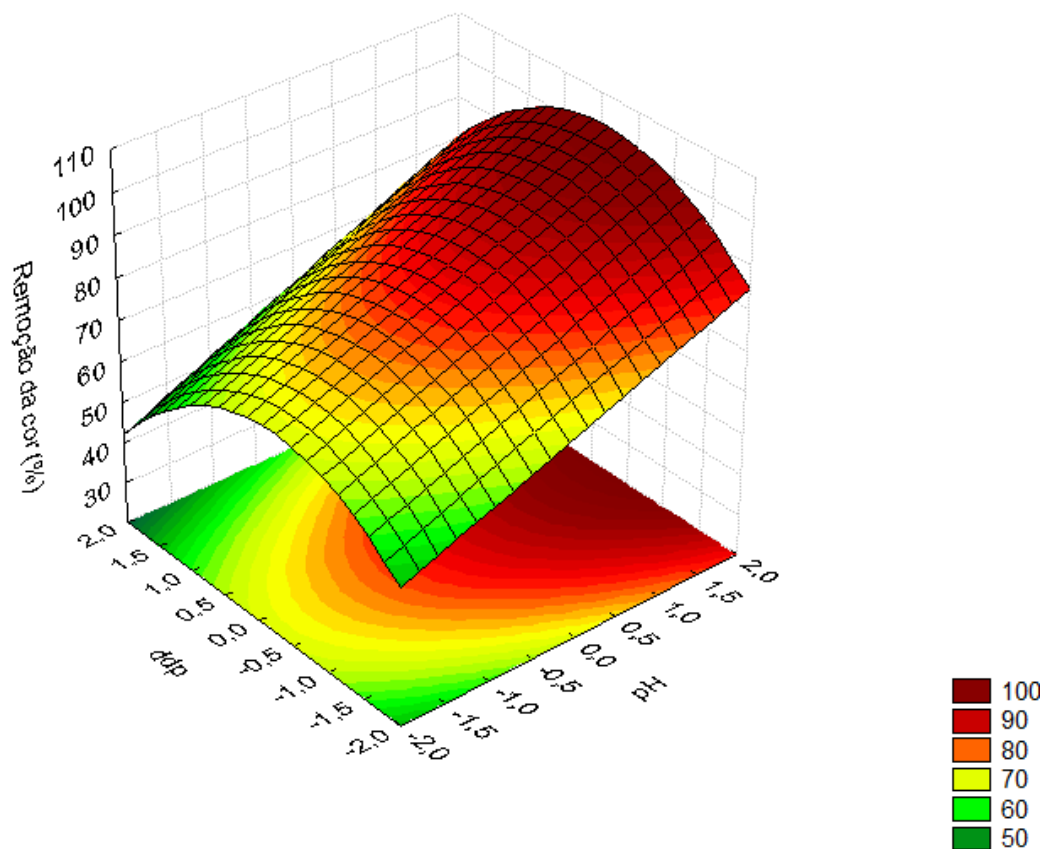


Figura 14 - Gráfico de superfície de resposta para o parâmetro remoção da cor (%), em função do pH e da ddp

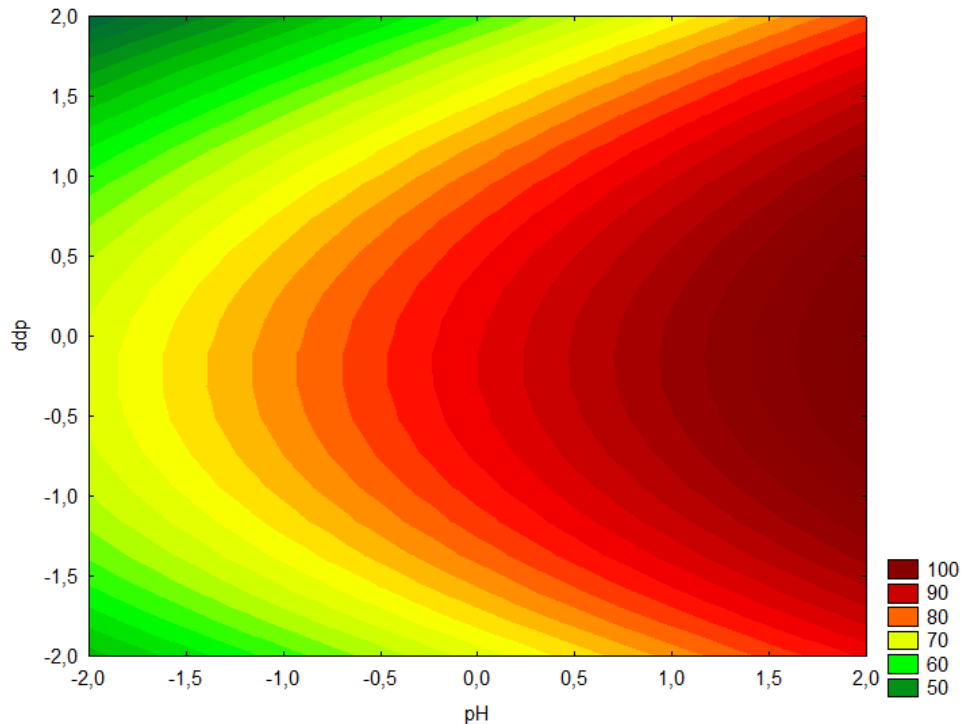


Figura 15 - Gráfico de curvas de contorno para o parâmetro remoção da cor (%), em função do pH e da ddp

O gráfico aponta uma região ótima para a diferença de potencial (ddp), de aproximadamente -0,5 a 0,5 em valores codificados, e uma tendência crescente para o pH, chegando a atingir 100% de remoção. Porém, na prática, tais resultados são inviáveis, uma vez que não é possível se trabalhar com um pH inicial muito alto, pois a eletrofloculação é um processo que já eleva o pH do efluente final, devido à dissociação da água em OH^- e H^+ , o qual volatiliza. Assim, ao se partir de um pH inicial alto, obter-se-ia um efluente final com pH muito elevado, e portanto passível de prejudicar a qualidade ambiental, o que não é o objetivo do trabalho.

Assim, para os fins de encontrar a região ótima para a diferença de potencial, optou-se por trabalhar com o gráfico da superfície de resposta para a remoção de cor, em função da ddp e do tempo de retenção, mantendo-se o pH fixo no ponto central, 7 (0), por ser um valor razoável e prático de se atingir. O gráfico pode ser observado na Figura 16.

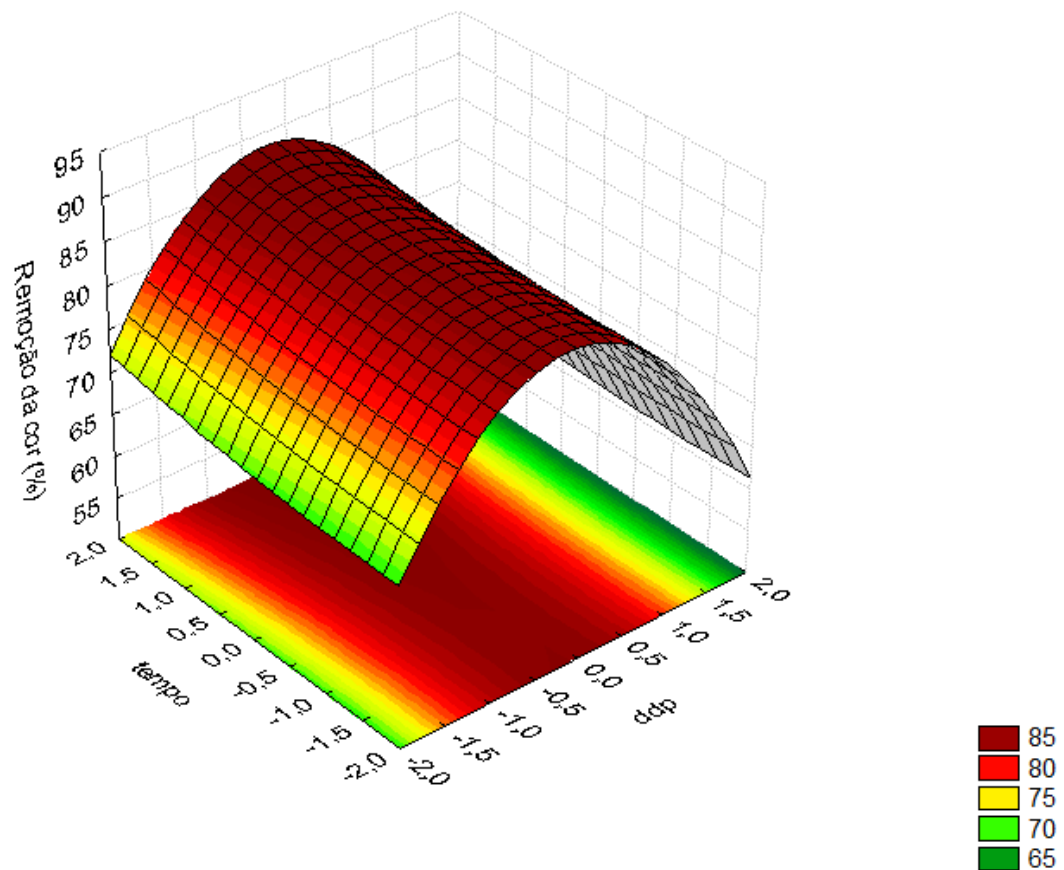


Figura 16 - Gráfico de superfície de resposta para o parâmetro remoção da cor (%), em função do tempo e da ddp para o pH 7

Neste gráfico, é possível perceber que de fato, o tempo não é significativo, uma vez que as faixas de remoção independem do valor do tempo. Nesse caso, porém, é possível identificar uma região ótima para a ddp, que corresponde à faixa de -0,6 a 0,2 em valores codificados e de 9,8 a 13,5 V em valores reais, para a qual se obtém um valor de remoção de 85%.

A validação das condições experimentais foi realizada nas condições ótimas encontradas através do modelo para as variáveis significativas. Para a diferença de potencial (ddp), derivando-se o modelo em função dessa variável e igualando-o a zero obteve-se o valor real de 11,6 V, o que corresponde à condição otimizada para o parâmetro. Para o pH inicial, porém, não foi possível obter a condição, uma vez que o termo relativo ao pH no modelo era linear. Assim, para a validação o pH inicial foi fixado no ponto central, 7 (valor real). O termo tempo de retenção, por não ser significativo, também foi fixado, porém no valor inferior da faixa de estudos, ou seja, 10 minutos (valor real). Com essas condições, o valor de remoção de cor predito

pelo modelo é de 86,58%. Foram realizados cinco testes em duplicata nas condições mencionadas, e as médias dos resultados encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9 - Resultados validação das condições experimentais

ENSAIO	ABSORBÂNCIA BRUTO	MÉDIA ABSORBÂNCIA TRATADO	REMOÇÃO DA COR (%)
1	1,325	0,168	87,35
2	1,339	0,123	90,81
3	1,343	0,198	85,26
4	1,284	0,121	90,55
5	1,350	0,120	91,09
Média			89,01

Pode-se observar que os valores de remoção encontrados nos ensaios de validação variaram de 85,26 a 91,09%, valores muito próximos do predito pelo modelo. Além disso, o erro percentual médio entre o valor predito pelo modelo para as condições ótimas e o valor observado nos ensaios de validação ficou em 2,73%, valor considerado satisfatório. Dessa forma, comprovou-se a validade do modelo para as condições experimentais.

5.3 OTIMIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE OBTENÇÃO E UTILIZAÇÃO DO EXTRATO AQUOSO DE MORINGA OLEÍFERA

Neste tópico serão abordados os resultados obtidos a partir da otimização das condições para obtenção do extrato aquoso de Moringa oleífera.

Na Tabela 10 observa-se os valores codificados dos 18 ensaios, e na Tabela 11 observam-se os 3 ensaios do branco, com os respectivos percentuais de remoção da turbidez. Através da turbidez bruta de cada ensaio, foi possível calcular a eficiência de remoção da turbidez (%). Cabe salientar que os dados apresentados são valores médios, pois os 18 ensaios foram realizados em triplicata e os 3 ensaios

do branco em quintuplicata. A turbidez média da água bruta sintética utilizada nos testes ficou em torno de $226,0 \pm 62,4$ NTU.

Tabela 10 - Matriz do delineamento experimental e resultado de remoção da turbidez (%)

ENSAIO	NaCl (%)	MO (mg L ⁻¹)	TEMPO (s)	REMOÇÃO TURBIDEZ (%)
1	4,05 (-1)	164,6 (1)	99,8 (1)	85,22±5,6376
2	15,95 (1)	164,6 (1)	99,8 (1)	80,38±4,5651
3	4,05 (-1)	60,4 (-1)	99,8 (1)	88,36±4,2139
4	15,95 (1)	60,4 (-1)	99,8 (1)	75,40±8,9497
5	4,05 (-1)	164,6 (1)	40,2 (-1)	86,90±1,9899
6	15,95 (1)	164,6 (1)	40,2 (-1)	89,11±2,5277
7	4,05 (-1)	60,4 (-1)	40,2 (-1)	84,83±1,1596
8	15,95 (1)	60,4 (-1)	40,2 (-1)	90,95±1,1280
9	10 (0)	112,5 (0)	70 (0)	67,77±4,2941
10	10 (0)	112,5 (0)	70 (0)	55,68±7,6579
11	10 (0)	112,5 (0)	70 (0)	74,25±2,7561
12	10 (0)	112,5 (0)	70 (0)	70,79±3,5506
13	20 (1,68)	112,5 (0)	70 (0)	72,97±3,5874
14	0 (-1,68)	112,5 (0)	70 (0)	56,00±4,5263
15	10 (0)	200 (1,68)	70 (0)	80,04±2,8528
16	10 (0)	25 (-1,68)	70 (0)	76,56±2,4207
17	10 (0)	112,5 (0)	120 (1,68)	82,10±3,5130
18	10 (0)	112,5 (0)	20 (-1,68)	83,02±1,9015

Tabela 11 - Remoção da turbidez (%) ensaios do Branco

ENSAIO	REMOÇÃO DA TURBIDEZ (%)
1	77,27±3,6700
2	74,87±6,0848
3	78,57±6,0966

Estes ensaios são considerados como branco, pois avalia-se a remoção da turbidez sem a adição de coagulante. Eles foram realizados com o intuito de verificar a real remoção da turbidez através da ação do coagulante natural de Moringa oleífera, visto que este é um corante de difícil remoção, então para que os dados não fossem mascarados foram assim realizados.

De acordo com as Tabelas 10 e 11, é possível observar que a remoção da turbidez final variou de 55,68% a 90,95%, já o valor médio da remoção dos ensaios em branco ficou em 75,23%, o que reforça a eficiência do coagulante para algumas amostras.

Através dos resultados obtidos foram calculados os coeficientes de regressão observados na Tabela 12. Apenas os termos quadráticos da Moringa Oleífera e do tempo foram significativos.

Tabela 12 - Coeficientes de regressão

	EFEITOS	COEFICIENTES DE REGRESSÃO	ERRO PADRÃO	P - VALOR
Média		66,64793732	4,514205524	4,35718E-07
NaCl	2,793153588	1,396576794	2,448007498	0,584005337
I(NaCl ²)	2,27330449	1,136652245	2,546283888	0,667146694
MO	1,160945282	0,580472641	2,448007498	0,818522683
I(MO ²)	12,06107826	6,030539131	2,546283888	0,045361774
tempo	-3,512851089	-1,756425544	2,448007498	0,493485581
I(tempo ²)	15,08025421	7,540127106	2,546283888	0,0181122
NaCl:MO	1,054028551	0,527014276	3,197064053	0,873156526
NaCl:tempo	-6,537838035	-3,268919018	3,197064053	0,336477184
MO:tempo	0,402155172	0,201077586	3,197064053	0,951393604

Conforme se observa na Tabela 13 e Figura 17, no modelo reduzido para os coeficientes de regressão, os termos quadráticos da Moringa oleífera e do tempo foram estatisticamente significativos ao nível de significância de 5% ($p < 0,05$).

Tabela 13 - Coeficientes de regressão para a remoção da cor (%), modelo reduzido

	EFEITOS	COEFICIENTES DE REGRESSÃO	ERRO PADRÃO	P - VALOR
Média		67,86867965	2,957702268	4,27073E-13
I(MO ²)	11,58734692	5,793673461	2,050836014	0,012796436
I(tempo ²)	14,60652287	7,303261436	2,050836014	0,002843651

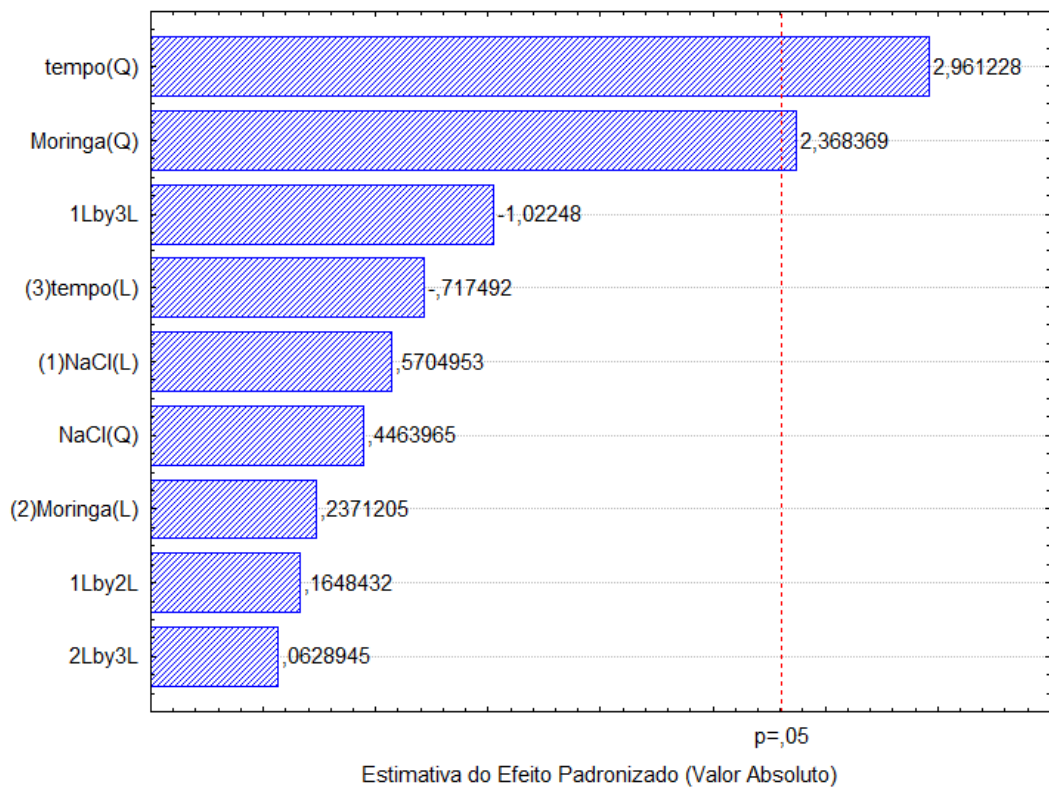


Figura 17 - Diagrama de Pareto para o processo de remoção da turbidez, com 95% de confiança

Para realização do teste F e avaliação da validade do modelo é necessário a análise de variância, conforme pode ser observada na Tabela 14.

Tabela 14 - Análise de variância (intervalo de confiança de 95%)

FONTE DE VARIAÇÃO	SQ ^A	GL ^B	QM ^C	F _{CALCULADO}	P-VALOR
Regressão	982,592	2	491,296	8,860	0,0028
Resíduos	831,790	15	55,453		
Total	1814,382	17			

% variação explicada (R^2) = 54,15% $F_{2; 15; 0,05} = 3,682$ ^a= soma de quadrados; ^b = graus de liberdade; ^c = quadrados médios.

Na Figura 18 pode-se observar a superfície de resposta para o parâmetro remoção da turbidez.

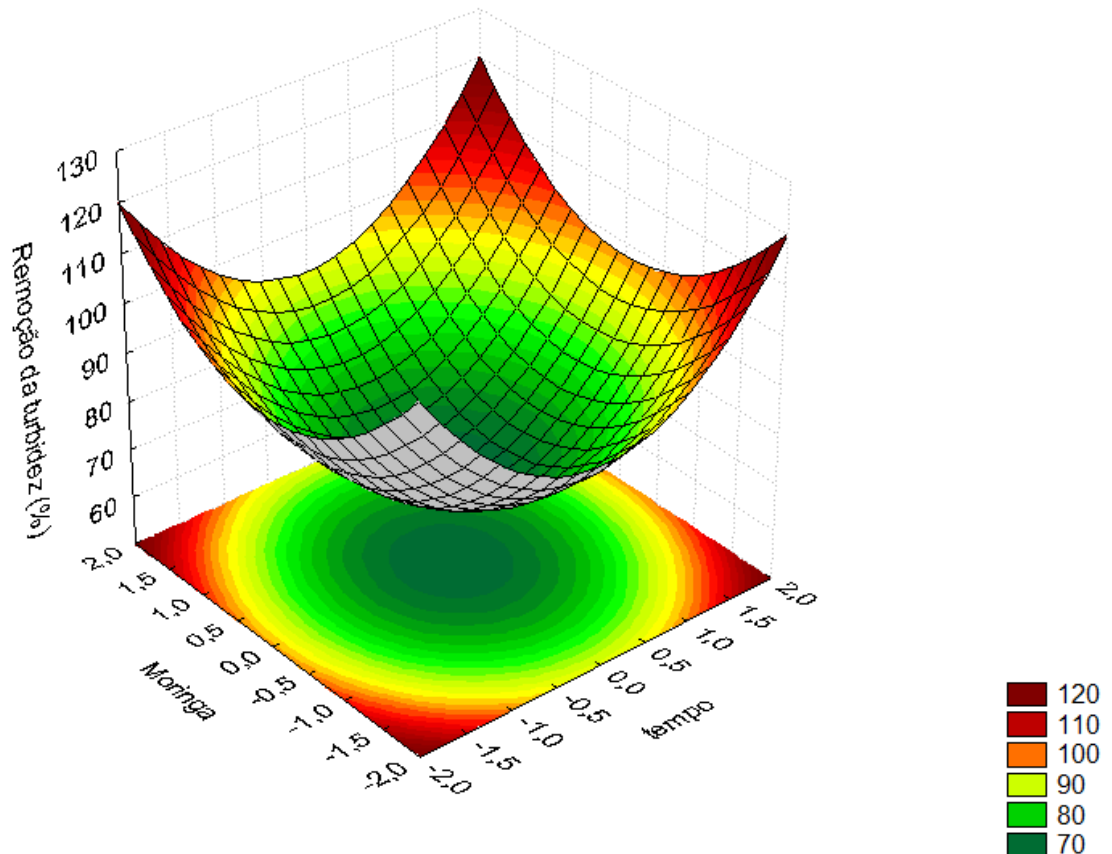


Figura 18 - Gráfico da superfície de resposta para o parâmetro remoção da turbidez (%)

O perfil da superfície indica que os melhores resultados estariam nos extremos das condições testadas. Portanto, foram consideradas as seguintes premissas na definição das melhores condições para preparo do extrato:

- Como pelo modelo, tanto as condições +1,68 (Moringa oleífera) e -1,68 (tempo), apresentaram a mesma eficiência de tratamento, optou-se por utilizar as variáveis em -1,68, por conta da viabilidade econômica (menor tempo e menor concentração de extrato).
- Apesar da concentração de sal não ter sido significativa, optou-se por testar os dois extremos para esta variável, uma vez que aumentando-se a concentração de sal, aumenta-se a condutividade elétrica do meio, o que seria interessante para a etapa posterior de eletrofloculação.

5.3.1 Ensaio para a Validação

Na Tabela 15 observa-se os valores codificados dos 10 ensaios de validação para a região ótima obtida através dos resultados apresentados anteriormente, com os respectivos percentuais de remoção da turbidez.

Tabela 15 - Remoção da turbidez (%) ensaios validação

ENSAIO	NaCl	MO	TEMPO	REMOÇÃO TURBIDEZ (%)	DESVIO PADRÃO
1				93,10	
2				93,03	
3	1,68	-1,68	-1,68	92,00	0,75228
4				91,41	
5				91,84	
6				84,92	
7				86,19	
8	-1,68	-1,68	-1,68	85,00	0,80477
9				85,25	
10				86,74	

De acordo com a Tabela 16 pode-se observar que as médias são diferentes a 95% de confiança, e, portanto, os melhores resultados foram encontrados quando o sal foi fixado em +1,68. Sendo assim, as melhores condições para o preparo do extrato para este trabalho foram 20% de NaCl (equivalente a +1,68) e 20 segundos de tempo de ultrassom (equivalente a -1,68). O grupo 1 referece aos 5 primeiros ensaios e o grupo 2 aos subseqüentes.

Tabela 16 - Teste T – amostras independentes

(continua)

INFORMAÇÃO	VALOR
T	13,49663139
Graus de Liberdade	8
P-valor	8,71349E-07
Média no grupo 1:	92,27783005
Média no grupo 2:	85,61805591

**Tabela 16 – Teste T – amostras independentes
(conclusão)**

INFORMAÇÃO	VALOR
Desvio padrão amostral do grupo 1:	0,753724226
Desvio padrão amostral do grupo 2:	0,80579999
Desvio padrão agrupado:	0,780196716
Hipótese Alternativa: Diferença de	0
Intervalo de confiança	95%
Limite Inferior	5,521900084
Limite Superior	7,797648197

5.4 ELETROFLOCULAÇÃO ASSOCIADA A ADIÇÃO DE COAGULANTE NATURAL A BASE DE MORINGA OLEIFERA EM SOLUÇÃO DE AQUOSA DE CORANTE REATIVO AZUL 5G EM BATELADA

5.4.1 Primeiro DCCR (Análise dos fatores: Intensidade de Corrente Elétrica, Tempo de Eletrofloculação e Concentração de Coagulante a base de Moringa oleífera)

Para os resultados do primeiro DCCR foi necessário realizar uma correção da remoção da cor, uma vez que ao adicionar um volume significativo de extrato de coagulante, tal diluição poderia mascarar os resultados de remoção da cor. A correção seguiu a equação 5:

$$RC \text{ corrigida} = (RC) \left(\frac{V_{\text{efluente}}}{V_{\text{efluente}} + V_{\text{extrato}}} \right) \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde:

V_{efluente} = Volume da solução de corante utilizada no ensaio.

V_{extrato} = Volume de coagulante (extrato aquoso de Moringa oleífera) adicionado.

Na Tabela 17 podem ser observados os valores codificados dos 18 ensaios e na Tabela 18 os 2 ensaios do branco, com os respectivos valores da variável

resposta cor após o tratamento da solução de corante com eletrofloculação e adição de coagulante natural a base de Moringa oleífera. Através da absorbância da solução sem tratamento de cada ensaio, foi possível calcular a eficiência de remoção da cor (%). Os dados apresentados são valores médios, pois os ensaios foram realizados em duplicata.

Tabela 17 - Matriz do delineamento experimental eletrofloculação com adição de Moringa oleífera em batelada (primeiro DCCR)

ENSAIO	I (A)	MO (mg L ⁻¹)	TEMPO (min)	REMOÇÃO DA COR ORIGINAL (%)	REMOÇÃO DA COR CORRIGIDA (%)
1	0,70 (-1)	1809 (-1)	7 (-1)	93,79	86,54±0,5613
2	2,04 (1)	1809 (-1)	7 (-1)	87,35	80,59±1,4152
3	0,70 (-1)	4190 (1)	7 (-1)	92,05	88,83±1,4521
4	2,04 (1)	4190 (1)	7 (-1)	92,74	89,50±1,3451
5	0,70 (-1)	1809 (-1)	13 (1)	83,74	77,27±0,4276
6	2,04 (1)	1809 (-1)	13 (1)	93,36	86,14±1,0289
7	0,70 (-1)	4190 (1)	13 (1)	93,62	90,35±0,5426
8	2,04 (1)	4190 (1)	13 (1)	94,64	91,33±0,7495
9	1,38 (0)	3000 (0)	10 (0)	91,69	86,50±0,5427
10	1,38 (0)	3000 (0)	10 (0)	91,27	86,11±0,2870
11	1,38 (0)	3000 (0)	10 (0)	91,32	86,15±0,2691
12	1,38 (0)	3000 (0)	10 (0)	91,32	86,15±0,1331
13	2,50 (1,68)	3000 (0)	10 (0)	89,80	84,72±0,5608
14	0,25 (-1,68)	3000 (0)	10 (0)	84,04	80,22±0,3790
15	1,38 (0)	5000 (1,68)	10 (0)	89,08	80,98±0,4161
16	1,38 (0)	1000 (-1,68)	10 (0)	84,10	82,45±0,1822
17	1,38 (0)	3000 (0)	15 (1,68)	91,39	86,22±1,0008
18	1,38 (0)	3000 (0)	5 (-1,68)	87,54	82,59±1,1451

Tabela 18 - Remoção da cor (%) para os ensaios do Branco em batelada (primeiro DCCR)

ENSAIO	REMOÇÃO DA COR (%)
1	8,64±1,544
2	1,55±0,154

De acordo com as Tabelas 17 e 18, é possível observar que a remoção da cor corrigida final variou de 77,27% a 91,33%, já o valor médio da remoção dos ensaios em branco ficou em 5,09%, o que reforça a eficiência do coagulante e da eletrofloculação para as amostras analisadas.

No entanto, verificou-se que os coeficientes e suas interações, de acordo com as condições testadas, não se mostraram significativos ao nível de 95% de confiança na remoção da cor do efluente. Na tabela 19 observam-se os coeficientes de regressão do modelo.

Tabela 19 - Coeficientes de regressão para a variável-resposta remoção da cor

	EFEITOS	COEFICIENTES DE REGRESSÃO	ERRO PADRÃO	P - VALOR
Média		86,04340378	2,024080714	1,0337E-10
I(I ²)	-1,066197824	-0,533098912	1,14170347	0,653000853
I	1,777195477	0,888597738	1,097638275	0,44160787
I(MO ²)	-1,603084718	-0,801542359	1,14170347	0,502553765
MO	3,956986904	1,978493452	1,097638275	0,109135092
I(t ²)	0,302280729	0,151140364	1,14170347	0,897951655
t	0,838950471	0,419475235	1,097638275	0,712293523
I:MO	-0,319310504	-0,159655252	1,433500459	0,914063083
I:t	3,782750856	1,891375428	1,433500459	0,223540514
MO:t	1,769092434	0,884546217	1,433500459	0,554350899

No entanto, apesar de nenhum parâmetro ter se mostrado significativo, o que apresentou menor efeito foi o tempo. Sendo assim, um novo planejamento foi proposto fixando o tempo na condição mínima e reduzindo as faixas de estudo para a Intensidade de corrente aplicada e para a concentração de coagulante de Moringa oleífera, uma vez que o primeiro DCCR executado indicou uma alta remoção da cor para todas as condições testadas, o que indica uma possibilidade das condições estarem superestimadas. Sendo assim, restringindo-se as faixas de estudo, seria possível chegar a condições mais amenas que proporcionassem igual eficiência de tratamento, o que seria muito importante sob o ponto de vista da viabilidade econômica do processo.

5.4.2 Segundo DCCR (Análise dos fatores: Intensidade de Corrente Elétrica e Concentração de coagulante a base de Moringa oleífera, ambos com faixas de estudo mais restritas)

Na Tabela 20 são observados os valores codificados dos 12 ensaios e na Tabela 21 o ensaio do branco, com os respectivos valores da variável resposta remoção da cor após o tratamento da solução de corante com eletrofloculação e adição de coagulante natural a base de Moringa oleífera. Através da absorbância da solução sem tratamento de cada ensaio foi possível calcular a eficiência de remoção da cor (%). Os dados apresentados são valores médios, pois os ensaios foram realizados em duplicata.

Tabela 20 - Matriz do delineamento experimental eletrofloculação com adição de Moringa oleífera em batelada (segundo DCCR)

ENSAIO	I (A)	MO (mg L ⁻¹)	REMOÇÃO DA COR (%)
1	0,30 (-1)	1745,6 (1)	41,56±0,83272
2	1,30 (1)	1745,6 (1)	77,92±0,04880
3	0,30 (-1)	504,4 (-1)	4,84±0,04554
4	1,30 (1)	504,4 (-1)	80,81±1,09016
5	0,80 (0)	1125 (0)	64,26±0,04886
6	0,80 (0)	1125 (0)	67,19±0,36326
7	0,80 (0)	1125 (0)	66,89±0,25254
8	0,80 (0)	1125 (0)	68,28±0,18659
9	1,50 (1,41)	1125 (0)	69,39±1,07458
10	0,10 (-1,41)	1125 (0)	13,45±0,17708
11	0,80 (0)	2000 (1,41)	67,25±0,17122
12	0,80 (0)	250 (-1,41)	68,73±0,44380

Tabela 21 - Remoção da cor (%) para os ensaios do Branco em batelada (segundo DCCR)

ENSAIO	REMOÇÃO DA COR (%)
1	3,58

Conforme pode ser observado na Tabela 20, a remoção da cor final variou de 13,45% a 80,81%, já de acordo com a Tabela 21 o valor médio da remoção dos ensaios em branco ficou em 3,58%, o que reforça a eficiência do coagulante e da

eletrofloculação para as amostras analisadas. Cabe salientar que para a análise dos resultados, a remoção da cor final foi corrigida por conta do volume do coagulante utilizado.

Através dos resultados obtidos foram calculados os coeficientes de regressão observados na Tabela 22 e Figura 19. Observa-se que o termo linear e o quadrático da Intensidade de corrente e as interações da Intensidade de corrente com o coagulante de Moringa oleífera foram estatisticamente significativos ao nível de significância de 5% ($p < 0,05$).

Tabela 22 - Coeficientes de regressão para a remoção da cor (%)

	EFEITOS	COEFICIENTES DE REGRESSÃO	ERRO PADRÃO	P - VALOR
Média		66,66545453	3,694640616	1,86427E-06
I(I ²)	-27,08336569	-13,54168285	2,933098273	0,003627299
I	47,94413863	23,97206931	2,616423523	9,51804E-05
I(MO ²)	-0,351618197	-0,175809099	2,933098273	0,954150234
MO	7,957347504	3,978673752	2,616423523	0,179162104
I:MO	-19,80381685	-9,901908425	3,694673511	0,03653374

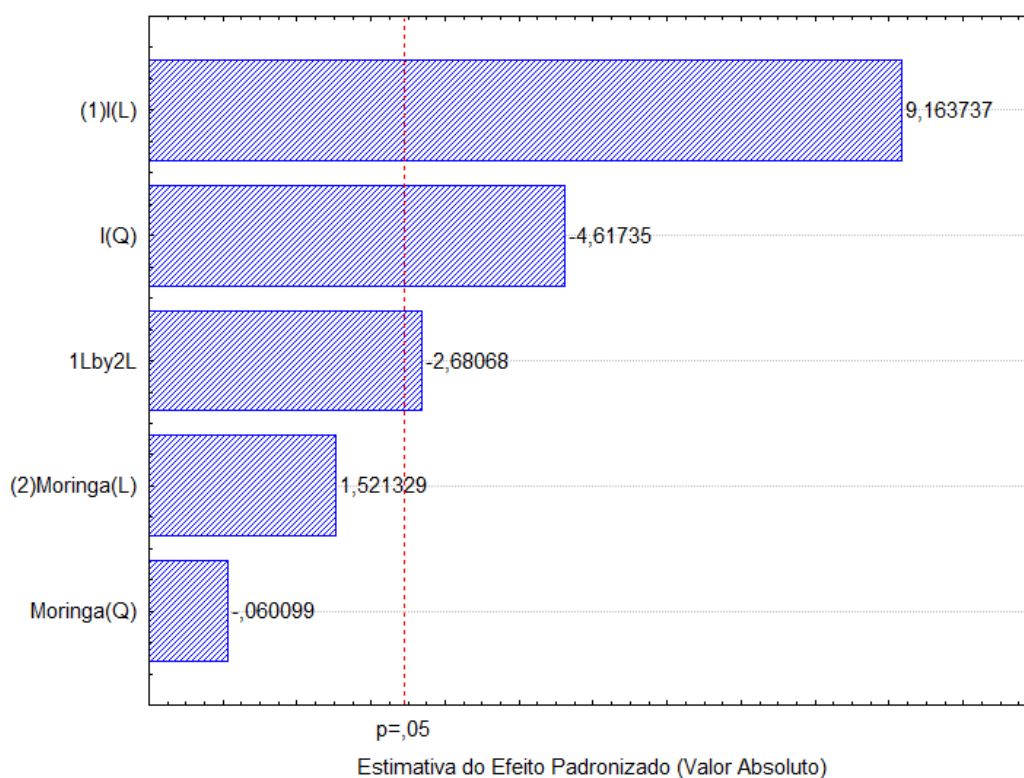


Figura 19 - Diagrama de Pareto para o processo de remoção da cor, com 95% de confiança

Analisando a Tabela 23 para a resposta Remoção da Cor, verificou-se que a regressão foi altamente significativa ($p < 0,05$) e a porcentagem de variação explicada, de 95%. A superfície de resposta pode ser observada nas Figuras 20 e 21.

Tabela 23 - Análise de variância (intervalo de confiança de 95%)

FONTE DE VARIÇÃO	SQ ^A	GL ^B	QM ^C	F _{CALCULADO}	P-VALOR
Regressão	6306,983	5	1261,397	23,101	0,0007
Resíduos	327,615	6	54,602		
Total	6634,598	11			

% variação explicada (R^2) = 95,06% $F_{5; 6; 0,05} = 4,387$ ^a= soma de quadrados; ^b = graus de liberdade; ^c = quadrados médios.

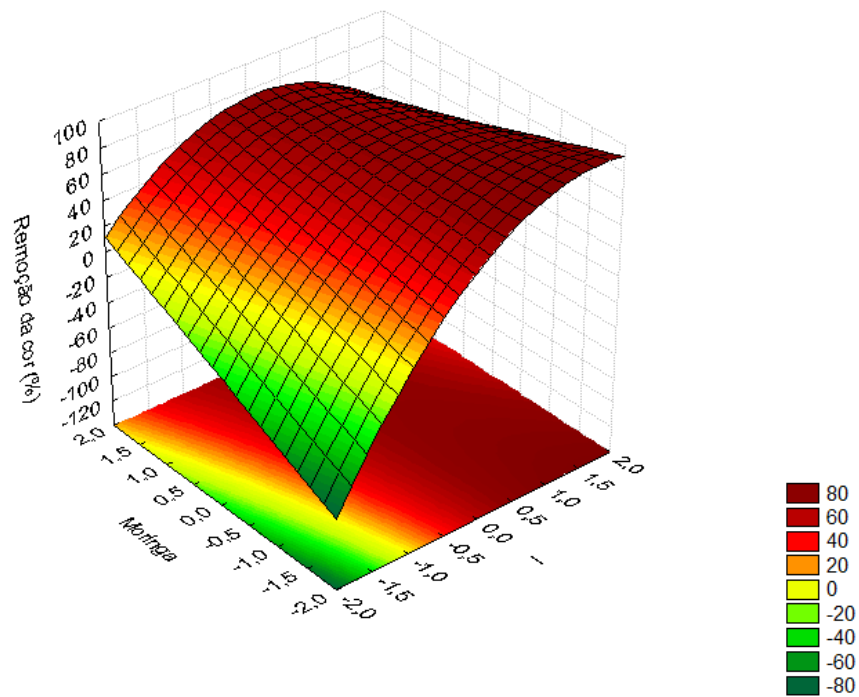


Figura 20 - Gráfico da superfície de resposta para o parâmetro remoção da cor (%)

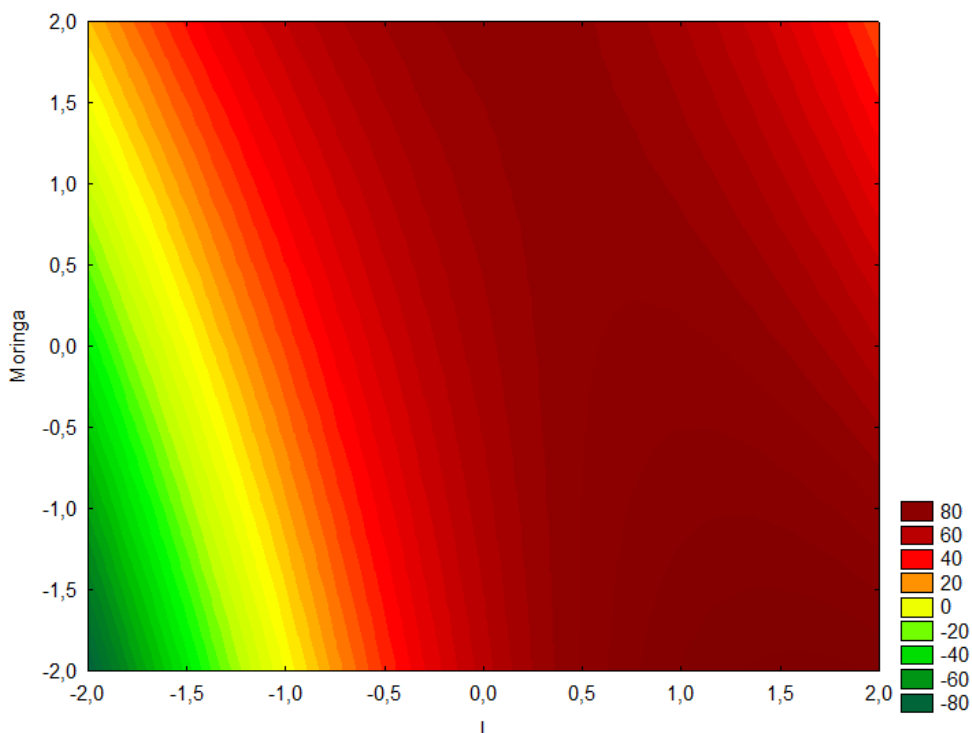


Figura 21 - -- Gráfico da curva de contorno para o parâmetro remoção da cor (%)

5.4.3 Validação do modelo de remoção do corante reativo azul 5G por eletrofloculação e adição de extrato de Moringa oleífera para o sistema em batelada

A partir das análises de superfície de resposta foi possível determinar as condições de processo em que se obtêm as melhores condições de remoção da cor da solução de corante, quando aplicado ao sistema de tratamento por eletrofloculação e adição de coagulante natural a base de Moringa oleífera. Estas condições foram determinadas por meio das derivadas parciais do modelo, que tiveram suas equações igualadas a zero, resultando nos valores codificados de 0,35 para I e 1,46 para MO, entretanto, como o valor ótimo de MO extrapola a faixa de estudo, utilizou-se o valor mais próximo, referente a 1,41. Assim, validou-se o modelo confirmando experimentalmente a remoção da cor em uma faixa mais ampla, levando-se em consideração a região ótima obtida.

Tabela 24 - Matriz do delineamento experimental Validação da eletrofloculação e adição Moringa oleífera em batelada

ENSAIO	I (A)	MO (mg L ⁻¹)	REMOÇÃO DA COR (%)	REMOÇÃO DA COR ESTIMADA (%)	ERRO (%)
1			86,79		
2	0,35	1,41	80,91	73,77	15,00
3			91,99		
Média			86,79		

Na Tabela 24 é possível observar as condições do processo de validação do modelo e seus respectivos resultados. A remoção média da cor obtida foi de 86,79%, apesar de o erro ter sido alto (15%), a remoção da cor determinada experimentalmente foi superior à predita pelo modelo.

6 RESULTADOS DO MÓDULO EXPERIMENTAL PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTE TÊXTIL, EM REGIME DE ESCOAMENTO CONTÍNUO

Na Tabela 25 observam-se os valores da variável resposta cor após o tratamento da solução de corante e da solução aquosa de Moringa oleífera, em escoamento contínuo. Cabe salientar que os dados apresentados são valores médios, pois os testes foram realizados em duplicata.

Tabela 25 - Matriz do delineamento experimental eletrofloculação e adição Moringa oleífera em escoamento contínuo

(continua)				
ENSAIO	I (A)	MO (mg L ⁻¹)	TRH (min)	REMOÇÃO DA COR (%)
1	0,28 (-1)	282,1 (-1)	6 (-1)	76,92±7,6344
2	0,82 (1)	282,1 (-1)	6 (-1)	86,80±0,7412
3	0,28 (-1)	817,9 (1)	6 (-1)	73,89±0,0117
4	0,82 (1)	817,9 (1)	6 (-1)	36,01±3,5005
5	0,28 (-1)	282,1 (-1)	9 (1)	81,94±1,2451
6	0,82 (1)	282,1 (-1)	9 (1)	65,20±0,2172
7	0,28 (-1)	817,9 (1)	9 (1)	50,28±0,3467
8	0,82 (1)	817,9 (1)	9 (1)	23,91±2,1542

Tabela 25 - Matriz do delineamento experimental eletrofloculação e adição Moringa oleífera em escoamento contínuo

ENSAIO	I (A)	MO (mg L ⁻¹)	TRH (min)	(conclusão)
				REMOÇÃO DA COR (%)
9	0,55 (0)	550 (0)	7,5 (0)	56,14±2,1955
10	0,55 (0)	550 (0)	7,5 (0)	53,41±0,5322
11	0,55 (0)	550 (0)	7,5 (0)	57,89±0,4587
12	1,00 (1,68)	550 (0)	7,5 (0)	90,25±2,1409
13	0,10 (-1,68)	550 (0)	7,5 (0)	8,46±3,3911
14	0,55 (0)	1000 (1,68)	7,5 (0)	72,37±0,4535
15	0,55 (0)	100 (-1,68)	7,5 (0)	20,66±1,3639
16	0,55 (0)	550 (0)	10 (1,68)	71,77±0,6307
17	0,55 (0)	550 (0)	5 (-1,68)	58,08±0,8124

De acordo com a Tabela 25 é possível observar que a remoção da cor final variou de 8,46% a 90,25%. Através destes resultados calcularam-se os coeficientes de regressão conforme podem ser observados na Tabela 26.

Tabela 26 - Coeficientes de regressão para a remoção da cor (%)

EFEITOS	COEFICIENTES DE REGRESSÃO	ERRO PADRÃO	P - VALOR
Média	59,06606811	6,297724056	6,08548E-06
I	30,56231227	15,28115614	0,00154469
MO	31,31738203	15,65869101	0,001318366
I(I ²)	-3,429774849	-1,71488742	0,640795402
I(MO ²)	-5,443374872	-2,72168744	0,463191778
TRH	11,03867928	5,519339642	0,140525328
I(TRH ²)	7,605341815	3,802670908	0,312268975
I:MO	-14,34646727	-7,17323364	0,142235525
MO:TRH	-4,786695788	-2,39334789	0,60455129

Os resultados demonstraram que os termos relativos ao TRH não foram significativos, então estes tiveram suas contribuições incorporadas aos resíduos.

Conforme se observa na Tabela 27 e Figura 22, no modelo reduzido para os coeficientes de regressão o termo linear da Intensidade de corrente e Moringa oleífera foram estatisticamente significativos ao nível de significância de 5% ($p < 0,05$). Apesar dos termos quadráticos e a interação entre Intensidade de corrente

e Moringa oleífera não terem sido significativas, estes termos foram mantidos no modelo.

Tabela 27 - Coeficientes de regressão para a remoção da cor (%), modelo reduzido

EFEITOS		COEFICIENTES DE REGRESSÃO	ERRO PADRÃO	P - VALOR
Média		61,76280626	5,851798774	4,30031E-07
I	30,56231227	15,28115614	3,660423837	0,001550374
I(I ²)	-3,82906764	-1,91453382	3,853956343	0,629128957
MO	31,31738203	15,65869101	3,660423837	0,00130344
I(MO ²)	-5,842667663	-2,921333832	3,853956343	0,464375825
I:MO	-14,34646727	-7,173233636	4,780463081	0,161622441

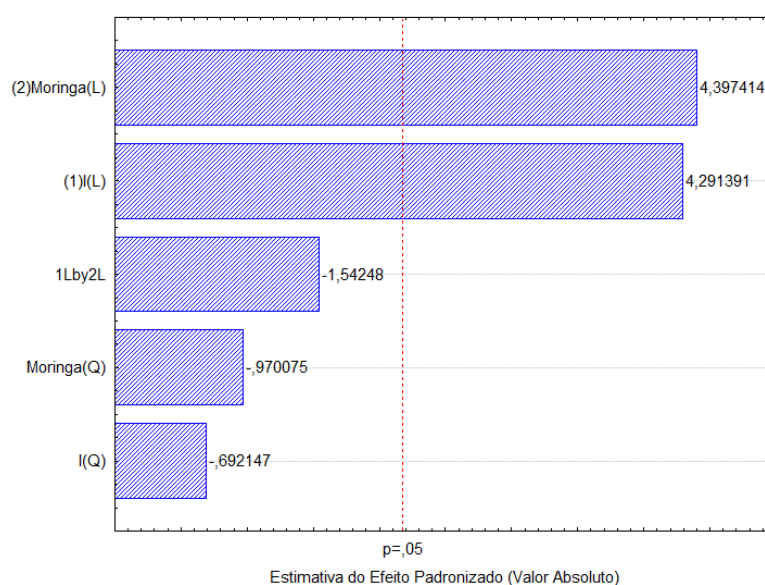


Figura 22 - Diagrama de Pareto para remoção da cor, com 95% de confiança

Analisando a Tabela 28 para a resposta Remoção da Cor, verificamos que a regressão foi significativa ($p < 0,05$) e a porcentagem de variação explicada, de 77,85%. A superfície de resposta está apresentada na Figura 23 e as curvas de contorno na Figura 24.

Tabela 28 - Análise de variância (intervalo de confiança de 95%)

FONTE DE VARIACÃO	SQ ^A	GL ^B	QM ^C	F _{CALCULADO}	P-VALOR
Regressão	7068,855	5	1413,771	7,733	0,0024
Resíduos	2011,049	11	182,823		
Total	9079,904	16			

% variação explicada (R^2) = 77,85% $F_{5; 11; 0,05} = 3,204$ ^a= soma de quadrados; ^b = graus de liberdade; ^c = quadrados médios.

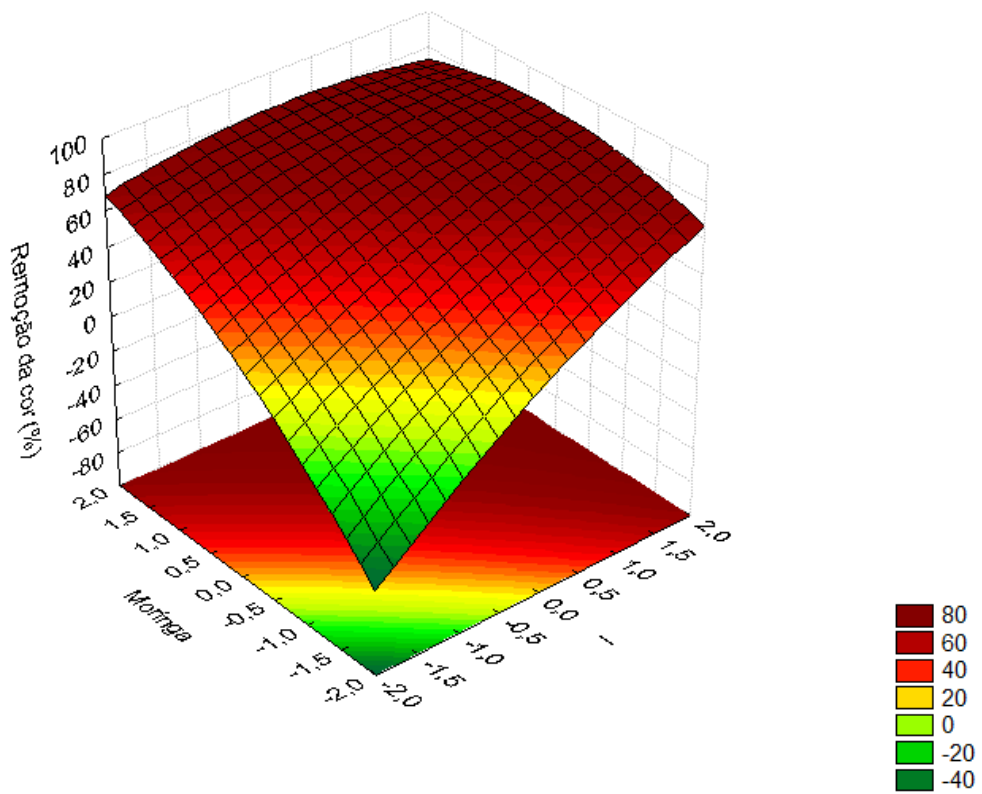


Figura 23 - Gráfico da superfície de resposta para o parâmetro remoção da cor (%)

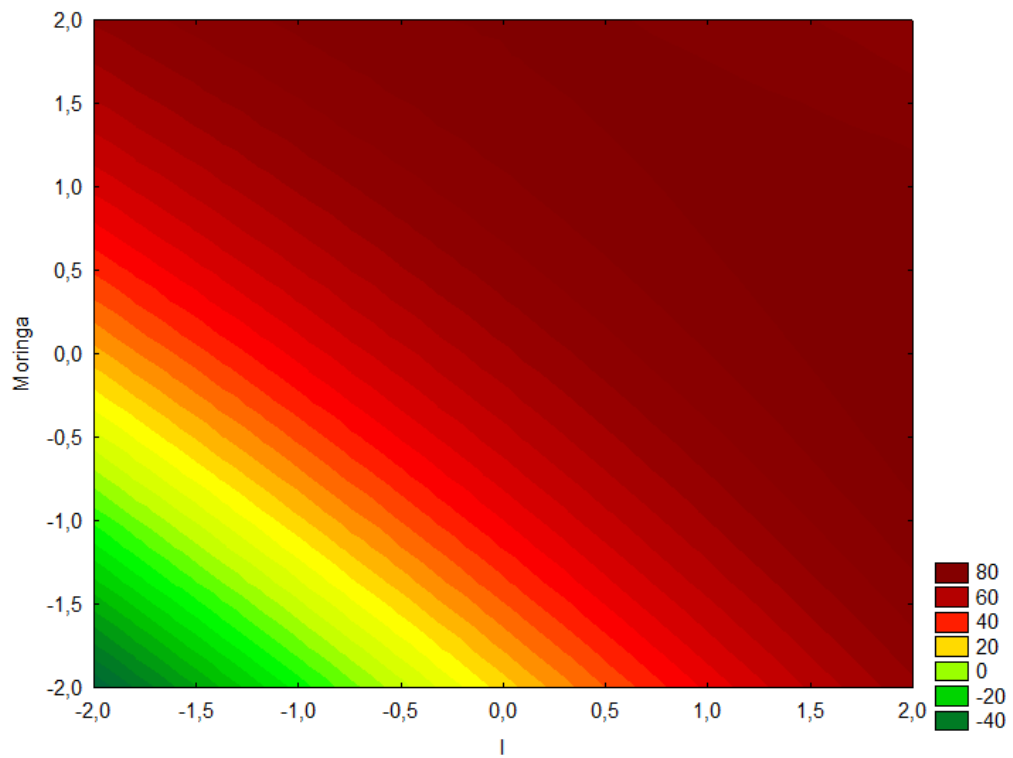


Figura 24 - Gráfico da curva de contorno para o parâmetro remoção da cor (%)

Uma amostra do ensaio 12 que obteve a maior remoção da cor (90,25%) efluente bruto/efluente tratado e o gráfico de varredura para amostra tratada podem ser observados nas Figuras 25 e 26, respectivamente.



Figura 25 - Amostra bruta e tratada, respectivamente - Ensaio 12

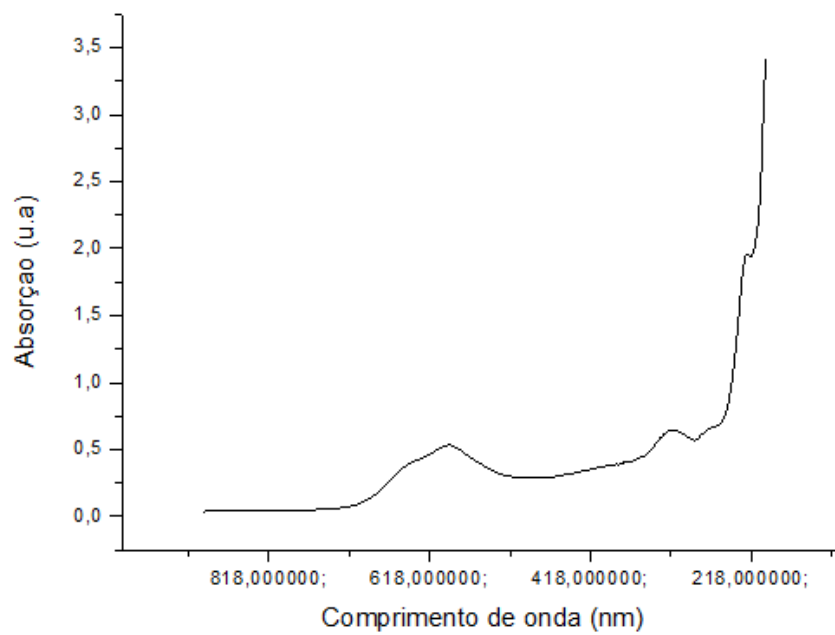


Figura 26 - Gráfico de varredura do efluente tratado – Ensaio 12

Na Figura 27 observa-se o ensaio com menor remoção de cor (8,46%) e na Figura 28 o gráfico de varredura para a amostra tratada do ensaio 13.

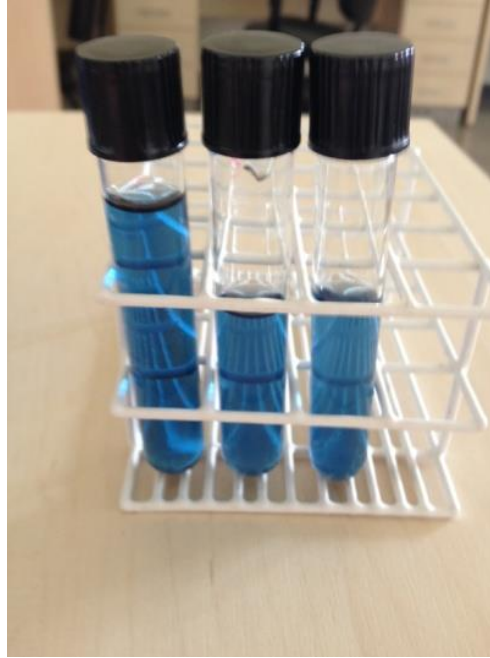


Figura 27 - Amostra bruta e tratada, respectivamente - Ensaio 13

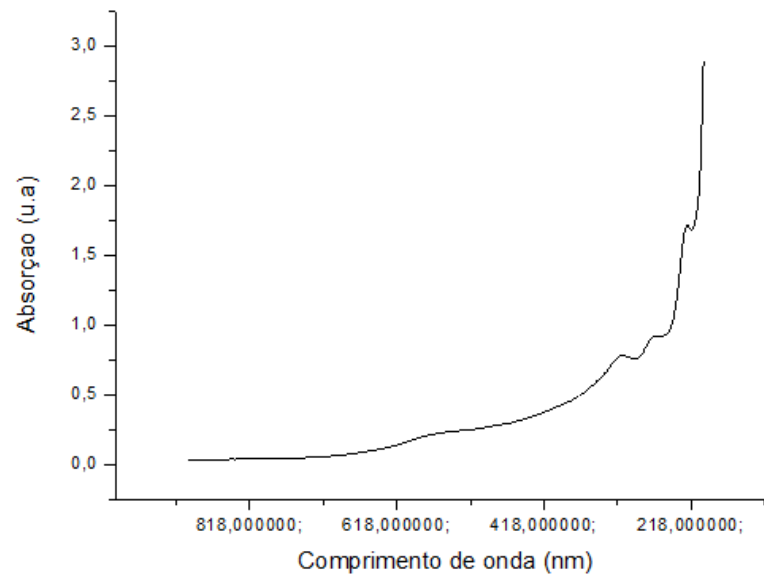


Figura 28 - Gráfico de varredura do efluente tratado – Ensaio 13

6.1 ANÁLISE DE FERRO RESIDUAL

Na Tabela 29 observam-se os valores da variável resposta ferro residual após o tratamento da solução de corante por eletrofloculação e da solução aquosa de Moringa oleífera, em escoamento contínuo. Cabe salientar que os dados apresentados são valores médios, pois os testes foram realizados em duplicata.

Tabela 29 - Matriz do delineamento experimental para o Ferro Residual

ENSAIO	I (A)	MO (mg L ⁻¹)	TRH (min)	FERRO RESIDUAL (mg L ⁻¹)
1	0,28 (-1)	282,1 (-1)	6 (-1)	7,84667±0,0126
2	0,82 (1)	282,1 (-1)	6 (-1)	3,80643±0,0545
3	0,28 (-1)	817,9 (1)	6 (-1)	6,538607±0,3435
4	0,82 (1)	817,9 (1)	6 (-1)	6,732186±0,8126
5	0,28 (-1)	282,1 (-1)	9 (1)	7,241033±0,6100
6	0,82 (1)	282,1 (-1)	9 (1)	3,702123±0,2412
7	0,28 (-1)	817,9 (1)	9 (1)	8,106497±0,3136
8	0,82 (1)	817,9 (1)	9 (1)	7,316679±0,5522
9	0,55 (0)	550 (0)	7,5 (0)	8,491774±0,1488
10	0,55 (0)	550 (0)	7,5 (0)	7,065779±0,1787
11	0,55 (0)	550 (0)	7,5 (0)	7,072357±1,3256
12	1,00 (1,68)	550 (0)	7,5 (0)	8,209394±0,9416
13	0,10 (-1,68)	550 (0)	7,5 (0)	3,871269±0,1980
14	0,55 (0)	1000 (1,68)	7,5 (0)	7,478307±0,1880
15	0,55 (0)	100 (-1,68)	7,5 (0)	9,031014±2,6579
16	0,55 (0)	550 (0)	10 (1,68)	5,332502±0,1395
17	0,55 (0)	550 (0)	5 (-1,68)	8,446668±0,0306

De acordo com a Tabela 29 é possível observar que o valor de ferro residual variou de 3,70 mg. L⁻¹ a 9,03 mg. L⁻¹. O limite de 15 mg. L⁻¹ de ferro permissível pela legislação (Resolução CONAMA 430/2011) foi respeitado.

Através dos resultados obtidos foram calculados os coeficientes de regressão conforme a Tabela 30. Observa-se que os termos relativos ao TRH não foram significativos, portanto, estes tiveram suas contribuições incorporadas ao resíduo.

Tabela 30 - Coeficientes de regressão para o ferro residual (Modelo completo)

	EFEITOS	COEFICIENTES DE REGRESSÃO	ERRO PADRÃO	P - VALOR
Média		7,584632629	0,467073932	2,08012E-07
I	2,266568962	1,133284481	0,219470187	0,000859719
MO	-1,276128717	-0,638064358	0,219470187	0,019670512
TRH	-0,978283015	-0,489141508	0,219470187	0,056407947
I(I ²)	-1,341671457	-0,670835728	0,241785369	0,024128154
I(MO ²)	0,227439424	0,113719712	0,241785369	0,024128154
I(TRH ²)	-0,739875911	-0,369937955	0,241785369	0,650672727
I:MO	1,745727675	0,872863838	0,286625039	0,164539481
MO:TRH	0,71558155	0,357790775	0,286625039	0,24721951

Através destes resultados foram calculados os coeficientes de regressão para o modelo reduzido, eles podem ser observados na Tabela 31 e Figura 29. Observe-se que o termo linear da I e M.O e a interação entre eles, foram estatisticamente significativos ao nível de significância de 5% ($p < 0,05$).

Tabela 31 - Coeficientes de regressão para o ferro residual (Modelo reduzido)

	EFEITOS	COEFICIENTES DE REGRESSÃO	ERRO PADRÃO	P - VALOR
Média		7,112909147	0,434459591	4,5214E-09
I	2,266568962	1,133284481	0,271763659	0,001562427
I(I ²)	-1,123891073	-0,561945537	0,286132241	0,075307083
MO	-1,276128717	-0,6382487733	0,271763659	0,038632562
I(MO ²)	0,445219808	0,222743361	0,286132241	0,452980311
I:MO	1,745727675	0,872863838	0,354919593	0,031716526

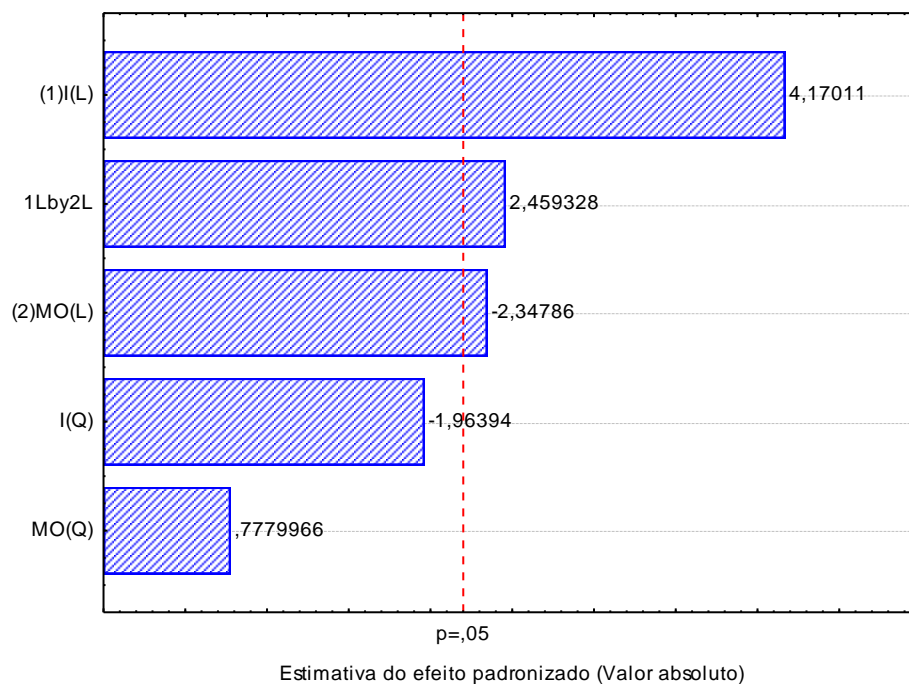


Figura 29 - Diagrama de Pareto para o processo de ferro residual, com 95% de confiança

Analisando a Tabela 32 para a resposta ferro residual, verificamos que a regressão foi significativa ($p < 0,05$) e a porcentagem de variação explicada, de 75,76%. A superfície de resposta e as curvas de contorno estão representadas nas Figuras 30 e 31.

Tabela 32 - Análise de variância (intervalo de confiança de 95%)

FONTE DE VARIAÇÃO	SQ ^A	GL ^B	QM ^C	F _{CALCULADO}	P-VALOR
Regressão	34,655	5	6,931	6,878	0,0038
Resíduos	11,085	11	1,008		
Total	45,741	16			

% variação explicada (R^2) = 75,76% $F_{5; 11; 0,05} = 3,204^a$ = soma de quadrados; ^b = graus de liberdade; ^c = quadrados médios.

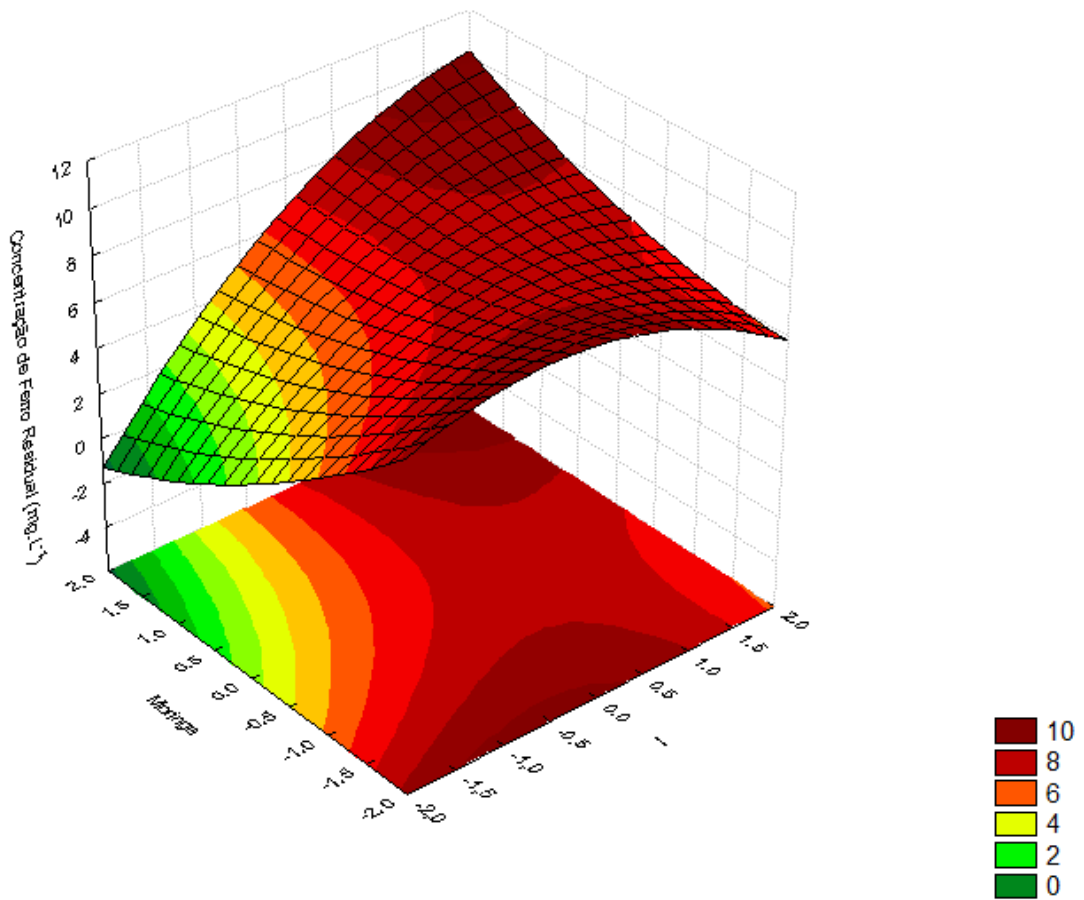


Figura 30 - – Gráfico de Superfície de resposta para o parâmetro concentração de ferro residual

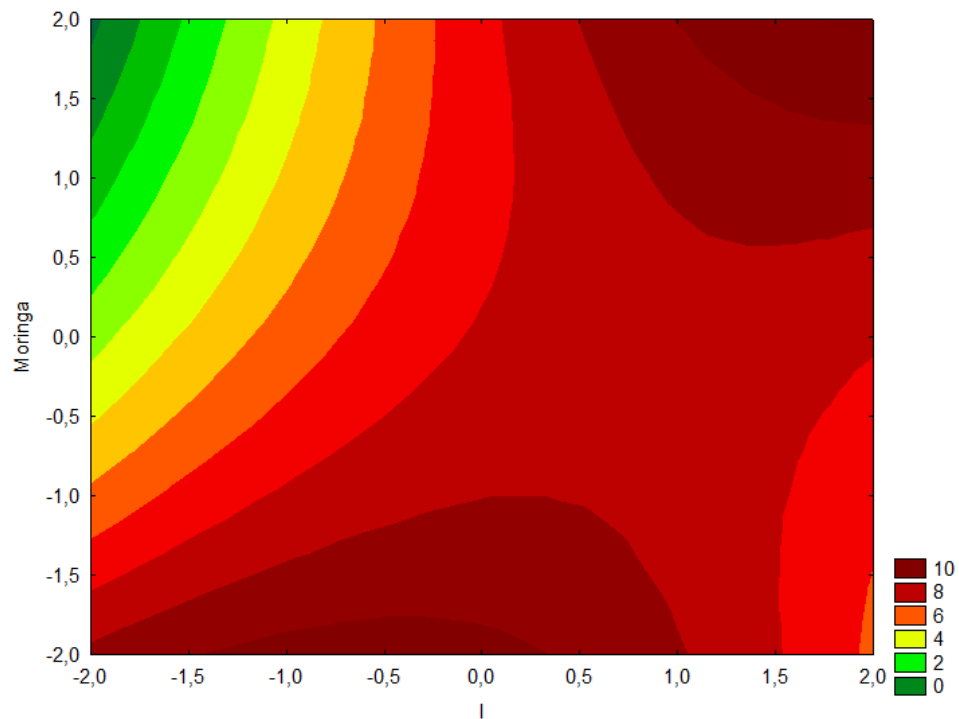


Figura 31 - Gráfico de curva de contorno para o parâmetro concentração de ferro residual

6.2 DESEJABILIDADE GLOBAL

Em razão de ter mais de uma variável-resposta (Remoção da cor e Ferro Residual) e ter interesse em encontrar os valores operacionais ótimos das variáveis independentes (concentração do coagulante, intensidade da corrente e tempo de retenção hidráulica) que satisfaçam simultaneamente todos os requisitos necessários às variáveis dependentes, o software STATISTICA™ utiliza a abordagem da função *Desirability* (Desejabilidade). Com essa função, a otimização simultânea de todas as variáveis-resposta maximiza-se num único valor, denominado de desejabilidade global. A Figura 32 demonstra a faixa ótima de trabalho pela superposição das curvas de nível para as respostas avaliadas nos ensaios de eletrofloculação em fluxo contínuo. A função desejabilidade forneceu as condições de modo a proporcionar a maximização da remoção da cor e a minimização da concentração residual de Ferro.

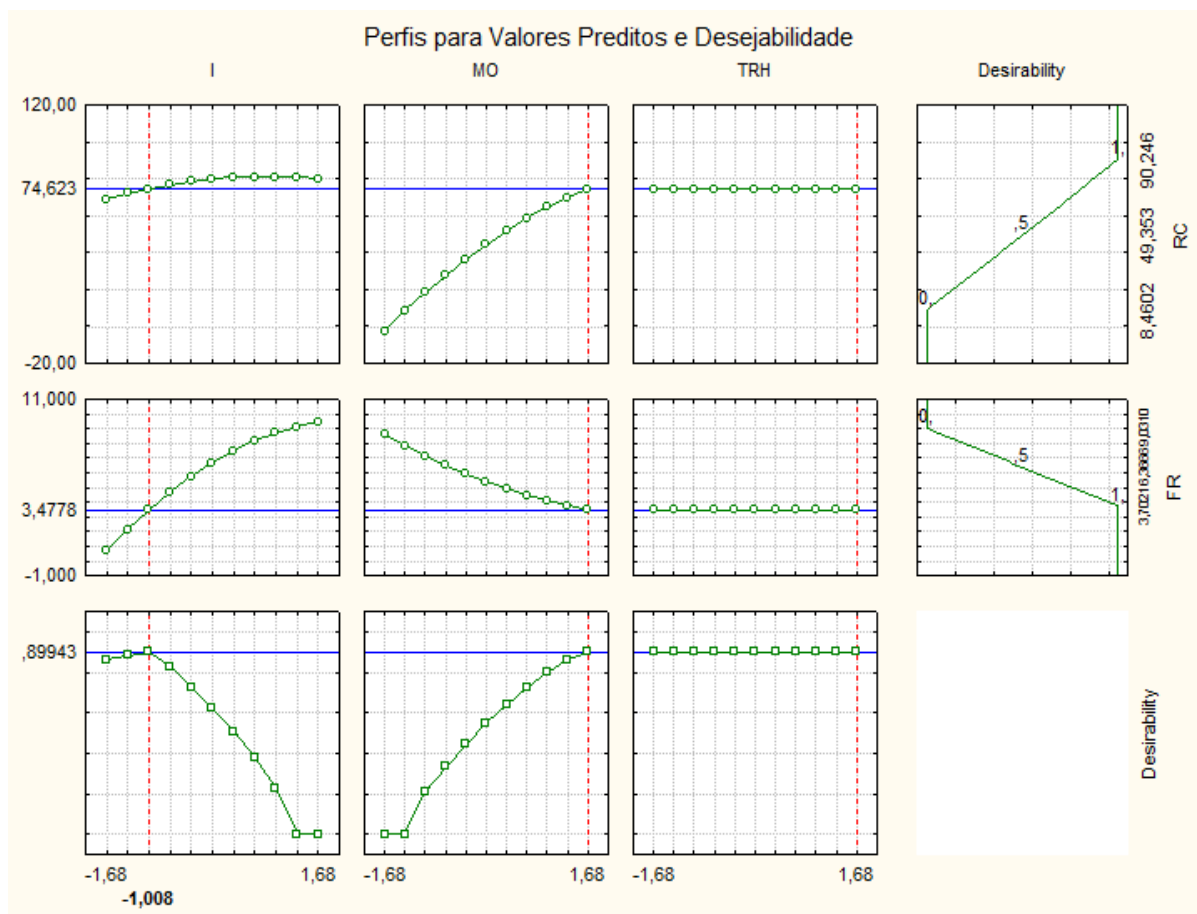


Figura 32 – Gráficos estatísticos para a função desirability global

Ao observar a Figura 32 é possível apontar o seguinte conjunto de condições que maximiza a desejabilidade global:

- Intensidade de corrente aplicada: -1
- Concentração de solução coagulante de Moringa oleífera: +1,68

Nessas condições somente a intensidade da corrente e a concentração de coagulante natural foram significativas, o termo TRH (Tempo de retenção hidráulica) não foi significativo, então fixou-se o valor desta variável no mínimo testado, -1,68 (valor codificado) correspondente a 5 min (valor real).

É possível observar na Figura 33 os gráficos da função de desejabilidade global em função de Intensidade de corrente aplicada (I) e Concentração de solução coagulante de Moringa oleífera (MO).

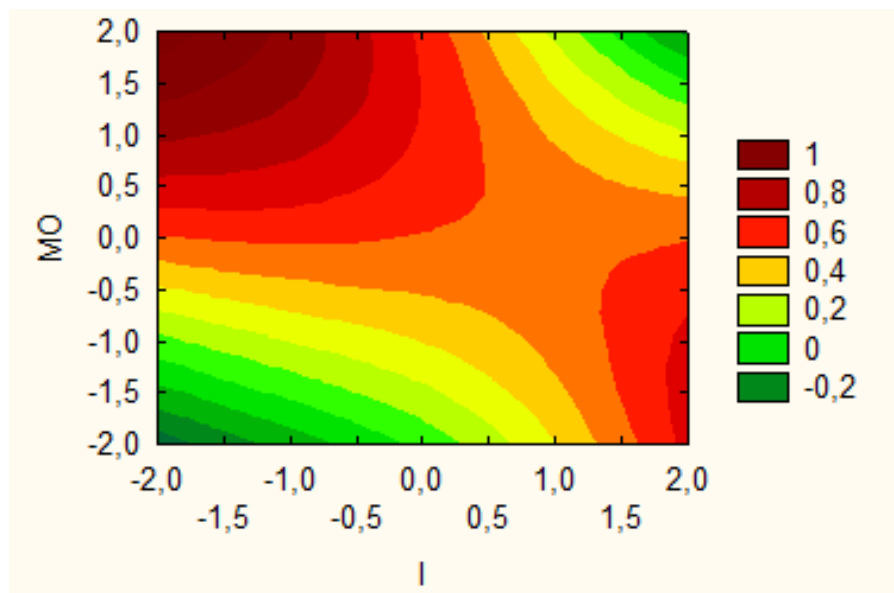


Figura 33 - Gráficos da função desejabilidade global, em função de I e MO

6.3 VALIDAÇÃO DO TRATAMENTO DE EFLUENTE TÊXTIL, EM REGIME DE ESCOAMENTO CONTÍNUO

A partir das análises de superfície de resposta foi possível determinar as condições do processo em que se obtêm as melhores condições de remoção da cor da solução de corante quando aplicado ao sistema de tratamento por

eletrofloculação e adição de coagulante natural a base de Moringa oleífera em regime de escoamento contínuo. Assim, validou-se o modelo confirmando experimentalmente a remoção da cor em uma faixa mais ampla, levando-se em consideração a região ótima obtida.

Tabela 33 - Matriz do delineamento experimental Validação eletrofloculação e adição Moringa oleífera em regime de escoamento contínuo

ENSAIO	I	M.O	TRH	REMOÇÃO DA COR (%)	REMOÇÃO DA COR ESTIMADA (%)	ERRO (%)
1				71,55		
2	-1	1,68	-1,68	69,87	74,68	4,62
3				72,73		
Média				71,38		

Na Tabela 33 é possível observar as condições do processo de validação do modelo e seus respectivos resultados. É possível observar a tendência de remoção prevista pelo modelo. A remoção média da cor para o ensaio de validação foi de 71,38%, valor este bem próximo do estimado (74,68%), com um erro percentual de 4,62.

Na Tabela 34 observa-se as condições operacionais e os resultados para a variável resposta Ferro residual.

Tabela 34 - Matriz do delineamento experimental para o Ferro residual (Validação)

ENSAIO	I	MO	TRH	FERRO RESIDUAL (mg L ⁻¹)	FERRO RESIDUAL ESTIMADO (mg L ⁻¹)	ERRO (%)
1				5,25701		
2	-1	1,68	-1,68	5,10416	3,50761	32,85
3				5,30995		
Média				5,22370		

Apesar de o erro estar distante do esperado (32,85%), a quantidade de ferro residual para os ensaios da validação permanece dentro da faixa permissível pela legislação.

CONCLUSÃO

A aplicação da eletrofloculação para a remoção do corante reativo azul 5G de um efluente sintético apresentou 89,87% de eficiência máxima. Além disso, o modelo ajustado com base na análise estatística dos resultados se apresentou válido a 95% de confiança. Tal modelo pode ser utilizado para a realização da otimização das condições operacionais estudadas: diferença de potencial empregada entre os eletrodos de sacrifício, tempo de reação e pH.

Através da análise do potencial do coagulante a base de Moringa oleífera, avaliou-se as condições de preparo do extrato aquoso: salinidade e tempo de extração. A concentração do coagulante obtido, utilizada em água turva sintética também constituiu um dos fatores estudados, o qual teve seu termo linear exclusivamente significativo a 95% de confiança. Neste contexto, conseguiu-se determinar as condições de obtenção do extrato de Moringa oleífera, 20 segundos de agitação em ultrassom 80 kHz empregando-se uma solução 20% em cloreto de sódio. Estas condições se referem aos limiares inferiores testados.

A fim de potencializar o nível de tratamento, as duas técnicas (eletrofloculação e coagulante natural a base de Moringa oleífera) inicialmente testadas separadamente, foram associadas em um sistema em batelada, obteve-se uma eficiência máxima de 94,64%. Os resultados obtidos na execução de dois delineamentos experimentais apresentaram uma ampla região de excelente remoção do corante, subsidiando a aplicação de tais técnicas em regime contínuo de operação.

Tais técnicas quando aplicadas em fluxo contínuo apresentaram ótimos resultados para a remoção da cor, chegando a um percentual de 90,25. Em conjunto com esse tratamento foi realizada análise para quantificar o percentual de ferro residual presente nas amostras tratadas. Além disso, em razão de ter mais que uma variável resposta (remoção da cor e ferro residual), e ter o interesse em encontrar os valores operacionais ótimos das variáveis analisadas, a função desejabilidade, disponível no software STATISTICA™, forneceu as condições que proporcionaram a maximização da remoção da cor e a minimização da concentração residual de Ferro. A partir desta condição otimizada realizou-se a validação do tratamento obtendo-se

uma remoção de cor de 71,38% com a quantidade média de ferro residual dentro da faixa permissível pela Legislação (15 mg. L⁻¹).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIQUIM. Associação Brasileira da Indústria Química. **Corantes e Pigmentos**. Disponível em: <http://www.abiquim.org.br/corantes/cor_historia.asp> Acesso em: 01 de julho de 2014.

AGRAWAL, H.; SHEE, C.; SHARMA, A. K. Isolation of a 66 KDa protein with coagulation activity from seeds of *Moringaoleifera*. **Global Journal of Biotechnology & Biochemistry**. v.2, p.36-39, 2007.

AKSU, Z. and TEZER, S. Biosorption of reactive dyes on the green alga *Chlorella vulgaris*. **Process Biochemistry**, vol. 40, no. 3-4, p. 1347-1361. 2005.

AMAGLOH, F.K & BENANG, A. Effectiveness of *Moringaoleifera* seed as coagulant for water purification. **African Journal of Agricultural Research**, v.4, n.1, p.119-123, 2009.

AQUINO NETO, S; MAGRI, T. C; SILVA, G. M; ANDRADE, A. R. Tratamento de Resíduos de Corante por Eletrofloculação: Um Experimento para Cursos de Graduação em Química. **Química Nova**, v.34, n.8, p.1468-1471, 2011.

ARANTES, C. C.; RIBEIRO, T. A. P.; PATERNIANI, J. E. S.. Processamento de sementes de *Moringa oleifera* utilizando-se diferentes equipamentos para obtenção de solução coagulante. **Rev. bras. eng. agríc. ambient.**, Campina Grande , v. 16, n. 6, jun. 2012 . Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662012000600011&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em 23 ago. 2013.

BACHE, D.H; GREGORY, R. **Flocs in water treatment**. London: IWA Publishing, 2007.

BAËTA, B; AQUINO, S; SILVA, S; RABELO, C. Anaerobic degradation of azo dye Drimaren blue HFRL in UASB reactor in the presence of yeast extract a source of carbon and redox mediator. **Biodegradation**, v.23, n.2, p.199-208, 2012.

BASSIN, J.P.; DEZOTTI, M. **Tratamento primário, secundário e terciário de efluentes**. In: Dezotti, M. Processos e técnicas para o controle ambiental de efluentes líquidos. Rio de Janeiro: E-papers. 360p. Série Escola Piloto de Engenharia Química COPPE/UFRJ. v. 5. 2008.

BASTIAN, E.Y.O. **Guia Técnico Ambiental da Indústria Têxtil**. São Paulo: CETESB – SINDITEXTIL, 2009.

BRAILE, P. M; CALCANTI, J. E. W. A. **Manual de tratamento de águas residuárias industriais**. São Paulo. CETESB, 764p. 1993.

BRITO, J. F; FERREIRA, L. O; SILVA, J. P. Tratamento da Água de Purificação do Biosiesel Utilizando Eletrofloculação. **Química Nova**, v.35, n.4, p.728-732, 2012.

CARMO, D.L. **Tratamento de efluentes têxteis**. SENAI/CETIQT. Rio de Janeiro, RJ,1991.

CERQUEIRA, A. A. Aplicação da técnica de eletrofloculação no tratamento de efluentes têxteis. 2006. 111f. **Dissertação** (Mestrado em Química) - Instituto de Química, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

CERQUEIRA, A. A.; MARQUES, M. R. C. Aplicação do processo eletrolítico em corrente alternada no tratamento de água de produção. **Química Nova**, v.34, n.1, p. 59-63, 2011.

CERQUEIRA, A; RUSSO, C; MARQUES, M. R. C. Electroflocculation For Textile Wastewater Treatment. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v.26, n.4, p.659-668, 2009.

CHEN, G., Electrochemical technologies in wastewater treatment. **Separation and purification Technology**, n. 38, p. 11-41, 2004.

CHU, W. Dye Removal from Textile Dye Wastewater Using Recycled Alum Sludge. **Water Resource**, v.35, n.13, p. 3147-3152, 2001.

CRESPILHO, F. N.; REZENDE, M. O. O. **Eletroflotação: Princípios e Aplicações**.RIMA, São Carlos, 2004.

CRINI, G.; Non-conventional low-cost adsorbents for dye removal: A review. **Bioresource Technology**. Vol 97, p. 1061–1085, 2006.

DANESHVAR, N.; OLADGARAGOZE, A.; DJAFARZADEH, N., Decolorization of basic dye solution by electrocoagulation: An investigation of the effect of operational parameters. **Journal of Hazardous Materials**, n. 129, p. 116-122, 2006.

DI BERNARDO, L. **Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Métodos e técnicas de tratamento de água. Rio de Janeiro: ABES, 1993

EMAMJOMEH, M. M; SIVAKUMAR, M. Review of pollutants removed by electrocoagulation and electrocoagulation/flotation processes. **Journal of Environmental Management**, v.90, n.1, p.1663-1679, 2009.

FLOSS, M. I; CALLEGARO, T. Utilização de eletrodos de sacrifício de ferro na eletrofloculação do efluente de uma indústria têxtil: Avaliação da eficiência de tratamento. 2002. 42f. **Trabalho de Conclusão de Curso** (Curso Superior de Tecnologia em Gestão Ambiental), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2011.

FORNARI, M. M. T. Aplicação da técnica de eletro-floculação no tratamento de efluentes de curtume. 2007. 112 f. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Química) –

Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná. Toledo, 2007.

FRIGHETO, R. S.; FRIGHETO, N.; SCHNEIDER, R. P.; LIMA, P. C. L.. O potencial da espécie *Moringa oleifera* (Moringaceae). A planta como fonte de coagulante natural no saneamento de águas e como suplemento alimentar”. **Revista Fitos**, 3 (2), 2007.

GARG, V.K. *et al.* Basic Dye (Methylene blue) Removal from Simulated Wastewater by Adsorption Using Indian Rosewood sawdust: a timber industry waste. **Dyes and Pigments**, 2004.

GARRIDO, R. J. S., **Alguns Pontos de Referência para o Estágio Atual da Política Nacional de Recursos Hídricos**. O Estado das Águas no Brasil 2001-2002, ANA - Agência Nacional de Águas, 1º ed., 3-15, 2003.

GASSENSCHMIDT, U.; JANY, K.D.; TAUSCHER, B.; NIEBERGALL, H. Isolation and characterization of a flocculating protein from *Moringa oleifera* Lam. **Biochemistry Biophysical Acta**, v.13, p.477-481, 1995.

GHEBREMICHAEL, K. A., GUNARATN, K.R., HENRIKSSON, H., BRUMER, H., DALHAMMAN, G. A simple purification and activity assay of the coagulant protein from *Moringa oleifera* seed. **Water Research**, v.39, p.2338-2344, 2005.

GÓES, N. A. Tratamento e controle de água de piscina. Dossiê Técnico. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, CETEC, 2007.

GONZALEZ-GUTIERREZ, L. V; ESCAMILLA-SILVA, E. M. Reactive red azo dye degradation in a UASB bioreactor: Mechanism and kinetics. **Engineering in Life Sciences**, v.9, n.4, p.311-316, 2009.

GUARANTINI, C. C. I.; ZANONI, M. V. B. Corantes Têxteis. **Química Nova**, n. 23, v.1, p. 71-78, 2000.

GUEDES, C. D. **Coagulação/floculação de águas superficiais de minerações de ferro de turbidez elevada**. Tese de Doutorado, p.159, Departamento de Geografia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto - MG, 2004.

GULYAS, H., Processes for the removal of recalcitrant organics from industrial wastewaters. **Water Science and Technology**, V. 39, p. 1487-1496. 1997.

HARIF, T; ADIN, A. Characteristics of Aggregates Formed by Electroflocculation of a Colloidal Suspension. **Water Research**, v.41, n.13, p.2951-2961, 2007.

HASANBEIGI, A; HASANBEIGI, A; ABDORRAZAGHI, M. Comparison analysis of energy intensity for five major sub-sectors of the Textile Industry in Iran. **Journal of Cleaner Production**, v.23, n.1, p.186-194, 2012.

HASSEMER, M.E.N.; SENS, M.L. **Tratamento do efluente de uma indústria têxtil. Processo físico-químico com ozônio e coagulação/floculação.** Engenharia Sanitária e Ambiental. Vol. 7, 2002.

HOLT, P. K; BARTON, G. W; WARK, M; MITCHELL, C. A. A quantitative comparison between chemical dosing and electrocoagulation. **Colloids and Surfaces**, v.211, n.1, p.233-248, 2002.

INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ – IAP. **Relatórios do SIA – Sistemas de Informações Ambientais.** Cascavel – Pr, 2013.

IMMICH, A. P. S. **Remoção de Corantes de Efluentes Têxteis Utilizando Folhas de Azadirachta Indica como Adsorvente.** Dissertação de Mestrado, UFSC, Florianópolis, 2006.

INOUE, K.R.A. **Produção de biogás, caracterização e aproveitamento agrícola do biofertilizante obtido na digestão da manipueira.** Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Viçosa, 2008.

KANNAN, N; SUNDARAM, M. M. Kinetics and mechanism of removal of methylene blue by adsorption on various carbons—a comparative study. **Dyes and Pigments**, v.51, n.1, p.25-40, 2001.

KAWAMURA, S. Optimization of basic water-treatment processes design and operation: Coagulation and flocculation. **Aqua**, v. 45, n. 1, p. 35-47, 1996.

KIMURA, I. Y., GONÇALVES Jr., A. C., STOLBERG, J., LARANJEIRA, M. C. M., FÁVERE, V. t. Efeito do pH e do tempo de contato na adsorção de corantes reativos por microesferas de quitosana. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. p. 51-57, 1999.

KOPRIVANAC, N.; KUSIC, H.; VUJEVIC, D.; PETERNEL, I.; LOCKE, B. R. Influence of iron on degradation of organic dyes in corona. **Journal of Hazardous Materials**. Vol. 117, p. 113-119, 2005.

KUNZ, A.; ZAMORA, P. P. Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. **Química Nova**, v. 25, p. 78-82, 2002.

LICSKÓ, I. Realistic coagulation mechanisms in the use of aluminium and iron (III) salts. **Water Science Technology**, v. 40, n. 4-5, p. 103-111, 1997.

LIN, S. Water and wastewater calculations manual. **New York: McGraw-Hill**, 2001.

LORENZI, H.; MATOS, F. J. A. Plantas medicinais no Brasil: nativas e exóticas cultivadas. **Nova Odessa**: Instituto Plantarum, 347 p. 2002.

MISHRA, G.; TRIPATHY, M. **Critical review of the treatments for decolourization of textile effluent.** Colourage, 1993.

MESHKO, V; MARKOVSKA, L; MINCHEVA, M; RODRIGUES, A. E. Adsorption of basic dyes on granular activated carbon and natural zeolite. **Water Research**, v.35, n.14, p.3357-3366, 2001.

MÓDENES, A. N.; ESPINOZA-QUIÑONES, F. R.; ALFLEN, V. L.; COLOMBO, A.; BORBA, C. E.; Utilização da macrófitas densa na biosorção do corante reativo 5G. **Revista Engevista**. Vol. 13, p. 160-166, 2011.

MOLLAH, M. Y. A; SCHENNACH, R; PARGA, J. R; COCKE, D. L. Electrocoagulation (EC) science and applications. **Journal of Hazardous Materials**, v.84, n.1, p.29-41, 2001.

MOLLAH, M. Y. A.; MORKOVSKY, P.; GOMES, J. A. G.; KESMEZ, M.; PARGA, J.; COCKE, D. L.; J. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. **Hazard. Mater.** 114, 199. 2004.

MORAES, L. C. K. **Estudo da coagulação-ultrafiltração com o biopolímero quitosana para a produção de água potável**. Dissertação de Mestrado, Pós Graduação em Química, Universidade Estadual do Paraná, Maringá - PR, 2004.

NDABIGENGESERE, A.; NARASIAH, K. S.; TALBOT, B. G. Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera*. **Water Research**, v.29, p.703-710, 1995.

OKUDA, T.; BAES, A. U.; NISHIJIMA, W.; OKADA, M. Improvement of extraction method of coagulation active components from *Moringa oleifera* seed. **Water Research**, v.33, p.3373-3378, 1999.

PASCHOAL, F. M. M; TREMILIOSI-FILHO, G. Aplicação da tecnologia de eletrofloculação na recuperação do corante índigo blue a partir de efluentes industriais. **Química Nova**, v.28, n.5, p.766-772, 2005.

PRITCHARD, M et. Al. A Study of the parameters affecting the effectiveness of *Moringa oleifera* in drinking water purification. **Physics and Chemistry of the Earth**, n.35, p.791-797, 2010.

QUADROS, S.S. **Tratamento de Efluentes Têxteis Gerados nos Tingimentos de Tecidos de Algodão**. Dissertação de Mestrado, FURB, Blumenau, 2005.

RATTMAN, C. et al. Capacitação de instrutores de tratamento de água: Coagulação, Floculação e Decantação. SANEPAR: Curitiba, 124p. 2004.

RESOLUÇÃO CONAMA Nº 430, DE 13 DE maio DE 2011. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>>. Acesso em: 20 de Janeiro de 2015.

ROBINSON, T; McMULLAN, G.; MARCHANT, R.; NIGAM, P. Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. **Bioresource Technology**, v. 77, p. 247-255, 2001.

RODRIGUES, M. B. **Degradação de espécies químicas de relevância ambiental utilizando-se processos oxidativos avançados**. 2001. 125 f. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

RODRIGUEZ, M.; SARRIA, V.; ESPLUGAS, S.; PULGARIN, C. Photo-Fenton treatment of a biorecalcitrant wastewater generated in textile activities: biodegradability of the photo-treated solution. **Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry**, v. 151, n. 1-3, p. 129-135, 2002.

SANTANA, C. R. **Tratamento de Água Produzida Através do Processo de Flotação Utilizando a Moringa oleifera Lam. como Coagulante Natural**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Sergipe, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, São Cristóvão - SE, 2009.

SASSON, M. B; ADIN, A. Fouling Mechanisms and Energy Appraisal in Microfiltration Pretreated by Aluminum-Based Electroflocculation. **Journal of Membrane Science**, v.352, n.1-2, p.86-94, 2010.

SILVA, A. C. L.; WILL, I. B. S.; FILHO, O. B., **Remoção de DQO e de cor através do tratamento eletrolítico**. ABES – XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2000.

SUN, L; MIZNIKOV, E; WANG, L; ADIN, A. Nickel removal from wastewater by electroflocculation-filtration hybridization. **Desalination**, v.249, n.1, p.832-826, 2009.

TEXPAL INDÚSTRIA QUÍMICA. **Boletim técnico do corante Azul Reativo BF 5G**. Valinhos, SP, 2005.

TEXPAL INDÚSTRIA QUÍMICA. **Ficha de informação de segurança de produtos químicos** – FISPQ Revisão A.2008.

VAZ, L.G.L. **Performance do Processo de Coagulação/Floculação no Tratamento do Efluente Líquido Gerado na Galvanoplastia**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná. 2009.

YILDIZ, Y. S; KOPARAL, A. S; KESKINLER, B. Effect of initial pH and supporting electrolyte on the treatment of water containing high concentration of humic substances by electrocoagulation. **Chemical Engineering Journal**, v.138, n.1, p.63-72, 2008.

ZAFRILLA, J. M. G; ESCRIBANO, D. S.; GARCIA, J. L.; HIDALGO, M. C. L.; **Nanofiltration of secondary effluent for wastewater reuse in the textile industry**. *Desalination*. Vol. 222, p. 272–279, 2008.

ZANONI, M. V. B. e CARNEIRO, P. A. **O descarte de corantes**. Revista Ciência Hoje 9, 174, 2001.