

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
ENGENHARIA AMBIENTAL**

**GABRIELA FERNANDA SANDRI**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VARIABILIDADE DA COMPOSIÇÃO  
DO EFLUENTE DE ABATEDOURO E FRIGORÍFICO NA OTIMIZAÇÃO  
DO SEU TRATAMENTO POR ELETROCOAGULAÇÃO**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**MEDIANEIRA**

**2018**

**GABRIELA FERNANDA SANDRI**

**ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VARIABILIDADE DA COMPOSIÇÃO DO  
EFLUENTE DE ABATEDOURO E FRIGORÍFICO NA OTIMIZAÇÃO DO SEU  
TRATAMENTO POR ELETROCOAGULAÇÃO**

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

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Eyng

Co-orientador: Prof. Dr. Laercio Mantovani  
Frare

**MEDIANEIRA**

**2018**



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



---

## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA VARIABILIDADE DA COMPOSIÇÃO DO EFLUENTE DE ABATEDOURO E FRIGORÍFICO NA OTIMIZAÇÃO DO SEU TRATAMENTO POR ELETROCOAGULAÇÃO**

por

**GABRIELA FERNANDA SANDRI**

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado às 13:30h do dia 22 de novembro de 2018, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Ambiental. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Prof. Dr. Eduardo Eyng  
Orientador

---

Prof. Dr. Fabio Orssatto  
Membro titular

---

Prof. Dr<sup>a</sup>. Eliane Colla  
Membro titular

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

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar a Deus, pelo dom da vida e por ter permitido que eu chegasse até aqui para a conclusão de uma etapa primordial na minha vida.

Aos meus pais, Claiton e Rosane, que nunca mediram esforços em toda a minha caminhada acadêmica. Por todo o amor, dedicação e incentivo e por todo o carinho nos momentos em que a saga parecia impossível. A minha irmã Isabela, por todas palavras de conforto, seu apoio e momentos de alegria.

À toda a minha família, que sempre estiverem presentes, torcendo pelas minhas vitórias, que sustentaram o percurso até aqui.

Ao meu namorado, Fabiano, que esteve presente por todos os anos da minha vida acadêmica. Por sua paciência, apoio e incentivo a nunca desistir. Obrigada por todas as conversas e conselhos nos momentos mais difíceis da caminhada.

Ao meu querido orientador, professor Dr. Eduardo Eyng, por toda a sua atenção, dedicação e paciência, sempre disposto a ajudar a qualquer momento. Seus conselhos e conhecimentos partilhados foram determinantes para a conclusão deste trabalho.

Ao meu co-orientador, professor Dr. Laércio Mantovani Frare, e a todo corpo docente do curso de Engenharia Ambiental, por suas contribuições na minha formação profissional.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná, pelo ensino de excelência e por toda a estrutura disponibilizada para a realização de toda a minha pesquisa.

A empresa que sempre esteve de portas abertas e disponibilizou de seus funcionários em todas as coletas necessárias dos efluentes.

Aos meus amigos por sempre torcerem pelo meu desempenho positivo e emanarem energias positivas para que tudo ocorresse da melhor forma possível. E a todos os meus colegas de graduação, pelas parcerias e trocas de conhecimento, e em especial a Carolina e Patrícia, pelos conselhos e apoio nos momentos de dificuldades e angustias.

## RESUMO

SANDRI, Gabriela Fernanda. **Análise da influência da variabilidade da composição do efluente de abatedouro e frigorífico na otimização do seu tratamento por eletrocoagulação**. 2018. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2018.

O crescimento das atividades industriais é constante, e atrelado a isso os impactos ambientais também aumentam. O setor de abate animal e processamento de carne é um potencial consumidor de água, gerando conseqüentemente um grande volume de efluentes líquidos, que possuem alta carga orgânica, presença de gordura, sólidos suspensos e colóides, portanto, é de suma importância o tratamento desses resíduos para a preservação da vida aquática. Neste contexto, a eletrocoagulação é uma técnica promissora para o tratamento de águas residuárias provenientes de abatedouros e frigoríficos. Consiste na imersão de eletrodos metálicos, conectados a uma fonte para a geração de energia elétrica, o que ocasionará reações de oxidação e redução nas placas, essas reações produzirão compostos coagulantes e a formação dos flocos a partir dos sólidos presentes no próprio efluente, esses flocos coagulam até a superfície e podem ser facilmente removidos. Sendo assim, o principal objetivo do trabalho é analisar a influência da variação do efluente a fim de buscar a otimização no sistema de tratamento. O Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) 2<sup>2</sup> foi aplicado para avaliar os efeitos das variáveis tempo de eletrólise e densidade de corrente, e como variável resposta a eficiência de remoção de cor e turbidez. Os ensaios foram realizados com base na matriz elaborada com doze ensaios, sendo quatro nos pontos fatoriais, quatro nos pontos centrais e quatro nos pontos axiais. A eficiência de remoção da cor do primeiro lote de efluente variou entre 60,92 a 77,02% e a eficiência de remoção da turbidez do mesmo lote variou de 65,09 a 83,77%. Para o segundo lote de efluente a eficiência de remoção da cor variou de 64,22 a 87,50% e para turbidez de 51,21 a 71,06%. Tendo em visto que foram avaliados dois lotes de efluentes e ainda a média sobre eles, apenas os fatores do lote 1 e da média se mostraram estatisticamente significativos, e passível da geração do modelo quadrático da eficiência de remoção de cor e turbidez em função do tempo de eletrólise e densidade de corrente. Através da análise de variância (ANOVA), o modelo do lote 1 se mostrou robusto para a faixa de estudo, o modelo das médias também apresentou validade, porém o modelo referente ao lote 2 não se mostrou válido. Superfícies de resposta e curvas de contorno foram geradas, possibilitando estabelecer uma região ótima de condições dos fatores estudados. O teste de validação foi executado estabelecendo-se o ponto crítico para os modelos do lote 1 e da média.

**Palavras-chave:** Eletrocoagulação. Águas residuárias. Processos. DCCR. Otimização.

## ABSTRACT

SANDRI, Gabriela Fernanda. **Analysis of the influence of the variability of slaughterhouse effluent composition in the optimization of its treatment by electrocoagulation.** 2018. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2018.

The growth of industrial activities is constant, but tied to this the environmental impacts also increase. The animal slaughter and meat processing sector is a potential consumer of water, consequently generating a large volume of liquid effluents, which have a great organic load, presence of fat, suspended solids and colloids. Therefore, the treatment of these wastes is of paramount importance for the preservation of aquatic life. In this context, electrocoagulation is a promising technique for the treatment of wastewater from slaughterhouses. It consists of the immersion of metallic electrodes, connected to a source for the generation of electric energy, which will cause oxidation reactions and reduction in the plates, these reactions will produce coagulant compounds and the formation of the flakes from the solids present in the effluent itself, these flakes coagulate to the surface and can be easily removed. Therefore, the main objective of this work is to analyze the influence of the effluent variation in order to seek optimization in the treatment system. The Rotational Central Compound Design (DCCR)  $2^2$  was applied to evaluate the effects of electrolysis time and current density variables, and as variable response to color removal and turbidity efficiency. The tests were performed based on the matrix elaborated with twelve tests, four in factorial points, four in central points and four in axial points. The color removal efficiency of the first batch of effluent ranged from 60.92 to 77.02% and the turbidity removal efficiency of the same batch ranged from 65.09 to 83.77%. For the second batch of effluent the color removal efficiency ranged from 64.22 to 87.50% and for turbidity from 51.21 to 71.06%. Taking into account that two batches of effluents were evaluated and the average of them, only the factors of lot 1 and the mean were statistically significant, and capable of generating the quadratic model of the color removal and turbidity efficiency as a function of time of electrolysis and current density. Through variance analysis (ANOVA), the model of lot 1 was robust for the study range, the model of the means was also valid, but the model for lot 2 was not valid. Response surfaces and contour curves were generated, making it possible to establish an optimal region of conditions of the factors studied. There was a good removal on the tracks. The validation test was performed establishing the critical point for the lot 1 and average models.

Keywords: Electrocoagulation. Wastewater. Processes. RCCD. Optimization.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Interações físico-químicas dentro do reator de eletrocoagulação.....	18
Figura 2 - Fluxograma da estação do sistema de tratamento de efluentes.....	25
Figura 3- Efluente bruto.....	26
Figura 4 – Célula de eletrocoagulação.....	27
Figura 5 - Célula de eletrocoagulação em funcionamento.....	28
Figura 6 - Fluxograma etapas do processo.....	30
Figura 7- Fluxograma etapas do processo com base nas médias das variáveis.....	31
Figura 8 - Efluente após os ensaios de eletrocoagulação.....	35
Figura 9 - Superfície de resposta, onde $x_1$ e $x_2$ referem-se aos valores codificados dos tempos de eletrólise e das densidades de corrente, respectivamente.....	40
Figura 10 - Curva de contorno, onde $x_1$ e $x_2$ referem-se aos valores codificados dos tempos de eletrólise e das densidades de corrente respectivamente.....	40
Figura 11 - Superfície de resposta, onde $x_1$ e $x_2$ referem-se aos valores codificados dos tempos de eletrólise e das densidades de corrente, respectivamente.....	44
Figura 12- Curva de contorno, onde $x_1$ e $x_2$ referem-se aos valores codificados dos tempos de eletrólise e das densidades de corrente respectivamente.....	44
Figura 13 - Superfície de resposta, onde $x_1$ e $x_2$ referem-se aos valores codificados dos tempos de eletrólise e das densidades de corrente, respectivamente.....	49
Figura 14 - Curva de contorno, onde $x_1$ e $x_2$ referem-se aos valores codificados dos tempos de eletrólise e das densidades de corrente respectivamente.....	49
Figura 15 - Superfície de resposta, onde $x_1$ e $x_2$ referem-se aos valores codificados do tempo de eletrólise e da densidade de corrente, respectivamente, para a média dos valores na remoção de turbidez.....	54
Figura 16 - Curva de contorno, onde $x_1$ e $x_2$ referem-se aos valores codificados dos tempos de eletrólise e da densidade de corrente, respectivamente, para a média dos valores na remoção de turbidez.....	54

## LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 - Matriz de ensaio com os valores codificados .....	32
Tabela 2 – Valores reais das condições de experimento .....	32
Tabela 3 - Valores de cor e turbidez antes e após os ensaios efluente lote 1 .....	33
Tabela 4 - Valores de cor e turbidez antes e após os ensaios efluente lote 2 .....	34
Tabela 5 - Remoção de cor e turbidez para as diferentes condições do DCCR – lote 1 .....	35
Tabela 6 - Remoção de cor e turbidez para as diferentes condições do DCCR – lote 2 .....	36
Tabela 7 - Análise da variância para remoção da cor (%) – lote 1.....	37
Tabela 8 - Análise da variância para remoção da cor (%) – lote 1.....	38
Tabela 9 - Efeito dos fatores estudados no DCCR 1 para remoção da cor (%) – lote 1 .....	38
Tabela 10 - ANOVA do modelo quadrático para predição da remoção da cor (%) – lote 1.....	39
Tabela 11 - Análise da variância para remoção da turbidez (%) – lote 1 .....	41
Tabela 12 - Análise da variância para remoção da turbidez (%) – lote 1 .....	42
Tabela 13 - Efeito dos fatores estudados no DCCR 1 para remoção da turbidez (%) .....	42
Tabela 14 - ANOVA do modelo quadrático para predição da remoção da turbidez (%) – lote 1 .....	43
Tabela 15 - Análise da variância para remoção da cor (%) – lote 2.....	45
Tabela 16 - ANOVA do modelo quadrático para predição da remoção da cor (%) – lote 2.....	46
Tabela 17 - Análise da variância para remoção da turbidez (%) – lote 2.....	46
Tabela 18 - Análise da variância para remoção da turbidez (%) – lote 2.....	47
Tabela 19 - Efeito dos fatores estudados no DCCR 2 para remoção da turbidez (%) .....	47

Tabela 20 - ANOVA do modelo quadrático para predição da remoção da turbidez (%) – lote 2.....	48
Tabela 21 - Análise da variância para remoção da cor (%) – médias.....	50
Tabela 22 - ANOVA do modelo quadrático para predição da remoção da cor (%) – média.....	50
Tabela 23 - Análise da variância para remoção da turbidez (%) – médias .....	51
Tabela 24 - Análise da variância para remoção da turbidez (%) – médias .....	52
Tabela 25 - ANOVA do modelo quadrático para predição da remoção da turbidez (%) – médias .....	52
Tabela 26 - ANOVA do modelo quadrático para predição da remoção da turbidez (%) - médias .....	53
Tabela 27 - Condições para os ensaios de validação .....	57
Tabela 28 - Valores preditos para a condição 1 .....	57
Tabela 29 - Valores preditos para a condição 2 .....	57
Tabela 30 - Resultados obtidos para a condição 1 .....	58
Tabela 31 - Resultados obtidos para a condição 2.....	58

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	11
1.1 OBJETIVOS.....	13
1.1.1 Objetivo Geral .....	13
1.1.2 Objetivos Específicos .....	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 EFLUENTES INDUSTRIAIS.....	14
2.1.1 Efluentes originários de abatedouros e frigoríficos .....	15
2.1.2 Parâmetros físico-químicos .....	16
2.2 ELETROCOAGULAÇÃO NO TRATAMENTO DE EFLUENTES .....	17
2.2.1 Etapas e reações envolvidas no processo de eletrocoagulação.....	18
2.3 VARIABILIDADE NOS PROCESSOS INDUSTRIAIS.....	21
2.3 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS .....	22
2.3.1 Delineamento Composto Central Rotacional .....	23
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	24
3.1 ORIGEM DAS AMOSTRAS .....	24
3.2 SISTEMA EXPERIMENTAL.....	26
3.1.2 Ensaio de Eletrocoagulação .....	26
3.2.1 Análise de cor e turbidez .....	28
3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	29
3.2.1 Etapas para otimização do processo.....	29
3.2.2 Delineamento Composto Central Rotacional .....	31
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	33
4.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA .....	37
4.1.1 Remoção cor: efluente lote 1.....	37
4.1.2 Remoção turbidez: efluente lote 1 .....	41
4.1.3 Remoção de cor: efluente lote 2.....	45

4.1.4 Remoção da turbidez: efluente do lote 2 .....	46
4.1.5 Remoção da cor - Média entre os efluentes do lote 1 e 2.....	50
4.1.6 Remoção da turbidez - Média entre os efluentes do lote 1 e 2 .....	51
4.2 VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL .....	56
5 CONCLUSÃO .....	59
REFERÊNCIAS .....	60

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda industrial, principalmente no ramo de alimentos processados, apresenta como consequência negativa a grande geração de resíduos sólidos e/ou líquidos. Sendo na maioria das vezes potenciais poluidores aos cursos hídricos, e diante disso devem receber tratamento apropriado antes do seu lançamento.

O Brasil abate anualmente em média 43 milhões cabeças de suínos, o que gera uma produção de 3,8 milhões toneladas de carne (SEAB, 2018). Porém esses tipos de processos consomem elevadas quantidades de água e conseqüentemente geram um grande volume de efluentes líquidos. Segundo Pacheco (2008) a água é utilizada em grande parte do processo, como no consumo e lavagem do animal, lavagem dos caminhões, escaldagem e toilette para os suínos, lavagem das carcaças, vísceras e intestinos, movimentação de subprodutos e resíduos, limpeza e esterilização de facas e equipamentos, limpeza de pisos, paredes e bancadas, geração de vapor e resfriamento de compressores.

O efluente de frigoríficos e abatedouros caracterizam-se por possuírem elevada carga orgânica, pela presença de sangue, gordura, esterco e conteúdo estomacal e intestinal, há também uma grande quantidade de sólidos suspensos responsáveis pela cor e colóides responsáveis pela turbidez do efluente.

Tendo em vista, que as normas e legislações ambientais vigentes que relacionam parâmetros de lançamento em corpos receptores, como por exemplo a resolução CONAMA 430/11 e CONAMA 357/05, estão cada vez mais rigorosas, é de extrema importância a presença de um sistema de tratamento para esse tipo de água residuária.

Para se alcançar eficiência de remoção dos parâmetros exigidos pelas legislações, muitas técnicas de tratamento podem ser utilizadas. Existe uma vasta gama de técnicas que podem ser aplicadas, como por exemplo os tratamentos biológicos, a coagulação química, carvão ativado, filtração por membranas, a eletroquímica, entre outras.

Neste contexto, a eletrocoagulação se apresenta com uma boa alternativa para esse tipo de água residuária. Ela é caracterizada pela fácil operação, baixa produção de lodo e não se faz necessária a utilização de produtos químicos, e demanda pouco

tempo de funcionamento, compondo um sistema compacto. Ela consiste na imersão de eletrodos metálicos, conectados a uma fonte para a geração de uma corrente elétrica que passará pelos eletrodos e originará reações de oxidação (geração de íons metálicos e a formação de hidróxidos) e redução. Essas reações produzirão compostos coagulantes que formarão flocos a partir dos sólidos suspensos do próprio efluente. Essas partículas ficarão submersas na superfície, provocando o clareamento do líquido (MOLLAH *et al*, 2000; HOLT *et al*, 2002).

Os efluentes industriais podem apresentar oscilações nas suas características, tudo dependerá da operação que está sendo realizada, da variação da matéria-prima, ou ocorrência de limpeza e sanitização. As variações podem ocorrer também, devido à complexidade em relação a composição química e à forma que se apresentam os poluentes. Portanto, é inevitável a presença das variações nos efluentes industriais.

Essas variações podem ocasionar a ineficiência do sistema de tratamento adotado, pois as mesmas condições podem ser eficientes em um determinado momento, porém não alcançar a mesma eficiência em outro momento.

Devido a essa variabilidade, a modelagem empírica apresenta-se como uma boa alternativa para realização das análises. Ela tem como finalidade analisar modelos pré-concebidos, parametrizando a partir de observações diretas de dados obtidos no processo. Ela se baseará apenas nas relações de causa-efeito correlacionando os dados de entrada e saída do processo e dependerá de cada amostra a ser analisada.

Diante desta problemática, o referido estudo tem como objetivo principal minimizar a influência da variabilidade do efluente proveniente de abatedouro e frigoríficos, na remoção da cor e turbidez, incorporando essa variação nos modelos matemáticos podendo chegar a otimização do processo.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a influência da variabilidade da composição do efluente de um abatedouro e frigorífico na otimização da remoção de cor e turbidez através da eletrocoagulação.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Remover cor e turbidez de efluente anaeróbio de Frigorífico e Abatedouro de Suínos de amostras diferentes por meio da eletrocoagulação;
- Obter modelos matemáticos empíricos, utilizando Delineamento Central Composto Rotacional, para a eficiência da remoção de cor e turbidez em função da densidade de corrente e o tempo de eletrólise;
- Realizar análise estatística dos dados experimentais de modo a inserir no modelo matemático a variabilidade inerente aos processos industriais.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 EFLUENTES INDUSTRIAIS

Segundo a NBR 9800 de 1987, os efluentes de processos industriais são considerados os despejos líquidos provenientes das áreas de processamento industrial, incluindo os originados nos processos de produção, as águas de lavagem de operação de limpeza e outras fontes. O efluente industrial é, em geral, a fusão das diversas correntes decorrentes das diferentes unidades do processo produtivo. A vazão e as características podem apresentar significativa variação ao longo do tempo, em função de mudanças de operação dos processos, de produto processado, de atividade de limpeza e etc. Outra característica recorrente das águas residuárias industriais é a complexidade, no que se refere a composição química e à forma como se apresentam os poluentes. Portanto, a variabilidade e a complexidade estarão sempre presentes nos efluentes industriais (CAMMAROTA, 2011).

As características físicas, químicas e biológicas do efluente industrial varia de acordo com o tipo de indústria, com o período de operação, com a matéria-prima utilizada, com a reutilização de água entre outros. Diante disso, o efluente pode ser solúvel ou com sólidos em suspensão, apresentar ou não uma coloração específica, orgânico ou inorgânico, com temperatura baixa ou elevada (CIMM, 2018). Os efluentes industriais sofrem grandes variações quanto a sua composição e concentração, pois a diversidade industrial é ampla, podendo ocorrer grandes variações até mesmo em indústrias do mesmo ramo, devido a variabilidade de matérias primas (PORTAL TRATAMENTO DE ÁGUA, 2016).

Quando se trata do tratamento desses efluentes, dois enfoques são bastante difundidos, o *End of pipe*, o qual considera que o efluente é o que é e deve-se inevitavelmente obter técnicas de tratamento, que atendam os padrões de descarte em vigor. E *In-plant design*, essa definição considera que o efluente é o resultado de uma série de procedimentos industriais, que ainda podem ser analisados, revistos e otimizados, onde poderá reduzir os custos no sistema de tratamento (CAMMAROTA, 2011).

### 2.1.1 Efluentes originários de abatedouros e frigoríficos

Os despejos de abatedouros possuem altos valores de DBO e DQO, além dos sólidos em suspensão, graxas e material flotável. Além de possuírem uma elevada carga orgânica pela presença de sangue, gordura, esterco, conteúdo estomacal, flutuações de pH em função do uso de agentes de limpeza ácidos e básicos, grandes quantidades de nitrogênio, fósforo, sal e flutuações na temperatura pelo uso de água quente e fria (PACHECO, 2008). Bazrafshan *et al*, 2012 após caracterizar águas residuárias provenientes de matadouros, também constatou que os valores apresentados para COD, DBO<sub>5</sub>, indicadores microbianos e a concentração de óleos e graxas são extremamente elevados.

Os efluentes de abatedouros e frigoríficos na sua maioria, não apresentam resíduos perigosos, pois são constituídos basicamente de matéria orgânica, desta forma, as diferentes maneiras de tratamento utilizadas não necessitam de sistemas complexos e de custos elevados (SCARASSATI *et al*, 2003).

A variabilidade presente nos efluentes líquidos da indústria de processamento de carne pode estar atrelada por cada processo gerar um efluente líquido específico. De acordo com Pacheco, 2006, ao produzir carne enlatada, por exemplo, a operação de cozimento da carne pode ser feita pelo seu contato direto com água quente ou vapor, isto produzirá águas residuais contendo gordura, proteína e fragmentos de carne. A lavagem das latas também produzirá efluente com carga orgânica. A operação de defumação em si não gera efluente, porém se a indústria possuir um sistema de lavagem de gases, ou nas operações de limpeza nessas instalações, agregará ao efluente, hidrocarbonetos poli-aromáticos, fenóis, nitritos e etc. Deve-se levar em conta também as operações de limpeza e sanitização que acrescentam ao efluente substâncias derivadas de detergentes e sanitizantes (PACHECO, 2006).

Segundo Pacheco 2008, os processos mais utilizados para tratamento de efluentes frigoríficos, variam de acordo com cada indústria, mas seguem as seguintes etapas: O tratamento primário, que serve para a remoção de sólidos grosseiros, suspensos, sedimentáveis e flotáveis; O tratamento secundário que é indicado na remoção de sólidos coloidais através de bactérias anaeróbias e aeróbias; E por fim o

tratamento terciário, que dependerá da composição do efluente, e consiste na remoção de sólidos, nutrientes e organismos patogênicos.

### 2.1.2 Parâmetros físico-químicos

A análise da eficiência de um sistema de tratamento dependerá dos parâmetros a serem utilizados. Por meios desses parâmetros, pode-se avaliar a qualidade dos efluentes industriais, antes e após o tratamento. Se torna possível identificar quais impactos ambientais poderão ser gerados com o lançamento desse efluente em um corpo receptor e mensurar a eficiência que se obteve pela aplicação de certo tratamento, sendo ele um tratamento convencional ou não, com a eletrocoagulação (THEODORO, 2010).

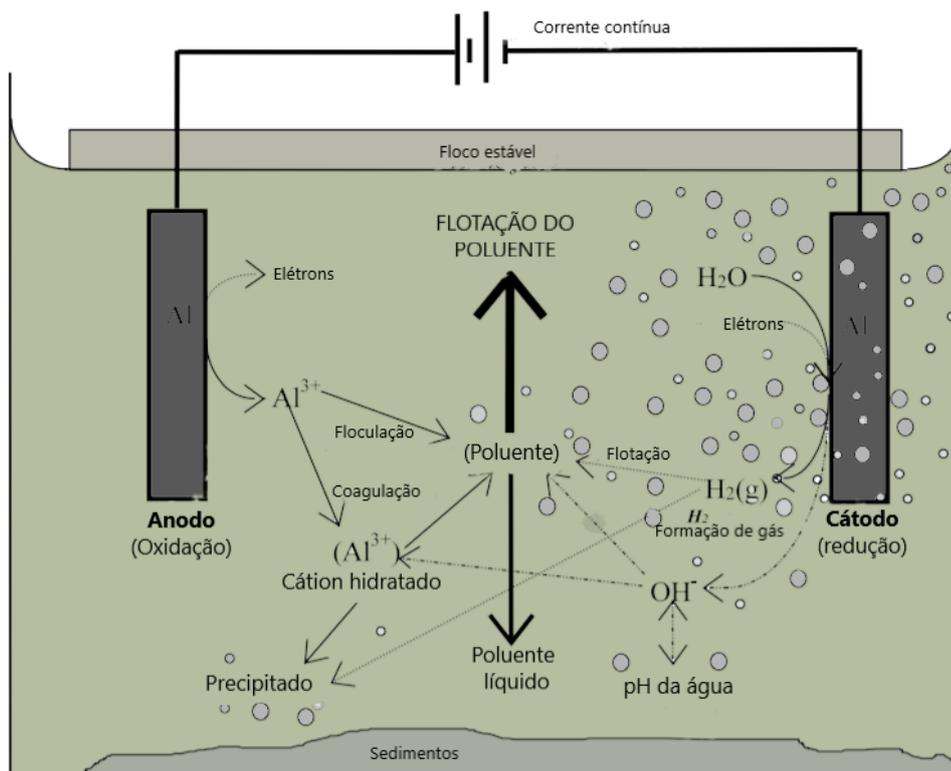
## 2.2 ELETROCOAGULAÇÃO NO TRATAMENTO DE EFLUENTES

A eletrocoagulação tem como base os princípios dos processos eletroquímicos, baseando-se nos fenômenos da eletrólise como processo de tratamento (FLECK, 2011). É um mecanismo totalmente dependente da química do meio aquoso, especialmente da condutividade (CERQUEIRA, 2006).

É um processo que necessita de uma corrente elétrica, que envolvem reatores eletroquímicos, que geram coagulantes *in situ*, através da oxidação eletrolítica de um material apropriado no ânodo (GOBBI, 2013). O princípio de funcionamento do processo eletrolítico consiste na aplicação de um potencial elétrico a uma solução aquosa, utilizando como transmissor eletrodos de sacrifício metálicos. A dissolução deste metal irá ocorrer gerando íons e gases de oxigênio e hidrogênio, onde formam reações de coagulação/floculação apropriadas para o tratamento de efluentes industriais (CRESPILHO et al., 2004 apud MORES 2013).

A geração eletroquímica do agente coagulante é essencial para que a coagulação ocorra de maneira controlada e eficiente. Ao se utilizar alumínio como eletrodo de sacrifício, são gerados os íons  $Al^{+3}$  pela aplicação de um potencial elétrico (DE MENESES *et al*, 2012). Quando os eletrodos são conectados a uma fonte de corrente elétrica polarizada externa, as reações de oxidação ocorrem no ânodo, enquanto as reações de redução acontecem no cátodo, como visto na Figura 1.

Além de formar o agente coagulante, a eletrocoagulação pode gerar microbolhas de gases ( $H_2$ ,  $O_2$ ), que são formadas na superfície dos eletrodos. Estes gases quando em contato com os compostos particulados favorecem o deslocamento dos mesmos para superfície e posteriormente são removidos (MORES, 2013).



**Figura 1 - Interações físico-químicas dentro do reator de eletrocoagulação**

Fonte: HOLT *et al*, 2001, adaptado

Após estudos, De Meneses, 2012, concluiu que do ponto de vista ambiental, a eletrocoagulação apresenta-se como uma técnica muito promissora, pois visualmente o efluente foi melhorado.

### 2.2.1 Etapas e reações envolvidas no processo de eletrocoagulação

De acordo com Gobbi, 2013, essa técnica ocorre em três etapas sucessivas: eletrocoagulação, eletrofloculação e a flotação das impurezas ou eletroflotação. Mollah, 2001 resumiu essas etapas da seguinte forma:

1. Compressão da dupla camada difusa em torno das espécies carregadas, ocorrido através das interações de íons gerados pela dissolução do eletrodo de sacrifício, pela passagem de corrente na solução.

2. Neutralização de carga das espécies iônicas presentes no efluente, causada pelos contra-íons, produzidos pela dissolução eletroquímica de eletrodo de sacrifício. Eles reduzem a repulsão entre as partículas eletrostáticas fazendo com que a atração Van Der Waals predomine, ocasionando a coagulação e gera como resultado uma carga líquida nula no processo.
3. A formação dos flocos, resultado da coagulação, criam uma manta de lodo que aprisiona e une as partículas coloidais quem não foram complexadas.

O alumínio e o ferro são os metais mais utilizados para a clarificação das águas residuais, e suas reações estão descritas a seguir (MOLLAH *et al*, 2001):

a) Reações do alumínio

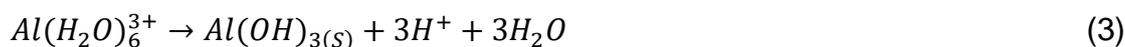
Oxidação do Al sólido (reação anódica)



Solvatação do cátion formado



Formação do agente coagulante



Reações secundárias

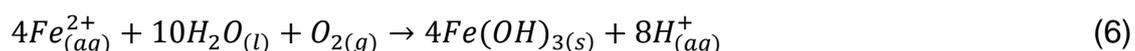


b) Reações do ferro

O ferro se oxida através do processo eletrolítico, gerando hidróxido de ferro (CERQUEIRA, 2006).

Mecanismo 1

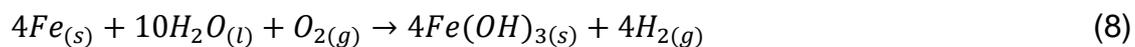
Anodo:



Catodo:

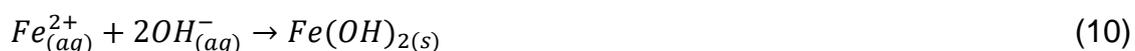


Reação global:



Mecanismo 2

Anodo:



Catodo:



Reação global:



O  $Fe(OH)_n$  formado, permanece no fluxo aquoso na forma de uma suspensão gelatinosa, que pode remover os poluentes presentes nas águas residuárias através da complexão ou por atração eletrostática seguido por coagulação (MOLLAH, *et al*, 2001; CRESPILO; REZENDE, 2004 *apud* GOBBI, 2013).

### 2.3 VARIABILIDADE NOS PROCESSOS INDUSTRIAIS

Em um contexto geral, a variabilidade sempre estará presente em qualquer processo produtivo, mesmo que sejam operados da melhor maneira. Comparando duas unidades produtivas do mesmo processo, elas jamais serão exatamente iguais (RIBEIRO; TEN CATEN, 2012).

A variabilidade é definida genericamente como uma oscilação da média ou de um ponto ideal do processo, que está presente em todos os sistemas de produção. Representa a variação das saídas e entradas, que é a função da variabilidade das entradas (MONTGOMERY, 1999 apud CARNEIRO, 2017).

É possível classificar as causas de variação nos processos em dois grupos: as causas de variação comum (não assinaláveis), que são consideradas como causas aleatórias e inevitáveis, portanto, seguem uma distribuição normal, e as causas especiais (assinaláveis), elas ocorrem por motivos claramente identificáveis e que podem ser eliminados, podem ainda alterar os parâmetros do processo, media e desvio padrão, pois estão fora do limite de controle. (MARTINS, 2012).

Quanto menor a variabilidade de um produto ou serviço, melhor será sua qualidade. Segundo Ribeiro e Ten Caten, 2012, cada produto possui um número de elementos que, em conjunto, descrevem sua adequação ao uso. Geralmente são denominados como características da qualidade ou indicadores de desempenho.

Segundo Montgomery, 2012, reduzir a variabilidade de um processo é essencial para a melhoria no desempenho do processo em todas as indústrias.

Em resumo, o controle estatístico de processo, identifica toda a variabilidade de um processo, tornando possível o controle dessa variabilidade ao longo do tempo através da coleta de dados continuada, análise e bloqueio de possíveis causas especiais que estejam tornando o sistema instável (RIBEIRO; TEN CATEN, 2012).

## 2.3 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Empregar o planejamento de experimentos, com base nos fundamentos estatísticos, é uma ótima alternativa para se avaliar os efeitos ou impactos que os fatores têm nas respostas desejadas, a fim de alcançar a otimização do processo. (RODRIGUES; IEMMA, 2009).

Para um planejamento de experimentos, é de grande importância a presença das variáveis e fatores de estatística. As variáveis exercem fatores de relacionamento essenciais ao planejamento experimental pretendido. Sistemas em estudos podem ser influenciados por diversos fatores, sendo que os mesmos podem se relacionar de alguma maneira ou não. Os relacionamentos podem estar ocultos ao pesquisador, diferentemente do resultado observado. Por isso, é importante observar um grande número de fatores que envolvem as condições operacionais, as condições ambientais e ou fenômenos de transferência que dificultam a análise das respostas fornecidas durante a realização do experimento (BARROS NETO, 2001).

Barros Neto enfatiza que após a determinação dos fatores que irão influenciar significativamente o processo, é possível elaborar os modelos empíricos. Eles descrevem, com base nos resultados experimentais, como o processo em questão se comporta.

Escolher a melhor estratégia do planejamento experimental depende principalmente do número de variáveis independentes ou dos fatores que se deseja estudar. Portanto, a análise dos efeitos como informação inicial, apresenta uma sequência, que leva desde os novos fatoriais fracionados até se chegar ao completo, atingindo-se as condições desejadas (RODRIGUES; IEMMA, 2009).

Validar um experimento, depende, totalmente de como o experimento foi conduzido. Portanto um planejamento de experimentos desenvolveu um papel crucial na solução futura do problema que inicialmente motivou o experimento (MONTGOMERY, 2012).

As vantagens em se utilizar um planejamento experimental são várias. Reduz o número de experiências ou repetições, melhorando a qualidade das informações obtidas através dos resultados. Os fatores são analisados simultaneamente, desta forma pode-se verificar e quantificar os efeitos sinérgicos e antagônicos entre os fatores de interesse. Torna-se possível otimizar várias respostas ao mesmo tempo. É

possível maximizar variáveis como rendimento e produtividade e minimizar várias para custos ou contaminação, de maneira individual ou simultaneamente. Permite calcular e avaliar o erro experimental, fundamental para especificar os níveis de confiança estatística, na ideia de estimar a reprodutibilidade do resultado desejado. É desejável saber, se ao repetir o processo várias vezes, o seu comportamento será semelhante, variando segundo um erro experimental esperado, de modo a assegurar a estabilidade do processo (RODRIGUES; IEMMA, 2009).

### 2.3.1 Delineamento Composto Central Rotacional

Escolher um planejamento adequado é diretamente ligado ao número de variáveis independentes envolvidas no estudo, da disponibilidade de matéria-prima, do número de ensaios que poderão ser executados e do custo do processo em estudo. Porém, estabelece-se um número mínimo dos ensaios que devem ser realizados conforme o número de fatores que se deseja estudar. No caso de ser 2 ou 3 variáveis independentes, recomenda-se um delineamento composto central rotacional (DCCR) (RODRIGUES; IEMMA, 2009).

A região de estudo do DCCR é mais ampla se comparada com o planejamento experimental fatorial. Porém, é importante ter a possibilidade de repetir os ensaios para que seja possível o cálculo do erro experimental. É possível também elaborar um modelo matemático, o qual poderá ser validado estatisticamente e utilizado para obtenção da superfície da resposta por meio desta análise e obtenção das condições otimizadas (RODRIGUES; IEMMA, 2009). Ao executar um Delineamento Composto Central Rotacional, é possível se obter uma equação de primeiro ou segundo grau, que gerará uma superfície resposta da variável dependente, em função das variáveis independentes. A partir desta equação é possível determinar a região ótima de operação para as variáveis analisadas (ALGERI, *et al*, 2017).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 ORIGEM DAS AMOSTRAS

As amostras foram coletadas em um sistema de tratamento de águas residuárias de um abatedouro e frigorífico de suínos, localizado no Oeste Paranaense. Três lotes desse efluente foram coletadas, a primeira coleta foi realizada no dia 03 de outubro de 2018, a segunda no dia 30 de outubro de 2018, e a última coleta no dia 06 de novembro de 2018.

A unidade produtiva recebe suínos que serão abatidos, desossados e industrializados. O efluente líquido gerado a partir desses processos é segregado em duas linhas de tratamento, a verde que é composta basicamente pelo esterco dos animais, e a vermelha que abrange todo o efluente industrial gerado a partir do corte e processamento da carne e da limpeza em geral. As duas linhas são encaminhadas para o tratamento preliminar e primário. Então, elas se unem e seguem para o tratamento secundário, composto por lagoas de estabilização em série, sendo duas lagoas anaeróbias, uma lagoa aerada de mistura completa e uma lagoa de decantação. O sistema finaliza com um pós-tratamento físico-químico (CALDEIRO, 2015). O efluente utilizado para as análises foi coletado da saída da lagoa anaeróbia II e mantido congelado até a realização dos ensaios. O fluxograma, representado na figura 2, apresenta as etapas de tratamento e indica o ponto de coleta do efluente.

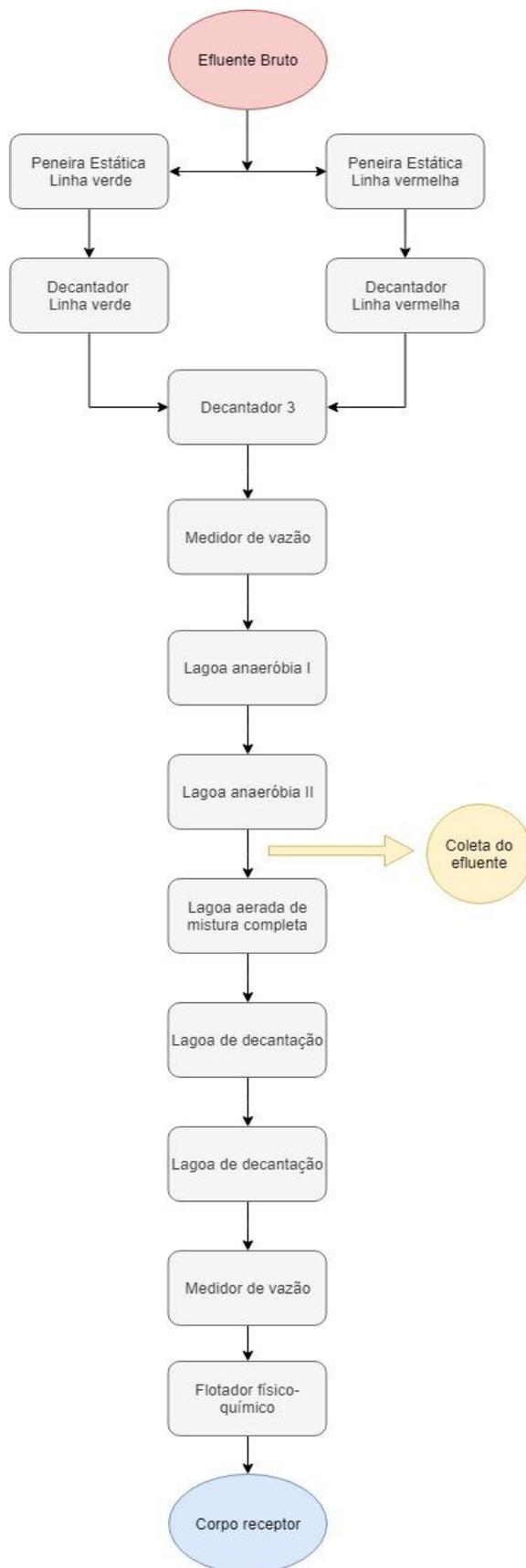


Figura 2 - Fluxograma da estação do sistema de tratamento de efluentes

Fonte: Caldeiro 2015, adaptado

## 3.2 SISTEMA EXPERIMENTAL

### 3.1.2 Ensaio de Eletrocoagulação

Os devidos ensaios foram realizados nas dependências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Medianeira, no Laboratório de Otimização, Controle e Simulação de Sistemas de Tratamento de Efluentes (LOCOSTE).

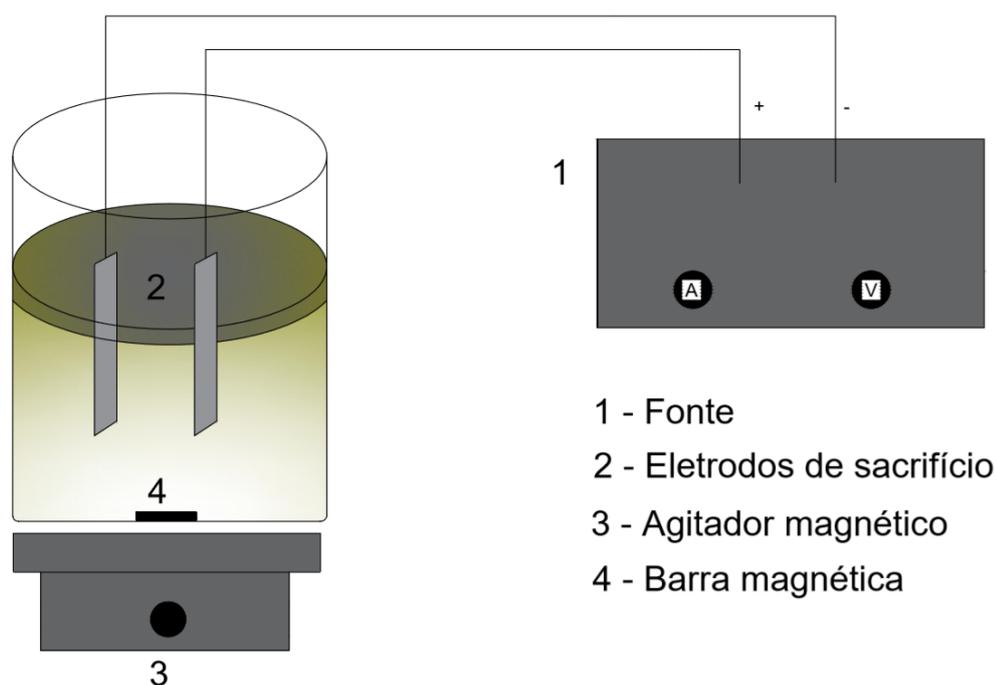
O sistema de tratamento por eletrocoagulação foi constituído por um reator batelada de bancada, composto por um béquer com capacidade para 2 L e um agitador magnético. O próprio béquer serviu como apoio para a disposição dos eletrodos de sacrifício de alumínio, os quais foram conectados uma fonte de alimentação DC POWER SUPPLY FA-3005. O efluente a ser tratado (1,5 L) foi transferido dentro do béquer, sua temperatura foi ajustada a aproximadamente 25°C, como observa-se na Figura 3.



**Figura 3– Efluente bruto**

Fonte: autoria própria

O esquema da figura 4, exemplifica a disposição do sistema de tratamento.

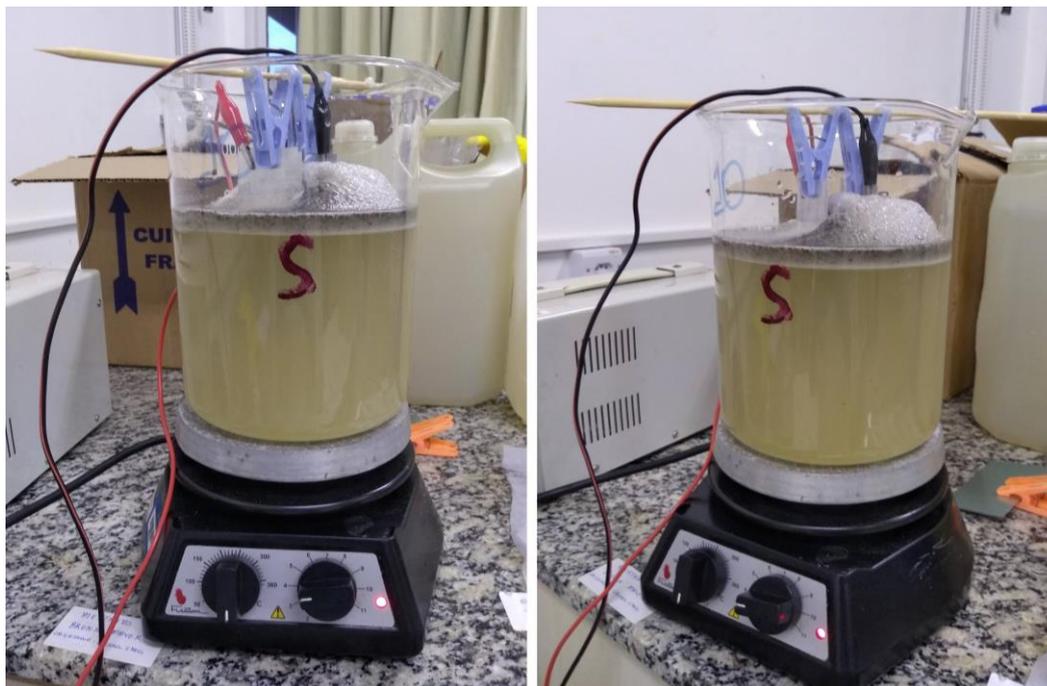


**Figura 4 – Célula de eletrocoagulação**

Fonte: autoria própria

A distância entre os eletrodos foi de 3 cm, e 35 cm<sup>2</sup> ficaram submersos no efluente. Por ocorrer a oxidação e redução no ânodo e no cátodo devido as reações eletroquímicas, houve a alternância dos polos negativo e positivo a cada ensaio realizado. O sistema foi submetido a agitação branda e constante. Na Figura 5 é possível observar a célula de eletrocoagulação em funcionamento, cada ensaio tinha um tempo de eletrólise e uma densidade de corrente, estabelecidos na matriz de ensaio através de testes preliminares. Após cada ensaio, o béquer era deixado em repouso por 15 minutos e então a coleta do efluente tratado era realizada, o líquido era coletado no centro do béquer por meio de uma seringa adaptada com uma mangueira.

Em seguida novas análises de cor e turbidez eram realizadas, a fim de se obter a eficiência de remoção.



**Figura 5 - Célula de eletrocoagulação em funcionamento**

Fonte: autoria própria

### 3.2.1 Análise de cor e turbidez

A fim de se obter a eficiência de remoção em relação a cor e turbidez do efluente, leituras de cor e turbidez foram realizadas tanto no efluente bruto, como no efluente após o tratamento.

Para a medida da cor, foi utilizado o Espectrofotômetro modelo DR 2800, em comprimento de onda de 455 nm. As medidas de turbidez foram feitas utilizando o equipamento Turbidímetro de bancada AP 2000 w. A leitura da turbidez foi realizada na unidade de UNT (Unidade Nefelométrica de Turbidez).

## 3.2 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

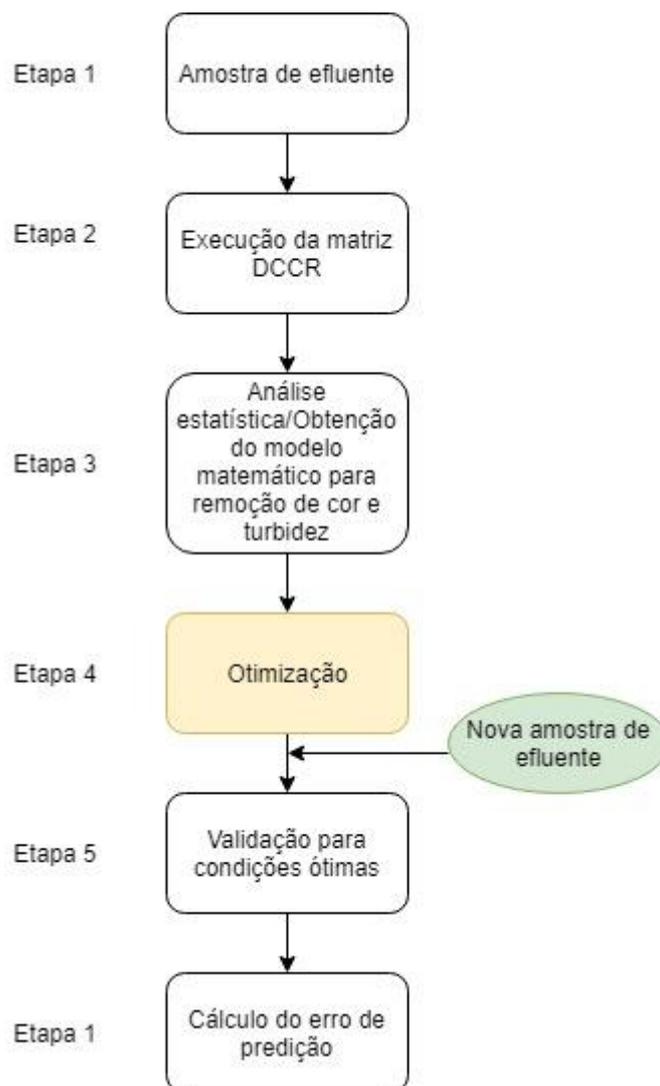
### 3.2.1 Etapas para otimização do processo

Antes da execução dos ensaios, e das análises estatísticas, uma estratégia sequencial para se atingir as condições otimizadas foi elaborada.

A etapa 1 representa as coletas das amostras do efluente, que foram realizadas em dias diferentes. Então as variáveis independentes e dependentes de estudo, foram definidas. Como são 2 variáveis independentes a serem analisadas, um fatorial completo foi realizado. A etapa 2 consiste na execução da matriz do DCCR, que conta com 12 ensaios. A matriz do delineamento experimental foi executada duas vezes de forma independente, primeiramente os doze ensaios foram realizados para as amostras de efluente do lote 1, e suas eficiências de remoção obtidas. Posteriormente a matriz foi executada novamente com amostras do efluente do lote 2, e da mesma maneira as eficiências de remoção foram calculadas. Na etapa 3 foram analisados estatisticamente os dados obtidos, com os cálculos dos efeitos das variáveis e os respectivos erros. Sequencialmente foram avaliados os modelos preditivos das respostas em função das variáveis independentes, e a realização da ANOVA para verificar a qualidade de ajuste do modelo.

A etapa 4 compreende a otimização do processo, onde foram geradas as superfícies de resposta e as curvas de contorno que auxiliaram na análise e definição das faixas ótimas operacionais de cada variável do processo. E então o cálculo das respostas através do modelo ajustado e os desvios entre a resposta experimental e a estimada pelo modelo.

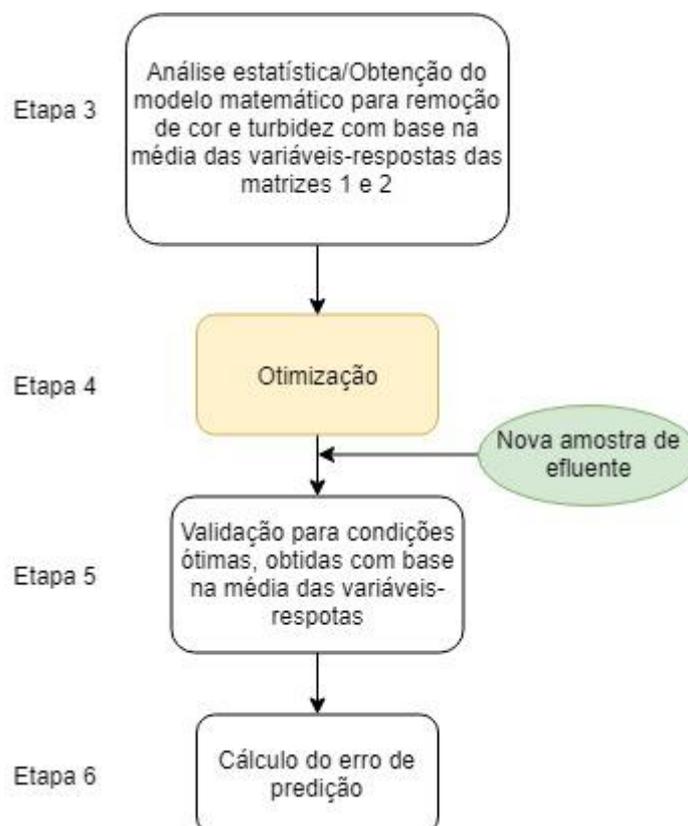
Na etapa 5, com um terceiro lote de efluente, ocorreu a validação experimental dos modelos. Com base nos modelos gerados nas etapas anteriores, foram definidas duas condições para os ensaios de validação, que por sua vez, foram executados em triplicata, seguindo-se a mesma metodologia dos demais ensaios de eletrocoagulação. E por fim na etapa 6 o cálculo do erro de predição, que servirão como comparação entre os modelos e a validação dos mesmos. O fluxograma da figura 6 apresenta as etapas que foram seguidas.



**Figura 6 - Fluxograma etapas do processo**

Fonte: autoria própria

A ideia de gerar um terceiro modelo, com as médias das respostas obtidas com amostras de efluente de lotes distintos é buscar inserir no modelo gerado, a variabilidade observada no efluente industrial. Sendo assim os procedimentos foram executados novamente a partir da etapa 3, como mostra a figura 7:



**Figura 7- Fluxograma etapas do processo com base nas médias das variáveis**

Fonte: autoria própria

### 3.2.2 Delineamento Composto Central Rotacional

Para a obtenção de um modelo matemático, afim de predizer a remoção de cor e turbidez em função dos fatores: tempo de eletrólise e densidade de corrente, optou-se para este estudo, utilizar a metodologia de planejamento experimental denominada Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR). Assim, é possível obter um modelo empírico de uma ou mais variáveis resposta em função dos fatores considerados.

Como foram estudadas duas variáveis independentes, um fatorial completo foi utilizado, incluindo quatro pontos axiais e quatro repetições nos pontos centrais, obtendo-se 12 ensaios. Como variável resposta obteve-se a eficiência (%) na remoção da cor e da turbidez do efluente.

Na Tabela 1 é apresentada a matriz do delineamento experimental, com os valores codificados para os fatores. Os valores reais para a faixa de estudo foram determinados em ensaios preliminares, e são expostos na Tabela 2.

**Tabela 1 - Matriz de ensaio com os valores codificados**

<b>Ensaio</b>	<b>Tempo (min)</b>	<b>Densidade de corrente (mA/cm<sup>2</sup>)</b>
1	-1	-1
2	-1	1
3	1	-1
4	1	1
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	-1,41	0
10	1,41	0
11	0	-1,41
12	0	1,41

Fonte: autoria própria

**Tabela 2 – Valores reais das condições de experimento**

<b>Códigos</b>	<b>Tempo (min)</b>	<b>Densidade de corrente (mA/cm<sup>2</sup>)</b>
-1,41	5	30
-1	6'30"	37,27
0	10	55
1	13'33"	72,73
1,41	15	80

Fonte: autoria própria

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A eficiência de remoção da cor do primeiro lote de efluente variou entre 60,92 a 77,02% e a eficiência de remoção da turbidez do mesmo lote variou de 65,09 a 83,77% (Tabela 3). Para o segundo lote de efluente a eficiência de remoção da cor variou de 64,22 a 87,50% e para turbidez de 51,21 a 71,06% (Tabela 4).

**Tabela 3 - Valores de cor e turbidez antes e após os ensaios efluente lote 1**

Ensaio	Cor (bruto) (UC)	Turbidez (bruto) (UNT)	Cor (UC)	Turbidez (UNT)
1	702	242	272	72
2	754	245	214	69,4
3	696	247	250	77,2
4	684	251	160	50,2
5	690	247	164	40,1
6	648	236	178	45,4
7	736	235	190	51,2
8	760	260	202	55,9
9	740	231	204	47,9
10	618	193	142	37,5
11	522	163	204	56,9
12	700	223	222	59,7
<b>Média</b>	<b>687,50</b>	<b>231,08</b>		

Fonte: autoria própria

UC = Unidade de Cor

UNT = unidade nefelométrica de turbidez

Tabela 4 - Valores de cor e turbidez antes e após os ensaios efluente lote 2

Ensaio	Cor (bruto) (UC)	Turbidez (bruto) (UNT)	Cor (UC)	Turbidez (UNT)
1	1056	279	132	87,7
2	956	254	128	73,5
3	980	272	224	110
4	904	269	232	62,6
5	876	276	228	100
6	864	274	236	83,6
7	844	275	192	104
8	836	271	236	105
9	872	248	312	77,6
10	1020	273	200	89,1
11	1136	244	316	119
12	1016	259	168	90,7
<b>Média</b>	<b>946,67</b>	<b>266,17</b>		

Fonte: autoria própria

UC = Unidade de Cor

UNT = unidade nefelométrica de turbidez

Ocorreu a geração de uma camada gelatinosa na superfície do efluente, que são os sólidos suspensos presentes no líquido que coagularam durante o tratamento (figura 8). Foi possível visualizar também que os ensaios com a densidade de corrente maior geraram uma camada de lodo mais espessa. E a remoção da turbidez foi perceptível.



**Figura 8 - Efluente após os ensaios de eletrocoagulação**

Fonte: autoria própria

Os resultados da remoção percentual de cor e turbidez obtidos a partir das diferentes condições testadas, os parâmetros definidos na matriz do delineamento experimental, bem como os valores reais e codificados dos fatores utilizados encontram-se na Tabela 5 para o lote 1 e na Tabela 6 para o lote 2.

**Tabela 5 - Remoção de cor e turbidez para as diferentes condições do DCCR – lote 1**

Ensaio	x <sub>1</sub> (Tempo [min])	x <sub>2</sub> (Densidade de corrente [mA/cm <sup>2</sup> ])	Eficiência de remoção (Cor)	Eficiência de remoção (turbidez)
1	-1 (6'30")	-1 (37,27)	61,25	70,25
2	-1 (6'30")	1 (72,73)	71,62	71,67
3	1 (13'33")	-1 (37,27)	64,08	68,74
4	1 (13'33")	1 (72,73)	76,61	80,00
5	0 (10)	0 (55)	76,23	83,77
6	0 (10)	0 (55)	72,53	80,76
7	0 (10)	0 (55)	74,18	78,21
8	0 (10)	0 (55)	73,42	78,50
9	-1,41 (5)	0 (55)	72,43	79,26
10	1,41 (15)	0 (55)	77,02	80,57
11	0 (10)	-1,41 (30)	60,92	65,09
12	0 (10)	1,41 (80)	68,29	73,23

Fonte: autoria própria

Tabela 6 - Remoção de cor e turbidez para as diferentes condições do DCCR – lote 2

Ensaio	x <sub>1</sub> (Tempo [min])	x <sub>2</sub> (Densidade de corrente [mA/cm <sup>2</sup> ])	Eficiência de remoção (Cor)	Eficiência de remoção (turbidez)
1	-1 (6'30")	-1 (37,27)	87,50	68,57
2	-1 (6'30")	1 (72,73)	86,61	71,06
3	1 (13'33")	-1 (37,27)	77,14	59,56
4	1 (13'33")	1 (72,73)	74,34	76,73
5	0 (10)	0 (55)	73,97	63,77
6	0 (10)	0 (55)	72,69	69,49
7	0 (10)	0 (55)	77,25	62,18
8	0 (10)	0 (55)	71,77	61,25
9	-1,41 (5)	0 (55)	64,22	68,71
10	1,41 (15)	0 (55)	80,39	67,36
11	0 (10)	-1,41 (30)	72,18	51,23
12	0 (10)	1,41 (80)	83,46	64,98

Fonte: autoria própria

Os lotes apresentaram eficiências de remoção tanto para cor, como para turbidez distintos. O segundo lote apresentou valores para remoção de turbidez inferiores quando comparados ao lote 1, diferentemente para cor, onde a remoção se apresentou maior no lote 2. Observa-se que os ensaios que possuíam um tempo de eletrólise maior apresentaram melhores resultados para a eficiência de remoção de cor e turbidez.

## 4.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Analisando os resultados do DCCR 1 (lote 1) e DCCR 2 (lote 2) e DCCR da média entre os dois, utilizando o software Statistica 11 foi possível calcular os efeitos sobre a remoção da cor e turbidez das duas variáveis independentes estudadas.

### 4.1.1 Remoção cor: efluente lote 1

A partir dos resultados de remoção da cor para o lote 1, calculou-se a Análise da variância, conforme Tabela 7.

**Tabela 7 - Análise da variância para remoção da cor (%) – lote 1**

Fator	SQ	GL	p-valor
x <sub>1</sub> (L)	25,59	1	0,0646
x <sub>1</sub> (Q)	0,0001	1	0,9968
x <sub>2</sub> (L)	138,85	1	0,0019
x <sub>2</sub> (Q)	164,37	1	0,0012
1L por 2L	1,17	1	0,6462

Fonte: autoria própria

x<sub>1</sub>= Tempo de eletrólise

x<sub>2</sub>= Densidade de corrente

Visto que os termos x<sub>1</sub> linear e quadrático e a interação entre x<sub>1</sub> e x<sub>2</sub> não apresentaram significância a 5% ( $p < 0,05$ ), os mesmos foram desconsiderados e suas contribuições foram adicionadas aos resíduos. Uma nova análise de variância foi realizada apenas com os termos significativos (Tabela 8).

**Tabela 8 - Análise da variância para remoção da cor (%) – lote 1**

<b>Fator</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>p-valor</b>
x <sub>2</sub> (L)	138,85	1	0,0011
x <sub>2</sub> (Q)	171,07	1	0,0006

Fonte: autoria própria

x<sub>1</sub>= Tempo de eletrólise

x<sub>2</sub>= Densidade de corrente

Portanto, os efeitos das variáveis em relação da remoção da cor foram calculados com base no modelo reparametrizado, conforme Tabela 9.

**Tabela 9 - Efeito dos fatores estudados no DCCR 1 para remoção da cor (%) – lote 1**

<b>Fatores</b>	<b>Efeito</b>	<b>Coefficientes de regressão</b>	<b>Erro padrão</b>	<b>t(9)</b>	<b>p-valor</b>
Média	74,09	74,09	0,97	76,06	0,0000
x <sub>2</sub> (L)	8,34	4,17	1,78	4,69	0,0011
x <sub>2</sub> (Q)	-10,18	-5,09	1,96	-5,20	0,0006

Fonte: autoria própria

x<sub>1</sub>= Tempo de eletrólise

x<sub>2</sub>= Densidade de corrente

O modelo quadrático da resposta remoção percentual da cor é obtido através dos coeficientes de regressão. Os efeitos positivos e negativos representam quais fatores influenciam na resposta direta ou inversamente. A equação 13 representa o modelo que descreve a remoção percentual de cor em função do valor codificado dos fatores.

$$\text{Remoção de cor (\%)} = 74,09 + 4,17x_2 - 5,09x_2^2 \quad (13)$$

Onde:

x<sub>2</sub>: Valor codificado da densidade de corrente

Com intuito de validar este modelo predito, a ANOVA foi calculada com base nos termos significativos, e os não significativos com suas contribuições nos resíduos, de acordo com a Tabela 10:

**Tabela 10 - ANOVA do modelo quadrático para predição da remoção da cor (%) – lote 1**

<b>Fonte de Var.</b>	<b>SQ<sup>a</sup></b>	<b>GL<sup>b</sup></b>	<b>MQ<sup>c</sup></b>	<b>Fcalculado</b>	<b>Ftabelado</b>	<b>p-valor</b>
Regressão	309,911	2	154,956	24,530	4,256	0,0002
Resíduos	56,854	9	6,317			
Total		11				

Fonte: autoria própria

% variação explicada ( $R^2$ ) = 89,49

<sup>a</sup>= soma de quadrados; <sup>b</sup>= graus de liberdade; <sup>c</sup> = quadrados médios

Como o valor de teste F calculado (24,530) é maior que o valor de F tabelado, pode-se considerar o modelo válido, pois de acordo com Rodrigues; lemma (2014) considera que para a validação do modelo, é sugerido que o F calculado seja pelo menos de 4 a 5 vezes maior que o valor crítico (4,256). Esta validade pode ser analisada também através do pvalor que é menor que 0,05.

Sendo o modelo válido, o modelo é preditivo para as faixas de estudo, e então foi possível gerar o gráfico de superfície de resposta (Figura 9) e de curvas de contorno (Figura 10), que apresentam a região em que se encontram as maiores respostas para a remoção de cor.

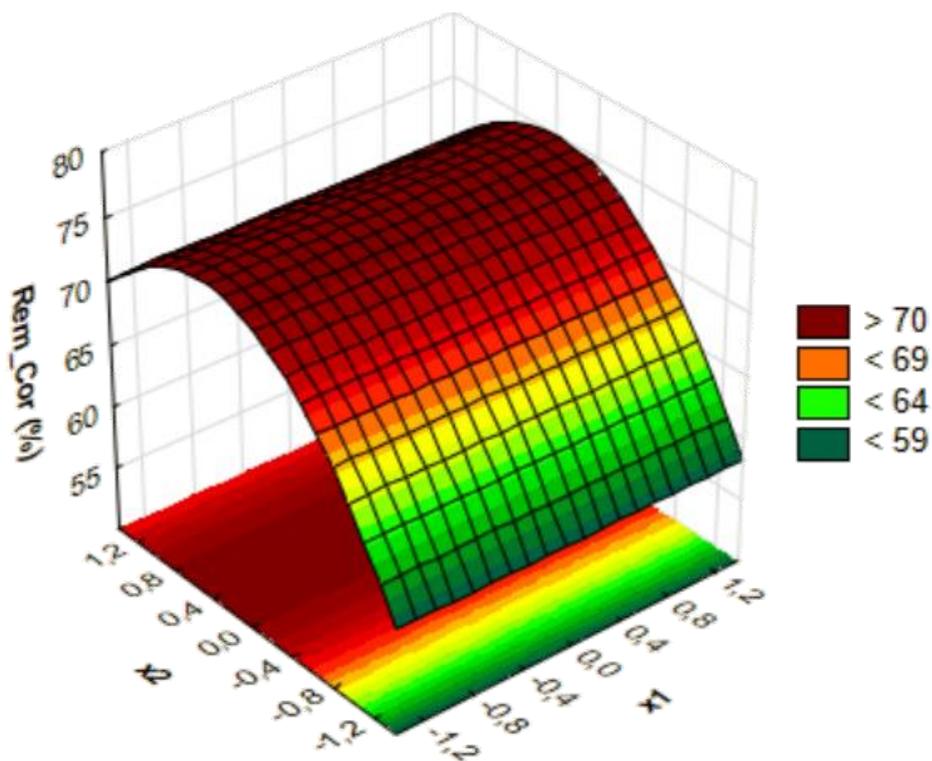


Figura 9 - Superfície de resposta, onde  $x_1$  e  $x_2$  referem-se aos valores codificados dos tempos de eletrólise e das densidades de corrente, respectivamente

Fonte: autoria própria

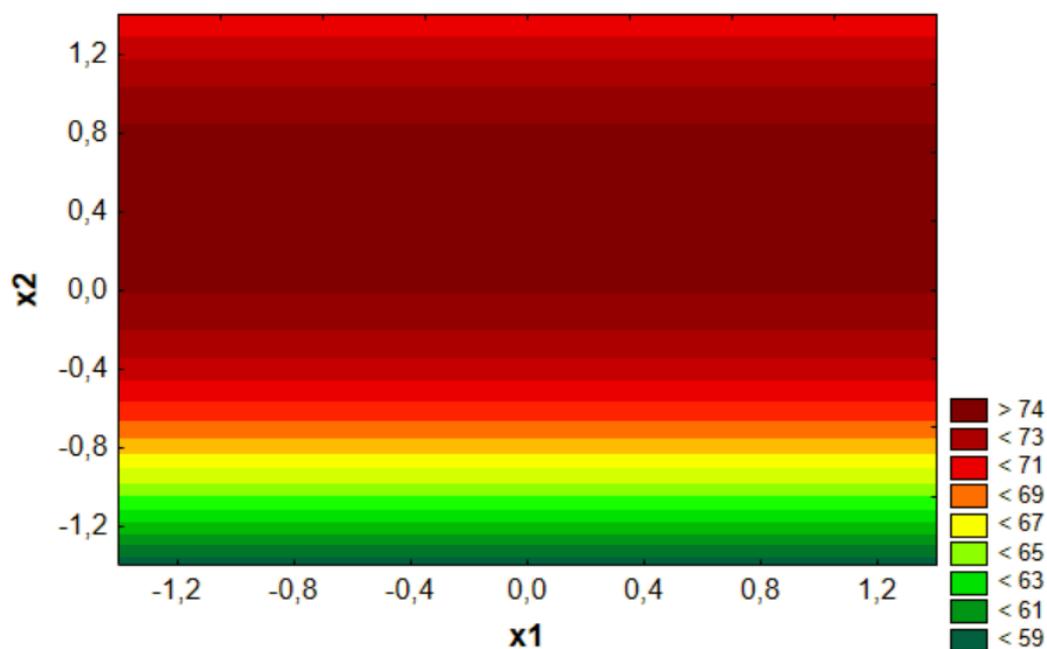


Figura 10 - Curva de contorno, onde  $x_1$  e  $x_2$  referem-se aos valores codificados dos tempos de eletrólise e das densidades de corrente respectivamente.

Fonte: autoria própria

Analisando a superfície de resposta e as curvas de contorno, observa-se uma região ótima de condições para a remoção da cor. Pelo fato da variável  $x_1$  não causar efeito significativo sobre a remoção de cor no lote 1 ela se manteve em uma faixa constante. Para densidade de corrente, os maiores valores de eficiência de remoção da cor são encontrados na faixa de -1 a 1 (37,27 a 72,73 mA/cm<sup>2</sup>).

#### 4.1.2 Remoção turbidez: efluente lote 1

Tendo os resultados da remoção da turbidez para o lote 1, a análise da variância foi realizada através do software, como evidenciado na Tabela 11.

**Tabela 11 - Análise da variância para remoção da turbidez (%) – lote 1**

<b>Fator</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>p-valor</b>
$x_1$ (L)	9,41	1	0,2176
$X_1$ (Q)	2,79	1	0,4819
$x_2$ (L)	73,14	1	0,0086
$x_2$ (Q)	234,09	1	0,0005
1L por 2L	24,15	1	0,0695

Fonte: autoria própria

$x_1$ = Tempo de eletrólise

$x_2$ = Densidade de corrente

De maneira análoga as análises para a remoção da cor, foram considerados apenas os fatores que se mostraram significativos a 95% de confiança para a remoção da turbidez, ou seja, aqueles que apresentaram valores de pvalor menores que 0,05, os demais foram desconsiderados e suas contribuições agregadas aos resíduos. Uma nova análise de variância foi realizada, apenas com os fatores significantes, de acordo com a Tabela 12:

**Tabela 12 - Análise da variância para remoção da turbidez (%) – lote 1**

Fator	SQ	GL	p-valor
$x_2$ (L)	73,14	1	0,0116
$x_2$ (Q)	233,19	1	0,0003

Fonte: autoria própria

$x_1$ = Tempo de eletrólise

$x_2$ = Densidade de corrente

Desta forma, os efeitos das variáveis em relação da remoção da turbidez foram calculados com base no modelo reparametrizado, conforme Tabela 13.

**Tabela 13 - Efeito dos fatores estudados no DCCR 1 para remoção da turbidez (%)**

Fatores	Efeito	Coefficientes de regressão	Erro padrão	t(9)	p-valor
Média	79,78	79,78	1,05	75,94	0,0000
$x_2$ (L)	6,05	3,02	1,91	3,16	0,0116
$x_2$ (Q)	-11,88	-5,94	2,11	-5,63	0,0003

Fonte: autoria própria

$x_1$ = Tempo de eletrólise

$x_2$ = Densidade de corrente

Partindo dos coeficientes de regressão, o modelo quadrático da resposta remoção percentual da turbidez para o lote 1 é obtido. A equação 14 representa o modelo que descreve a remoção percentual de turbidez em função do valor codificado dos fatores.

$$\text{Remoção turbidez} = 79,78 + 3,02x_2 - 5,94x_2^2 \quad (14)$$

Onde:

$x_2$ : Valor codificado da densidade de corrente

Com intuito de validar este modelo predito, a ANOVA foi calculada com base nos termos significativos, e os não significativos com suas contribuições nos resíduos, de acordo com a Tabela 14:

**Tabela 14 - ANOVA do modelo quadrático para predição da remoção da turbidez (%) – lote 1**

Fonte de Var.	SQ <sup>a</sup>	GL <sup>b</sup>	MQ <sup>c</sup>	Fcalculado	Ftabelado	p-valor
Regressão	306,332	2	153,166	20,846	4,256	0,0004
Resíduos	66,127	9	7,347			
Total		11				

Fonte: autoria própria

% variação explicada ( $R^2$ ) = 82,26

<sup>a</sup>= soma de quadrados; <sup>b</sup>= graus de liberdade; <sup>c</sup> = quadrados médios

Analisando que o valor de teste F calculado (20,846) é maior que o valor de F tabelado (4,256), pode-se considerar o modelo válido. Esta validade pode ser analisada também através do pvalor que é menor que 0,05.

Sendo o modelo válido, é possível gerar o gráfico de superfície de resposta (Figura 11) e de curvas de contorno (Figura 12), que apresentam a região em que encontram as maiores respostas para a remoção de turbidez.

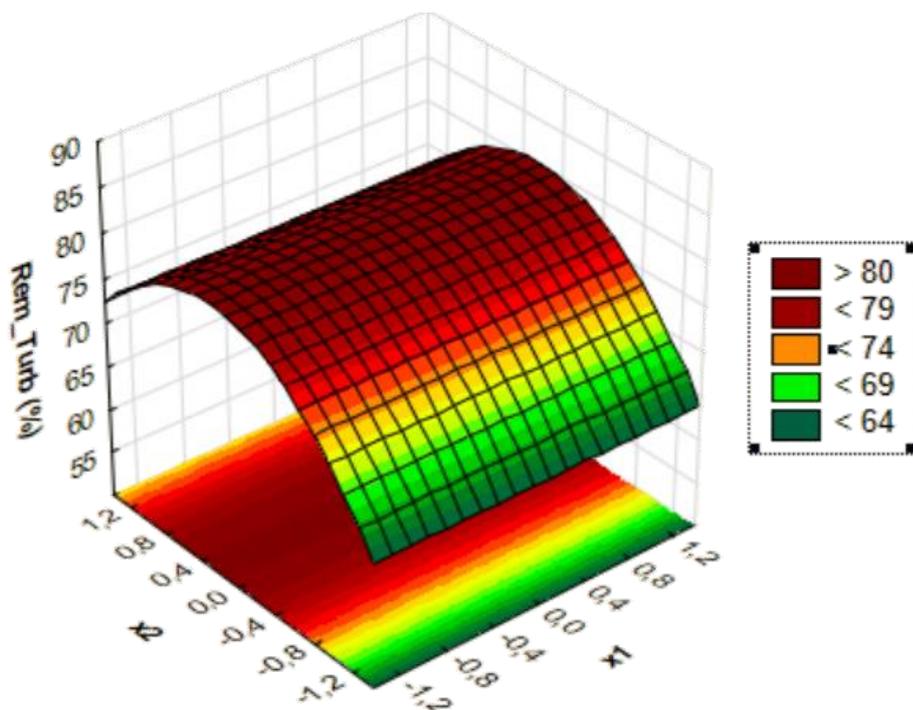


Figura 11 - Superfície de resposta, onde  $x_1$  e  $x_2$  referem-se aos valores codificados dos tempos de eletrólise e das densidades de corrente, respectivamente

Fonte: autoria própria

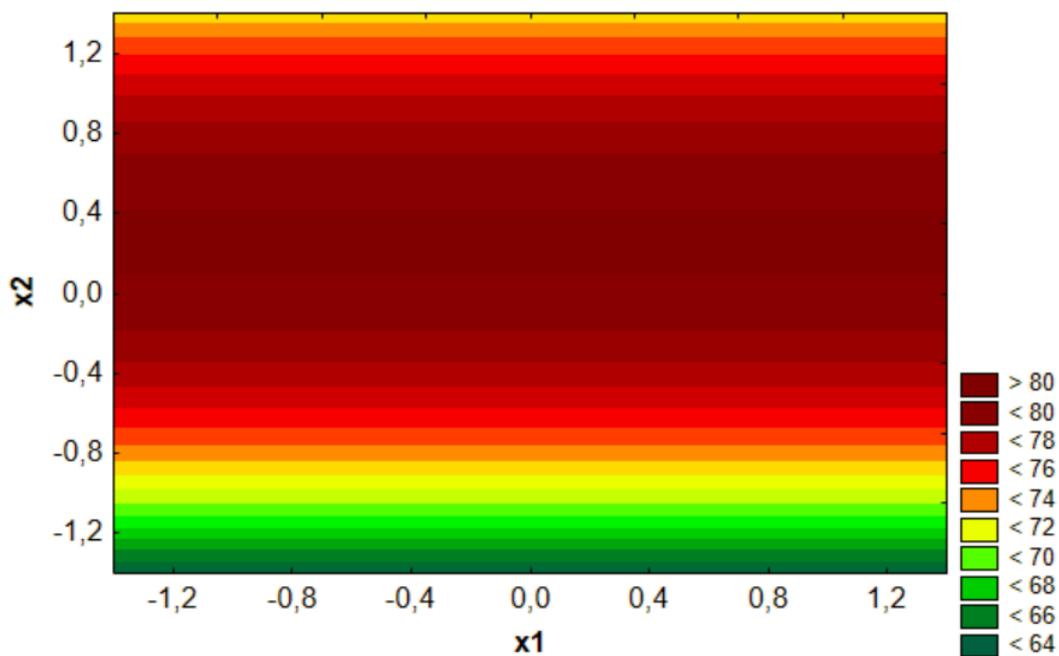


Figura 12- Curva de contorno, onde  $x_1$  e  $x_2$  referem-se aos valores codificados dos tempos de eletrólise e das densidades de corrente respectivamente.

Fonte: autoria própria

Interpretando a superfície de resposta e as curvas de contorno, observa-se uma região ótima de condições para a remoção da turbidez. Da mesma maneira que para a remoção de cor, a variável  $x_1$  foi desconsiderada por seu efeito não causar influência sobre a remoção de turbidez, então ela se manteve constante. Para densidade de corrente, a remoção da turbidez é maximizada dentro da faixa de -1 a 1 (37,27 a 72,73 mA/cm<sup>2</sup>).

#### 4.1.3 Remoção de cor: efluente lote 2

Após serem realizados os ensaios para o efluente do lote 2, obteve-se a eficiência de remoção de cor, e assim pode-se calcular a análise da variância, de acordo com a tabela 15:

**Tabela 15 - Análise da variância para remoção da cor (%) – lote 2**

<b>Fator</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>p-valor</b>
x1 (L)	0,003	1	0,9944
x1 (Q)	3,95	1	0,8167
x2 (L)	18,69	1	0,6171
x2 (Q)	80,62	1	0,3158
1L por 2L	0,92	1	0,9108

Fonte: autoria própria

$x_1$ = Tempo de eletrólise

$x_2$ = Densidade de corrente

Neste caso, nenhum dos fatores se apresentou estatisticamente significativo ao nível de significância de 5%. Portanto não geraram modelos válidos em relação ao percentual de remoção de cor do efluente do lote 2, como pode ser observado na Tabela 16:

**Tabela 16 - ANOVA do modelo quadrático para predição da remoção da cor (%) – lote 2**

Fonte de Var.	SQ <sup>a</sup>	GL <sup>b</sup>	MQ <sup>c</sup>	Fcalculado	Ftabelado	p-valor
Regressão	104,182	5	20,836	0,309	4,387	0,8905
Resíduos	403,961	6	67,327			
Total		11				

Fonte: autoria própria

% variação explicada ( $R^2$ ) = 19,89

<sup>a</sup>= soma de quadrados; <sup>b</sup>= graus de liberdade; <sup>c</sup> = quadrados médios

O F calculado apresentou um valor menor que o F tabelado, e o pvalor apresentou um valor maior que 0,05, sendo assim comprovado que o modelo não é válido.

#### 4.1.4 Remoção da turbidez: efluente do lote 2

Iguais ao demais casos, após os ensaios, os valores da eficiência de remoção foram obtidos, para que assim a análise da variância pudesse ser realizada, como na Tabela 17:

**Tabela 17 - Análise da variância para remoção da turbidez (%) – lote 2**

Fator	SQ	GL	p-valor
(1) x1 (L)	3,44	1	0,6808
x1 (Q)	75,07	1	0,0903
(2) x2 (L)	191,23	1	0,0182
x2 (Q)	15,36	1	0,3967
1L por 2L	53,83	1	0,1385

Fonte: autoria própria

x<sub>1</sub>= Tempo de eletrólise

x<sub>2</sub>= Densidade de corrente

Para a remoção de turbidez do lote 2, poucos fatores exerceram influência no nível de significância a 5%, então optou-se por desconsiderar os fatores que estão o mais distante de serem significativos, que neste caso é o x1 linear e x2 quadrático, para que uma nova análise de variância pudesse ser realizada. A Tabela 18 apresenta os novos valores de significância.

**Tabela 18 - Análise da variância para remoção da turbidez (%) – lote 2**

Fator	SQ	GL	p-valor
x1 (Q)	92,67	1	0,04369
x2 (L)	191,24	1	0,0089
1L por 2L	53,83	1	0,1057

Fonte: autoria própria

x<sub>1</sub>= Tempo de eletrólise

x<sub>2</sub>= Densidade de corrente

Portanto, os efeitos das variáveis em relação da remoção da cor foram calculados com base no modelo reparametrizado, conforme Tabela 19.

**Tabela 19 - Efeito dos fatores estudados no DCCR 2 para remoção da turbidez (%)**

Fatores	Efeito	Coefficientes de regressão	Erro padrão	t(8)	p-valor
Média	62,92	62,92	1,56	40,34	0,0000
x1 (Q)	7,49	3,75	3,13	2,39	0,0436
x2 (L)	9,79	4,89	2,85	3,44	0,0088
1L com 2L	7,34	3,67	4,02	1,82	0,105723

Fonte: autoria própria

x<sub>1</sub>= Tempo de eletrólise

x<sub>2</sub>= Densidade de corrente

O modelo quadrático da resposta remoção percentual da turbidez é obtido através dos coeficientes de regressão. A equação 15 representa o modelo que descreve a remoção percentual de turbidez em função do valor codificado dos fatores.

$$\text{Remoção turbidez} = 62,92 + 3,75x_2 + 4,89x_1x_2 + 3,67x_1^2 \quad (15)$$

Onde:

$x_1$ : tempo de eletrólise

$x_2$ : Valor codificado da densidade de corrente

Com intuito de validar este modelo predito, a ANOVA foi calculada com base nos termos significativos, e os não significativos com suas contribuições nos resíduos, de acordo com a Tabela 20:

**Tabela 20 - ANOVA do modelo quadrático para predição da remoção da turbidez (%) – lote 2**

Fonte de Var.	SQ	GL	MQ	Fcalculado	Ftabelado	p-valor
Regressão	337,728	3	112,576	6,953	4,066	0,0128
Resíduos	129,532	8	16,192			
Total		11				

Fonte: autoria própria

Mesmo o F calculado não sendo 4 ou 5 vezes maior que o F tabelado, ele ainda se apresenta maior, o que significa que o modelo pode ser considerado válido. O gráfico de superfície de resposta (Figura 13) e de curvas de contorno (Figura 14), foram gerados com o intuito de se encontrar as faixas ótimas para a remoção de turbidez do lote 2.

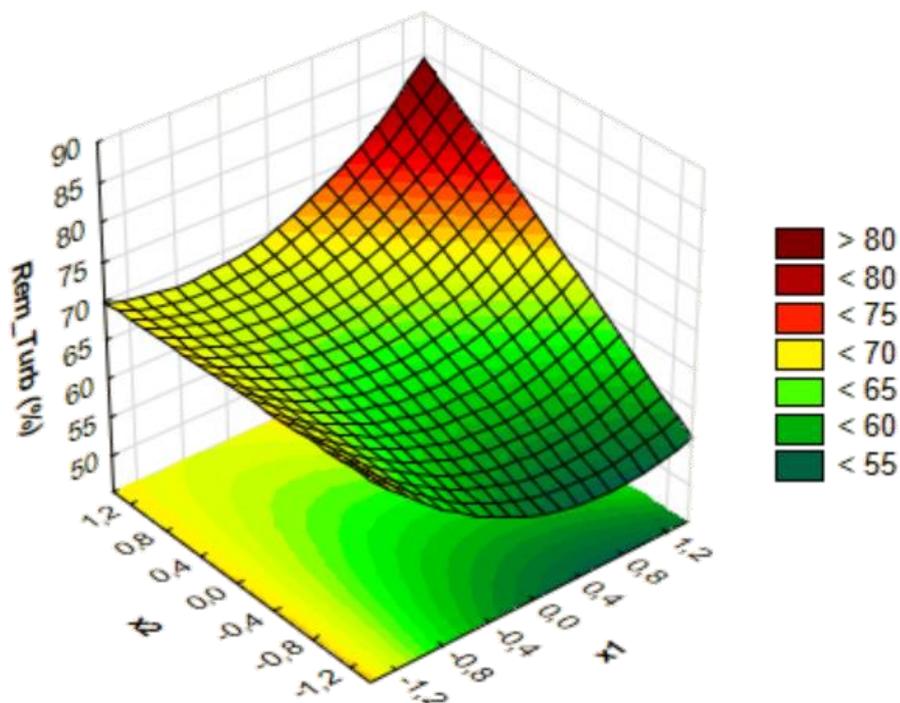


Figura 13 - Superfície de resposta, onde  $x_1$  e  $x_2$  referem-se aos valores codificados dos tempos de eletrólise e das densidades de corrente, respectivamente

Fonte: autoria própria

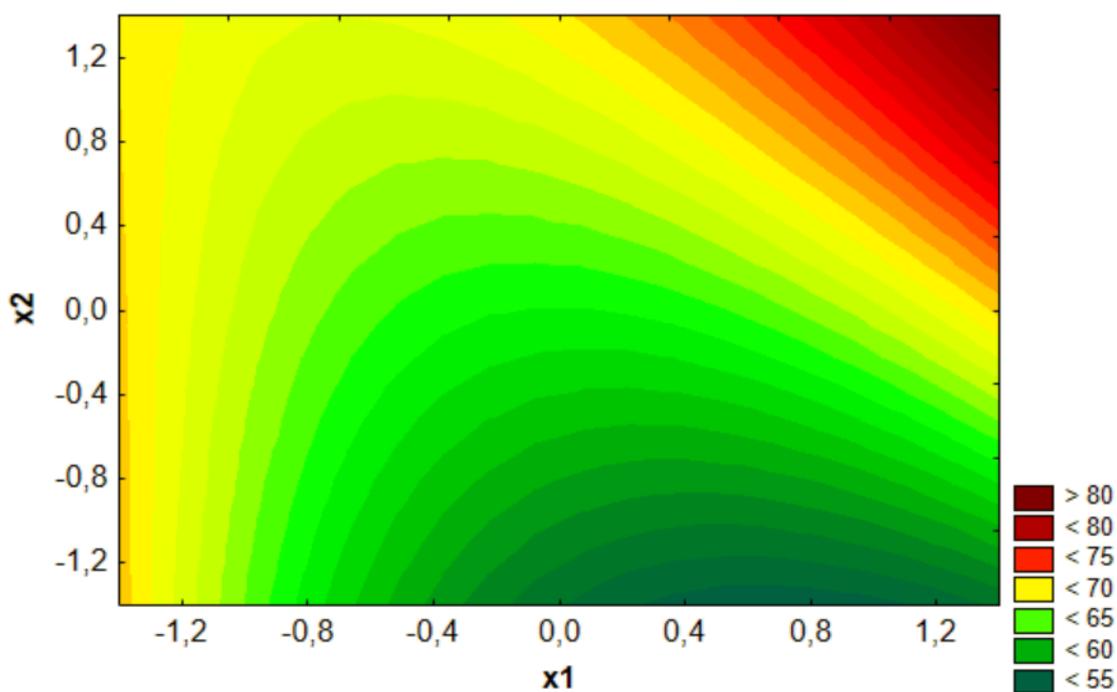


Figura 14 - Curva de contorno, onde  $x_1$  e  $x_2$  referem-se aos valores codificados dos tempos de eletrólise e das densidades de corrente respectivamente.

Fonte: autoria própria

Neste caso as faixas ótimas para remoção exigem valores máximos da faixa de estudo, 1,41 tanto para o x1 (15 min) quanto para x2 (80 mA/cm<sup>2</sup>).

#### 4.1.5 Remoção da cor - Média entre os efluentes do lote 1 e 2

A fim de testar se seria possível inserir a variabilidade do processo nos modelos ajustados, a média das respostas da eficiência de remoção para os dois lotes foi realizada. Com os valores médios, uma nova análise de variância foi realizada, e os resultados estão apresentados na tabela 21:

**Tabela 21 - Análise da variância para remoção da cor (%) – médias**

Fator	SQ	GL	p-valor
x1 (L)	6,55	1	0,5184
x1 (Q)	0,99	1	0,7981
x2 (L)	64,86	1	0,0743
x2 (Q)	3,69	1	0,6252
1L por 2L	0,004	1	0,9874

Fonte: autoria própria

x<sub>1</sub>= Tempo de eletrólise

x<sub>2</sub>= Densidade de corrente

Diferente do que era esperado, nenhum fator apresentou significância estatística no nível de 95% de confiança. Desta forma, não é possível gerar um modelo de predição, o que pode ser confirmado na tabela da ANOVA, Tabela 22:

**Tabela 22 - ANOVA do modelo quadrático para predição da remoção da cor (%) – média**

Fonte de Var.	SQ <sup>a</sup>	GL <sup>b</sup>	MQ <sup>c</sup>	Fcalculado	Ftabelado	p-valor
Regressão	76,103	5	15,221	1,093	4,387	0,4500
Resíduos	83,574	6	13,929			
Total		11				

Fonte: autoria própria

% variação explicada (R<sup>2</sup>) = 47,97

<sup>a</sup>= soma de quadrados; <sup>b</sup>= graus de liberdade; <sup>c</sup> = quadrados médios

F calculado se apresentou menor que o F tabelado, e pvalor está maior do que o sugerido para um modelo válido ( $<0,05$ ). Portanto, de fato o modelo para eficiência de remoção da cor das médias não é válido.

#### 4.1.6 Remoção da turbidez - Média entre os efluentes do lote 1 e 2

Como já mencionado no tópico anterior, a média dos resultados para a remoção de turbidez foi realizada, a fim de testar a variabilidade do processo. Da mesma forma uma nova análise de variância foi realizada para os resultados médios obtidos para a remoção de turbidez, e pode ser visto na Tabela 23:

**Tabela 23 - Análise da variância para remoção da turbidez (%) – médias**

<b>Fator</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>p-valor</b>
x1 (L)	0,37	1	0,7924
x1 (Q)	12,23	1	0,1635
x2 (L)	125,22	1	0,0023
x2 (Q)	92,35	1	0,0048
1L por 2L	37,52	1	0,0319

Fonte: autoria própria

x<sub>1</sub>= Tempo de eletrólise

x<sub>2</sub>= Densidade de corrente

Neste caso, alguns parâmetros mostraram-se significativos, e foram mantidos. Os parâmetros com pequena ou nenhuma influência sobre o resultado do ajuste final foram excluídos. Uma nova análise foi realizada com base no modelo reparametrizado. A Tabela 24 apresenta os novos fatores:

Tabela 24 - Análise da variância para remoção da turbidez (%) – médias

Fator	SQ	GL	p-valor
x2 (L)	125,23	1	0,0012
x2 (Q)	110,36	1	0,0018
1L por 2L	37,52	1	0,0278

Fonte: autoria própria

x<sub>1</sub>= Tempo de eletrólise

x<sub>2</sub>= Densidade de corrente

Contudo, os efeitos das variáveis em relação à média de remoção da turbidez foram calculados com base no modelo reduzido, conforme Tabela 25.

Tabela 25 - ANOVA do modelo quadrático para predição da remoção da turbidez (%) – médias

Fatores	Efeito	Coefficientes de regressão	Erro padrão	t(8)	p-valor
Média	73,34	73,34	0,89	82,8 5	0,0000
x2 (L)	7,92	3,96	1,62	4,90	2,0977
x2 (Q)	-8,18	-4,09	1,78	-4,60	0,0018
1L por 2L	6,13	3,06	2,28	2,68	0,0278

Fonte: autoria própria

x<sub>1</sub> = tempo de eletrólise

x<sub>2</sub> = Densidade de corrente

O modelo ajustado para a remoção de turbidez média fica caracterizado pela equação 16:

$$\text{Remoção turbidez média} = 73,34 + 3,96x_2 + 3,06x_1x_2 - 4,09x_2^2 \quad (16)$$

Com o intuito de verificar a significância do modelo predito, foi realizado o cálculo da ANOVA (Tabela 26). Esta análise considera um exame dos resíduos e pode ser utilizada para se avaliar numericamente a qualidade do ajuste do modelo gerado.

**Tabela 26 - ANOVA do modelo quadrático para predição da remoção da turbidez (%) - médias**

Fonte de Var.	SQ	GL	MQ	Fcalculado	Ftabelado	p-valor
Regressão	273,116	3	91,039	17,456	4,066	0,0007
Resíduos	41,722	8	5,215			
Total		11				

Fonte: autoria própria

% variação explicada ( $R^2$ ) = 86,74

<sup>a</sup>= soma de quadrados; <sup>b</sup>= graus de liberdade; <sup>c</sup> = quadrados médios

O modelo é válido, pois o valor do teste F (17,456) é maior que o F tabelado. O pvalor apresentou o valor de 0,0007176, sendo menor que o recomendado e a porcentagem da variação explicada pelo modelo foi adequado ( $R^2 = 86,74\%$ ).

Sendo o modelo preditivo para a faixa de estudo, o gráfico de superfície de resposta (Figura 15) e de curvas de contorno (Figura 16) foram gerados, para se analisar a região mais eficiente, para as variáveis tempo e intensidade de corrente.

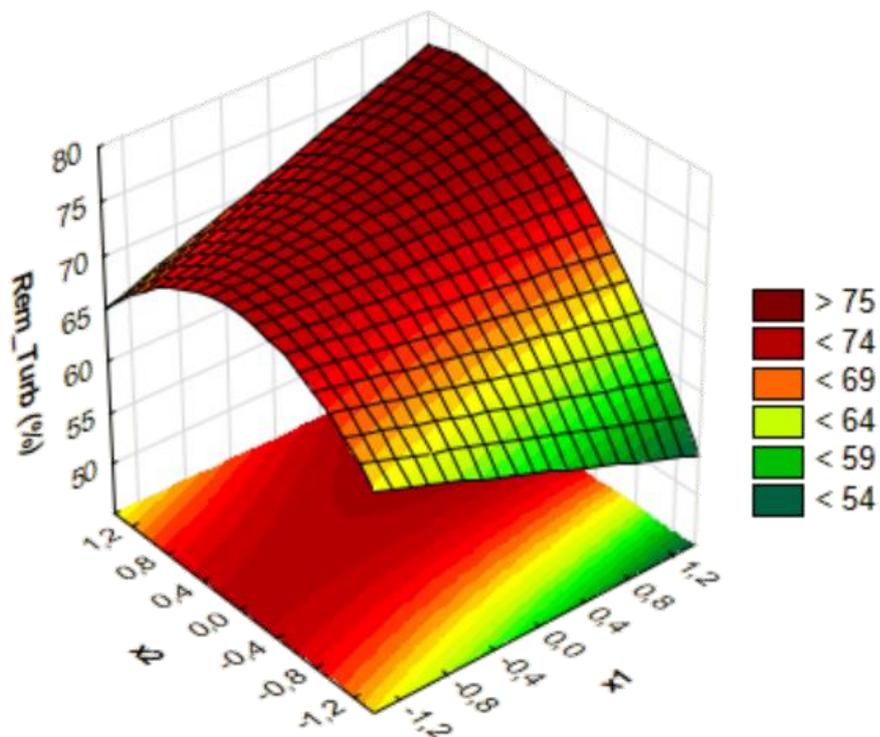


Figura 15 - Superfície de resposta, onde  $x_1$  e  $x_2$  referem-se aos valores codificados do tempo de eletrólise e da densidade de corrente, respectivamente, para a média dos valores na remoção de turbidez.

Fonte: autoria própria

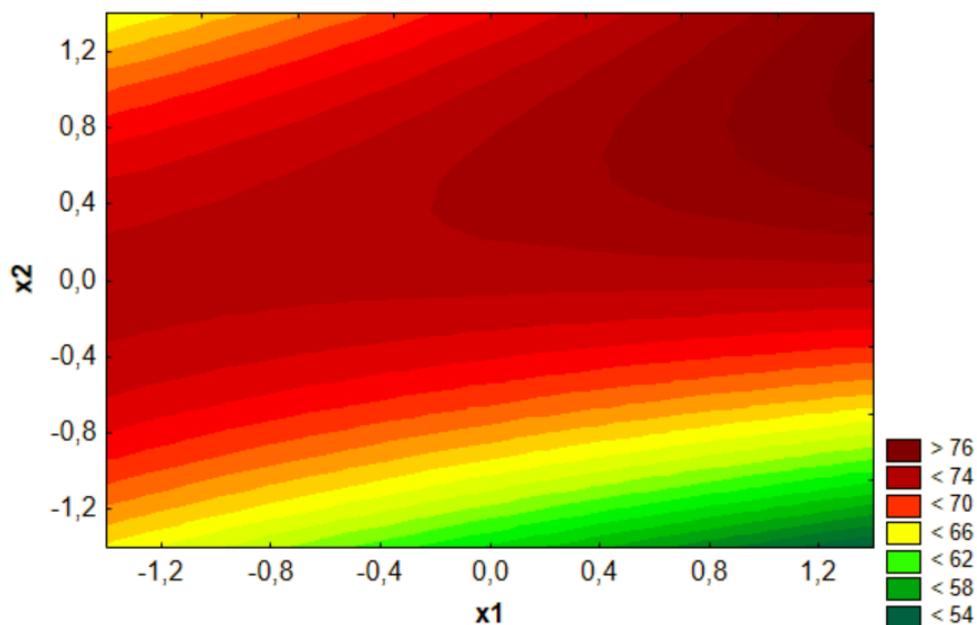


Figura 16 - Curva de contorno, onde  $x_1$  e  $x_2$  referem-se aos valores codificados dos tempos de eletrólise e da densidade de corrente, respectivamente, para a média dos valores na remoção de turbidez.

Fonte: autoria própria

Através da superfície de resposta gerada pelo modelo (Figura 16), pode-se obter melhores condições para o tempo de eletrólise e densidade de corrente. Neste sentido, valores elevados de eficiência de remoção da turbidez podem ser encontrados para uma ampla faixa de valores de  $x_1$  (tempo de eletrólise), e quando  $x_2$  (densidade de corrente) assume valores entre -1 e 1 (37,27 e 72,73 mA/cm<sup>2</sup>).

## 4.2 VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL

A definição das condições dos ensaios de validação foi baseada na otimização dos dois modelos de melhor qualidade: DCCR 1 e DCCR da Média. Neste sentido, procedeu-se a busca pelos pontos de máxima remoção por meio do teste da derivada primeira, como demonstrado na sequência.

Para DCCR 1, a equação (17) apresenta o ponto crítico obtido através do teste da derivada.

$$\begin{aligned}\frac{d(Rem_{turb})}{dx_2} &= 3,03 - 11,89x_2 = 0 & (17) \\ x_2 &= 0,25\end{aligned}$$

Para DCCR da Média, a equação (18) encontra o ponto crítico através do teste da derivada.

$$\begin{aligned}\frac{d(Rem_{turb})}{dx_2} &= 3,96 - 8,18x_2 + 3,06x_1 = 0 & (18) \\ \frac{3,96 + 3,06x_1}{8,18} &= x_2\end{aligned}$$

Estabelecendo  $x_1 = 0$ , ou seja, utilizando-se do ponto central, foi possível encontrar o ponto crítico para as condições das médias.

$$x_2 = 0,48$$

Na Tabela 27 são apresentadas as condições definidas para os ensaios de validação.

**Tabela 27 - Condições para os ensaios de validação**

<b>Condição</b>	<b>x1</b>	<b>x2</b>	<b>Tempo de eletrólise (min)</b>	<b>Densidade de corrente (mA/cm<sup>2</sup>)</b>
1	0	0,25	10	59,43
2	0	0,48	10	63,51

Fonte: autoria própria

Após obter as melhores condições para os ensaios de validação, os ensaios foram realizados utilizando a mesma metodologia dos demais testes. O valor predito foi obtido substituindo-se os valores de x1 e x2 nos modelos, os valores preditos estão apresentados nas Tabelas 28 e 29, para as duas condições respectivamente. Cada condição foi replicada por três vezes para que o seu comportamento pudesse ser observado.

**Tabela 28 - Valores preditos para a condição 1**

<b>Valores Preditos para Condição 1</b>	<b>DCCR1 (Lote 1)</b>	<b>DCCR2 (Lote 2)</b>	<b>DCCR MÉDIA</b>	<b>Valores Observados para Condição 1</b>
Remoção Cor (%)	74,82			79,70
Remoção Turbidez (%)	80,18	64,13	74,07	79,67
Erro Turbidez (%)	-0,65	19,50	7,02	

Fonte: autoria própria

**Tabela 29 - Valores preditos para a condição 2**

<b>Valores Preditos para Condição 2</b>	<b>DCCR1 (Lote 1)</b>	<b>DCCR2 (Lote 2)</b>	<b>DCCR MÉDIA</b>	<b>Valores Observados para Condição 2</b>
Remoção Cor (%)	74,93			77,26
Remoção Turbidez (%)	79,87	65,27	74,3	77,28
Erro Turbidez (%)	-3,35	15,54	3,86	

Fonte: autoria própria

Tanto na Tabela 28, como na Tabela 29 o valor do erro percentual para cada DCCR executado, foi calculado de acordo com a equação 19:

$$\text{Erro (\%)} = \frac{V_{\text{observado}} - V_{\text{DCCR}}}{V_{\text{observado}}} \times 100 \quad (19)$$

Os resultados obtidos para o efluente do terceiro lote, antes e depois do seu tratamento estão dispostos nas Tabelas 30 e 31, bem como sua eficiência de remoção.

**Tabela 30 - Resultados obtidos para a condição 1**

Condição	Cor (bruto) (PtCo)	Turbidez (bruto) (NTU)	Cor (PtCo)	Turbidez (NTU)	Eficiência Remoção cor (%)	Eficiência Remoção turbidez (%)
1	970	262	156	37,6	83,92	85,65
	880	252	214	69,4	75,68	72,46
	986	316	202	60,4	79,51	80,89

Fonte: autoria própria

**Tabela 31 - Resultados obtidos para a condição 2**

Condição	Cor (bruto) (PtCo)	Turbidez (bruto) (NTU)	Cor (PtCo)	Turbidez (NTU)	Eficiência Remoção cor (%)	Eficiência Remoção turbidez (%)
2	966	287	194	54,5	79,92	81,01
	954	273	186	47,1	80,50	82,75
	992	272	284	86,8	71,37	68,09

Fonte: autoria própria

O erro percentual médio para a remoção de turbidez das amostras para o lote 1, ficou na faixa de -0,65% a -3,55%, resultados consideramos ótimos por apresentarem valores pequenos em relação ao erro. Estes resultados validaram o modelo de remoção da turbidez para o lote 1 com o melhor desempenho entre os testados. Em relação ao modelo ajustado para a média dos lotes 1 e 2 apresentou um erro percentual médio variando entre 3,86% e 7,02% tendo o seu desempenho razoável entre os modelos testados.

## 5 CONCLUSÃO

Os ensaios de eletrocoagulação apresentaram-se eficientes na remoção de cor e turbidez. Porém para o primeiro lote analisado a eficiência de remoção para turbidez atingiu níveis mais elevados de remoção, enquanto que para o segundo lote analisado os níveis foram maiores para a remoção da cor.

Dentre as variáveis dependentes abordadas neste trabalho, apenas a remoção da turbidez, proporcionou modelos válidos para todas as amostragens realizadas. O modelo ajustado para a remoção da turbidez, do lote 1 apresentou robustez mesmo sendo utilizado uma amostra diferente para o teste de validação. Apresentou um erro percentual médio entre -0,65% e -3,35%, resultados esses que corroboraram como o modelo de melhor desempenho dentre os testados. Já o modelo ajustado para a remoção da turbidez com amostras do lote 2, este apresentou fragilidade, pois teve um baixo desempenho nos ensaios de validação.

Os modelos ajustados para a remoção da turbidez, utilizando a média dos resultados entre o lote 1 e 2, se mostrou razoável, predizendo a remoção da turbidez com o erro percentual médio variando entre 3,86% e 7,02%. Porém a simples média das variáveis dependentes obtidas em apenas duas amostras, não se mostrou suficiente para absorver o impacto da variabilidade do processo. Acredita-se que havendo uma repetição do delineamento experimental em várias amostras, gerando uma série histórica da performance do sistema de tratamento, se conseguiria agregar robustez ao modelo gerado.

Se tratando apenas dos parâmetros de cor e turbidez, as duas amostras demonstraram visivelmente que existe a variabilidade no efluente que afetam o sistema de tratamento por eletrocoagulação. Atrelada a diferença de capacidade de predição dos modelos ajustados, considera-se a necessidade de acompanhamento periódico do processo, pois sabendo que a variabilidade é inerente a ele, existe a necessidade da repetição sistemática da otimização no sistema de tratamento proposto.

## REFERÊNCIAS

ALGERI, ALESSANDRA, *et al.* **Aplicação da técnica de eletrocoagulação para a remoção da corante têxtil.** REA – Revista de estudos ambientais (Online). V.19, n.2, p.31-39, jul/dez 2017. ISSN 1983 1501.

BARROS NETO, BENÍCIO DE, *et al.* **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria.** Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2001.

BAZRAFSHAN, E. *et al.* Slaughterhouse Wastewater Treatment by Combined Chemical Coagulation and Electrocoagulation Process. Plos One. V. 7, n. 6, p 1 – 8. 2012.

BIASSI, Brendown Farias. **Tratamento de efluente de matadouro e frigorífico de suíno em reator batelada de eletrofloculação.** 2014. Trabalho de Conclusão de Curso. Tecnologia em Gestão Ambiental - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2014.

BORBA, Fernando Henrique. **Application of the photo-Fenton and electrocoagulation processes at the tannery effluent treatment.** 2010. 164 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Processos) - Universidade Estadual do Oeste do Parana, Toledo, 2010.

CALDEREIRO, Gisele Maria Brod. **Caracterização da digestão de resíduos agroindustriais em biodigestor de fluxo contínuo operado em escala real.** 2015. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais) Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2015.

CAMMAROTA, MAGALI CHRISTIE. **Engenharia do meio Ambiente. Tratamento de Efluentes Líquidos.** Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química. 2011/1

CARNEIRO, FÁTIMA MAIA. **Análise de Variabilidade num Processo Industrial de Produção de bolachas.** Dissertação (Mestrado Engenharia e Gestão Industrial) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2017;

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

CIMM – Efluentes industriais. Disponível em <

[https://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/3669-efluentes-industriais#.W9zgHZNKhPY](https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/3669-efluentes-industriais#.W9zgHZNKhPY)> Acesso em 23/10/2018.

FEISTEL, JANAINA COSTA; REZENDE, CÍNTIA SILVA MINAFRA. **Tratamento e destinação de resíduos e efluentes de matadouros e abatedouros**. UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS ESCOLA DE VETERINÁRIA E ZOOTECNIA PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA ANIMAL. Goiânia, 2011.

FLECK, Leandro. **Aplicação do Controle Estatístico de Processos ao Tratamento de um Efluente Têxtil por Eletrofloculação**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2011.

GOBBI, L. C. A. Tratamento de água oleosa por eletrofloculação. 120f. Dissertação (Mestrado em Energia). Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, São Mateus, 2013.

MARTINS, ROSEMARY. **Controle Estatístico de Processo – CEP**. Disponível em <<http://www.blogdaqualidade.com.br/controle-estatistico-de-processo-cep/>> Acesso em 14/05/2018.

MENESES, Janaina Moreira de; VASCONCELOS, Robelsa de Fátima; FERNANDES, Thalys de Freitas; ARAUJO, Gilmar Trindade de. **Tratamento do efluente do biodiesel utilizando a eletrocoagulação/flotação: investigação dos parâmetros operacionais**. Quím. Nova [online]. 2012, vol.35, n.2, pp. 235-240.

MOLLAH, M.Y.A.; SCHENNACH, R.; PARGA, J. R.; COCKE, D. L., Electrocoagulation (EC): science and applications. Journal of Hazardous Materials. December 2000.

MONTGOMERY, Douglas C.,; RUNGER, George C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. 5. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2012. xvi, 523 p. ISBN 9788521619024.

MORES, RÚBIA. **Eletrofloculação no tratamento de água residuária da suinocultura submetida à pré-digestão anaeróbia**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia de Alimentos. Erechim, fevereiro, 2013.

NBR 9800 - NORMA REGULAMENTADORA – Critérios para lançamento de efluentes líquidos industriais no sistema coletor público de esgoto sanitário. 1987.

NORMAS PARA ELABORAÇÃO DE TRABALHOS ACADÊMICOS. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Comissão de Normalização de Trabalhos Acadêmicos. - Curitiba: UTFPR, 2008.

ORSSATTO, FABIO. **Otimização do tratamento de efluente de matadouro e frigorífico de suínos pela eletrofloculação e combinação eletrofloculação/coagulação orgânica.** Tese de Doutorado – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Programa de pós-Graduação em Engenharia agrícola. Cascavel, 2017.

PACHECO, J. W. **Guia técnico ambiental de frigoríficos - industrialização de carnes (bovina e suína).** São Paulo: CETESB (Série P + L), 2008.

PACHECO, J. W.; YAMANAKA, H. T. **Guia técnico ambiental de abates (bovino e suínos).** São Paulo: CETESB, 2006.

PAULI, ALINE ROBERTA, *et al.* **Aplicação do planejamento experimental no método de eletro-coagulação para a remoção de matéria orgânica de efluentes frigoríficos.** Programa de Pós-graduação Stricto Sensu em Engenharia Química da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE. ENGEVISTA, V. 14, n. 3. p. 293-301, dezembro 2012.

PORTAL TRATAMENTO DE ÁGUA. A importância da caracterização dos efluentes industriais. Scientech Ambiental. Setembro de 2016. Disponível em <<https://www.tratamentodeagua.com.br/importancia-da-caracterizacao-dos-efluentes-industriais/>> Acesso em 23/10/2018.

RICORDEL, CATHERINE. DARCHEN, ANDRÉ. HADJIEEV, DIMITER. **Electrocoagulation-electroflotation as a surface water treatment for industrial uses. Separation and Purification Technology.** Science Direct, March, 2010.

RODRIGUES, MARIA ISABEL; IEMMA, ANTONIO FRANCISCO. **Planejamento de experimentos e otimização de processos.** 2 ed. São Paulo: Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor, 2009.

SANTOS, BRUNA SOUZA DOS, *et al.* **Electro-flocculation associated with the extract of Moringa oleífera Lam as natural coagulante for the removal of reactive blue 5G dye. Acta Scientiarum Technology.** Maringá, v.38 n 4 p. 483-488, Oct-Dec., 2016.

SCARASSATI, DEIVIDY, *et al.* **Tratamento de efluentes de matadouros e frigoríficos.** III Fórum de Estudos Contábeis 2003. Centro Superior de Educação Tecnológica (CESET) – UNICAM, Limeira, SP.

THEODORO, P. S. **Utilização da eletrocoagulação no tratamento de efluentes da indústria galvânica.** 2010. 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Unioeste Centro de Engenharias e Ciências Exatas, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2010.

VALERO, DAVID, *et al.* **Electrocoagulation of wastewater from almond industry.** Chemosphere. Science Direct. June 2011.