



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CAMPUS DE CERRO LARGO
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA**

PATRICIA RAPHAELA GIORDANNI

**UTILIZAÇÃO DE ELETRODOS DE SACRIFÍCIO DE FERRO NA
ELETROFLOCAÇÃO DO EFLUENTE DE INDÚSTRIA COSMÉTICA:
AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE TRATAMENTO**

CERRO LARGO

2017

PATRICIA RAPHAELA GIORDANNI

**UTILIZAÇÃO DE ELETRODOS DE SACRIFÍCIO DE FERRO NA
ELETROFLOCAÇÃO DO EFLUENTE DE INDÚSTRIA COSMÉTICA:
AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE TRATAMENTO**

**Trabalho de Conclusão de curso de graduação
apresentado como requisito para obtenção de grau de
Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da
Universidade Federal da Fronteira Sul.**

**Orientadora: Prof^ª. Ma. Aline Raquel Müller Tones
Co-orientadora: Prof^ª. Dra. Alcione Aparecida de
Almeida Alves**

CERRO LARGO

2017

PROGRAD/DBIB - Divisão de Bibliotecas

Giordanni, Patricia Raphaela
Utilização de eletrodos de sacrifício de ferro na
eletrofloculação do efluente de indústria cosmética/
Patricia Raphaela Giordanni. -- 2017.
49 f.:il.

Orientadora: Aline Raquel Müller Tones.
Co-orientadora: Alcione Aparecida de Almeida Alves.
Trabalho de conclusão de curso (graduação) -
Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de
Engenharia Ambiental e Sanitária , Cerro Largo, RS,
2017.

1. Indústria cosmética. 2. Eletrofloculação. 3.
Eletrodo de sacrifício de ferro. I. Tones, Aline Raquel
Müller, orient. II. Alves, Alcione Aparecida de Almeida,
co-orient. III. Universidade Federal da Fronteira Sul.
IV. Título.

PATRICIA RAPHAELA GIORDANNI

**UTILIZAÇÃO DE ELETRODOS DE SACRIFÍCIO DE FERRO NA
ELETROFLOCULAÇÃO DO EFLUENTE DE INDÚSTRIA COSMÉTICA:
AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DE TRATAMENTO**


Trabalho de Conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul.

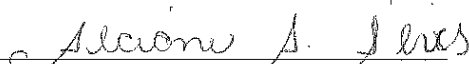
Orientadora: Prof.^a. Ma. Aline Raquel Müller Tones

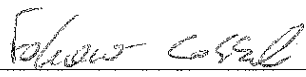
Co-orientadora: Prof.^a. Dra. Alcione Aparecida de Almeida Alves

Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e aprovado pela banca em: 27/11/2017

BANCA EXAMINADORA


Prof.^a Ma. Aline Raquel Müller Tones
(Orientadora - UFFS)


Prof.^a Dra. Alcione Aparecida de Almeida Alves
(Co-orientadora - UFFS)


Prof. Dr. Fabiano Cassol
(Docente - UFFS)

AGRADECIMENTOS

Agradeço meus pais João e Lucia, minha irmã Tatiele e minha avó Verônica por todo amor, carinho, compreensão e auxílio prestado no decorrer dessa trajetória.

A minha orientadora professora Ma. Aline Raquel Müller Tones e também a co-orientadora professora Dra. Alcione Aparecida de Almeida Alves pela excelente orientação, troca de conhecimentos e informações, que por fim compuseram este trabalho.

A professora Dra. Marlei Veiga dos Santos por todo o auxílio prestado.

A minha colega de laboratório Roselaine Cristina Rejei Reinehr por toda ajuda e amizade prestada.

Aos técnicos dos laboratórios da Universidade Federal da Fronteira Sul, por todo o auxílio técnico.

Por fim, todos amigos e colegas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

O setor industrial, em geral, necessita de água para a realização de suas atividades. Em indústrias cosméticas, ela é uma das matérias-primas essenciais para a produção. Como resultado do processo produtivo gera-se resíduos sólidos e líquidos, os quais necessitam de tratamento adequado afim de evitar a poluição dos corpos hídricos. Este estudo teve por objetivo aplicar a eletrofloculação (EF) utilizando o ferro (Fe) como eletrodo de sacrifício, em um efluente de indústria cosmética. A eficiência da técnica foi avaliada por meio da análise das variáveis respostas: DQO, turbidez, cor aparente e absorvância (350 nm), sob diferentes condições de intensidade de corrente elétrica e tempo de tratamento. O planejamento experimental foi conduzido de acordo com o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), composto por 12 ensaios, afim de otimizar as variáveis independentes supracitadas e maximizar a eficiência da EF para as variáveis dependentes. Constatou-se que o DCCR utilizado, bem como a análise estatística, afirmaram com 95 % de confiabilidade a significância das variáveis corrente e tempo de tratamento para obtenção das variáveis respostas, representadas pela porcentagem de remoção de DQO, turbidez, cor aparente e absorvância (350 nm). Na determinação das condições otimizadas para as variáveis independentes, obteve-se uma corrente de 2,5 A com tempo de tratamento de 29,54 min. A partir da condição otimizada realizou-se a validação do tratamento de EF atingindo-se uma remoção de 61,35 % para DQO, 92,31 % para turbidez, 93,69 % de cor aparente e 92,69 % de absorvância (350 nm), os quais seguiram a tendência prevista pelo modelo, confirmando que a EF é uma técnica eficiente.

Palavras-chave: Indústria cosmética. Eletrofloculação. Eletrodo de ferro. Otimização. DCCR.

ABSTRACT

The industrial sector, in general, needs water to carry out its activities. In cosmetic industries, it is one of the essential raw materials for production. As a result of the production process solid and liquid residues are generated, which need adequate treatment in order to avoid the pollution of the water bodies. This study aimed to apply electroflocculation (EF) using iron (Fe) as a sacrificial electrode in a cosmetic industry effluent. The efficiency of the technique was evaluated through the analysis of the variables COD, turbidity, apparent color and absorbance (350 nm), under different conditions of electric current intensity and treatment time. The experimental design was conducted according to the Central Compound Rotational Design (CCRD), composed of 12 trials, in order to optimize the independent variables mentioned above and to maximize the efficiency of the EF for the dependent variables. It was verified that the CCRD used, as well as the statistical analysis, affirmed with 95 % reliability the significance of the variables current and time of treatment to obtain the response variables, represented by the percentage of removal of COD, turbidity, apparent color and absorbance (350 nm). In the determination of optimized conditions for the independent variables, a current of 2.5 A with a treatment time of 29.54 min was obtained. From the optimized condition the validation of the treatment of PE was achieved, with a 61.35 % removal for COD, 92.31 % for turbidity, 93.69 % apparent color and 92.69 % absorbance (350 nm), which followed the trend predicted by the model, confirming that EF is an efficient technique.

Keywords: Cosmetic industry. Electroflocculation. Electrode of iron. Optimization. CCRD.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática das reações que ocorrem na EF.....	18
Figura 2 – Reator de EF utilizado no tratamento	27
Figura 3 – Efluente bruto.....	34
Figura 4 – Efluente tratado por EF	34
Figura 5 – Gráfico de Pareto para as variáveis (a) DQO, (b) Turbidez, (c) Cor aparente e (d) Absorvância (350 nm)	35
Figura 6 – Superfície de resposta e perfil de contorno em relação à redução das variáveis (a) DQO, (b) Turbidez, (c) Cor aparente e (d) Absorvância (350 nm).....	38
Figura 7 – Gráficos obtidos para a função de desejabilidade global	40
Figura 8 – Superfície de resposta e perfil de contorno da desejabilidade global em função da corrente e tempo de tratamento	41
Figura 9 – Superfície de resposta e perfil de contorno em relação a concentração de Ferro residual após EF	44

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Matriz do delineamento experimental	28
Quadro 2 – Resultados da remoção média (%) dos parâmetros analisados após a EF.....	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Padrões de Lançamento de Efluentes em Corpo Hídrico Classe II conforme Resolução do CONAMA 357/05, CONAMA 430/11 e CONSEMA 128/06	26
Tabela 2 – Limites de lançamento para os parâmetros de DQO e SS conforme Resolução do CONSEMA 128/06 para o Estado do Rio Grande do Sul.....	26
Tabela 3 – Valores estudados para as variáveis independentes.....	29
Tabela 4 – Parâmetros físico-químicos analisados.....	29
Tabela 5 – Caracterização físico-química do efluente bruto	31
Tabela 6 – Teste da análise de variância do modelo previsto para a redução de DQO, turbidez, cor aparente e absorvância (350 nm) pelo tratamento de EF ao nível de significância de 95 % (p<0,05)	37
Tabela 7 – Resultados alcançados a partir das condições de tempo e corrente otimizadas	41
Tabela 8 – Caracterização do efluente após o tratamento por EF	42
Tabela 9 – Ferro dissolvido após o tratamento.....	43

LISTA DE SIGLAS

ABIHPEC – Associação Brasileira da Indústria de Higiene Pessoal, Perfumaria e Cosméticos
ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária
CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONSEMA – Conselho Estadual do Meio Ambiente
COT – Carbono Orgânico Total
DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio
DCCR – Delineamento Composto Central Rotacional
DQO – Demanda Química de Oxigênio
EF – Eletrofloculação
ETE – Estação de Tratamento de Efluente
OD – Oxigênio Dissolvido
RDC – Resolução da Diretoria Colegiada
RPM – Rotação Por Minuto
SS – Sólidos Suspensos
SSF – Sólidos em Suspensão Fixos
SST – Sólidos em Suspensão Totais
SSV - Sólidos em Suspensão Voláteis
STD – Sólidos Totais Dissolvidos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS	13
1.1.1 Objetivo Geral	13
1.1.2 Objetivos Específicos	13
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 INDÚSTRIA COSMÉTICA.....	15
2.2 EFLUENTES DA INDÚSTRIA COSMÉTICA	16
2.3 ELETROFLOCULAÇÃO	17
2.3.1 Aplicações da EF para o tratamento de efluentes industriais	19
2.3.2 Vantagens e desvantagens da EF	20
2.4 PARÂMETROS DE QUALIDADE FÍSICO-QUÍMICOS.....	20
2.4.1 pH.....	21
2.4.2 Temperatura	21
2.4.3 Cor	21
2.4.4 Turbidez	22
2.4.5 Condutividade elétrica	22
2.4.6 Oxigênio Dissolvido (OD).....	22
2.4.7 Demanda Química de Oxigênio (DQO)	23
2.4.8 Sólidos Sedimentáveis	23
2.4.9 Sólidos em Suspensão	23
2.4.10 Óleos e Graxas	24
2.4.11 Absorvância.....	24
2.5 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL E PADRÕES DE LANÇAMENTO DE EFLUENTES EM CORPOS HÍDRICOS.....	25
3 MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1 AMOSTRA.....	27
3.2 MÓDULO EXPERIMENTAL	27
3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	28
3.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	28
3.5 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE.....	29
3.6 DETERMINAÇÃO DOS ÍONS DE FERRO.....	30
3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	30

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
4.1 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE DE INDÚSTRIA COSMÉTICA.....	31
4.2 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DE ELETROFLOCULAÇÃO	33
4.2.1 Eficiência na remoção de DQO, turbidez, cor aparente e absorvância (350 nm)....	33
4.2.2 Otimização do processo de EF	35
4.2.3 Desejabilidade Global.....	39
4.2.4 Validação do modelo proposto	41
4.3 ANÁLISE DO FERRO RESIDUAL.....	43
5 CONCLUSÃO.....	45
REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

Durante muito tempo o ser humano vem explorando os recursos naturais afim de atender as demandas do desenvolvimento industrial. Em decorrência da degradação desses recursos, somados ao crescimento econômico e populacional desenfreado, os problemas ambientais começaram a surgir, afetando a qualidade de vida do homem.

O setor industrial, em geral, necessita de água para a realização de suas atividades. Em indústrias cosméticas, por exemplo, ela é uma das matérias-primas essenciais para a produção. Como resultado do processo produtivo gera-se resíduos sólidos e líquidos, os quais contribuem com a poluição dos corpos hídricos se não tratados.

A partir dessa preocupação e visando manter o equilíbrio entre a produção e a conservação do meio ambiente, foram criadas legislações, como por exemplo, as Resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) Nº 357/05 e Nº 430/11 em esfera nacional, que estabelecem condições e padrões de lançamento de efluentes nos corpos hídricos.

O tratamento de efluentes abrange processos físicos, químicos ou biológicos, mas na maioria das vezes é necessário utilizar mais de um processo para que o efluente possa ser lançado em um corpo receptor em condições adequadas. Atualmente tecnologias com soluções inovadoras de tratamento de efluentes estão sendo desenvolvidas e aperfeiçoadas constantemente, a exemplo da eletrofloculação (EF).

De acordo com a publicação anual de 2016 da Associação Brasileira da Indústria de Higiene Pessoal, Perfumaria e Cosméticos (ABIHPEC), o Brasil conta com pouco mais de 2.600 empresas de cosméticos regularizadas pela Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA). Estas, são responsáveis pela geração diária de efluentes, os quais necessitam de tratamento apropriado.

O efluente gerado por indústrias de cosméticos é caracterizado por meio da presença de óleos e graxas, sulfetos, despejos amoniacais, tensoativos, fosfatos e polifosfatos. Em decorrência desses compostos, os efluentes possuem uma alta Demanda Química de Oxigênio (DQO) (ABIHPEC, 2005; BOROSKI et al., 2009; MELO et al., 2013).

Com o objetivo de tratar estes efluentes, as tecnologias não convencionais vêm ganhando destaque, como é o caso da EF, que possui grande versatilidade e eficiência, além de tornar-se indispensável em alguns casos para o tratamento de efluentes que possuam poluentes refratários como os compostos orgânicos estáveis, os quais são de difícil degradação biológica (CHEN, 2004; BOROSKI et al., 2009; FAJARDO et al., 2015; AN et al., 2017).

A EF baseia-se em um processo eletroquímico no qual envolve a geração de coagulantes “*in situ*”. Eletrodos metálicos são imersos no efluente e conectados a uma fonte de alimentação, a mesma propicia a passagem de corrente elétrica pelos eletrodos ocasionando assim reações de oxidação e redução que resultam na produção do coagulante, este por sua vez, possibilita a coagulação, floculação e flotação das partículas a serem removidas (CHEN, 2004).

O ferro (Fe) é um dos materiais comumente utilizados nos eletrodos, os mesmos podem ser fabricados a partir de placas ou através do reaproveitamento de retalhos e fresas de Fe. Além do mais, o Fe é um material facilmente encontrado e com custo relativamente baixo (CHEN, 2004; KHANDEGAR, SAROHA; 2013).

Sendo assim, este estudo teve como foco principal aplicar a técnica de EF utilizando o Fe como eletrodo de sacrifício, em um efluente de indústria cosmética, afim de avaliar a eficiência do tratamento.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral do presente estudo consiste em aplicar a técnica de EF utilizando Fe como eletrodo de sacrifício em um efluente de indústria cosmética, a fim de analisar a eficiência da técnica sob diferentes condições de intensidade de corrente e tempo de tratamento.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do estudo consistem:

1. Caracterizar o efluente proveniente da indústria cosmética por meio da análise de parâmetros físico-químicos: temperatura, cor aparente, turbidez, pH, absorvância, condutividade, Oxigênio Dissolvido (OD), DQO, sólidos sedimentáveis, Sólidos Suspensos Totais (SST), Sólidos Suspensos Fixos (SSF), Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) e o teor de óleos e graxas;
2. Avaliar a eficiência da EF na remoção de DQO, turbidez, cor aparente e absorvância com uso de eletrodo de sacrifício de Fe;
3. Definir as condições ótimas de remoção de DQO, turbidez, cor aparente e absorvância, baseado no Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR);

4. Analisar a eficiência da EF, a partir das condições de tempo e corrente otimizadas, com uso de eletrodo de Fe;
5. Estimar a quantidade de Fe residual no efluente tratado;
6. Realizar uma análise comparativa do efluente de indústria cosmética tratado por EF, em relação aos padrões para lançamento de efluentes em corpos hídricos estipulados pelas Resoluções 357/05 e 430/11 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e Resolução 128/06 do Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA);

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste item apresenta-se uma revisão teórica associada ao efluente proveniente da indústria cosmética, aos parâmetros relacionados a caracterização e tratamento do efluente, assim como uma abordagem sobre a tecnologia de EF empregada no tratamento.

2.1 INDÚSTRIA COSMÉTICA

A indústria brasileira de cosméticos tem se revelado um dos mais vigorosos do país, com um crescimento médio de 10% a. a., mantendo-se ascendente nos últimos 18 anos segundo a Associação Brasileira da Indústria de Higiene Pessoal, Perfumaria e Cosméticos (ABIHPEC, 2014). O crescimento contínuo é influenciado principalmente pela participação da mulher no mercado de trabalho, aumento da expectativa de vida, aumento do número de consumidores masculinos além da utilização de tecnologias de ponta e lançamentos constantes de produtos no mercado.

De acordo com a publicação anual de 2016 da ABIHPEC, o Brasil conta com pouco mais de 2.600 empresas de cosméticos regularizadas pela ANVISA, sendo que vinte delas são de grande porte, alcançando um faturamento acima de R\$ 200 milhões, os quais representam 75 % do faturamento total do setor.

A ANVISA foi criada com o objetivo de regulamentar, controlar e fiscalizar a qualidade de produtos e substâncias promovendo a proteção e prevenção de agravos à saúde da população, sendo assim, os produtos cosméticos também são incluídos neste contexto.

Desta forma, a ANVISA definiu em sua Resolução da Diretoria Colegiada (RDC) Nº 79 de 28 de agosto de 2000: cosméticos, produtos de higiene e perfumes como preparações contendo substâncias naturais ou sintéticas que servem para o uso externo de todas as partes do corpo humano, com o objetivo de limpar, perfumar, alterar a aparência, corrigir odores corporais e até mesmo para protegê-los ou mantê-los em bom estado.

As matérias-primas e produtos auxiliares empregados pelo setor é bem diversificado, dentre eles está presente a água, detergentes, emulsificantes, ésteres de ácidos graxos, polímeros (PEG), sais quaternários de amônio, corantes, pigmentos, solventes orgânicos, álcalis (soda e potassa), conservantes (metilparabeno, propilparabeno e formol), peróxido de hidrogênio, além de óleos essenciais e outros (ABHIPEC, 2005).

O processo produtivo consiste basicamente em oito etapas, são estes: recebimento de matérias-primas, armazenagem, pesagem e separação de matérias-primas para produção do lote,

produção, análises, envase/embalagem, armazenamento de produtos acabados e por fim, a expedição. A fabricação dos cosméticos é caracterizada por um baixo consumo de energia pois a maioria dos produtos são feitos em temperatura ambiente, porém, há um grande consumo de água pois a mesma está presente como uma das principais matérias-primas (ABHIPEC, 2005; ALVES, 2009).

2.2 EFLUENTES DA INDÚSTRIA COSMÉTICA

A Norma Brasileira, NBR N° 9800 de 1987 define efluente líquido industrial como sendo qualquer despejo resultante do estabelecimento industrial, incluindo assim, os efluentes resultantes do processo industrial, águas de resfriamento poluídas, águas pluviais poluídas e também as provenientes do esgoto doméstico.

A indústria cosmética gera efluentes líquidos diariamente, em decorrência das etapas de produção, sendo que as quantidades dependem principalmente da frequência de realização de lavagens e limpezas. A composição destes efluentes podem variar de indústria para indústria devido à diferença de matéria-prima e quantidade de água utilizada nos processos (ABHIPEC, 2005; ALVES, 2009).

Muitas destas substâncias utilizadas como matérias-primas estarão presentes no efluente gerado, algumas podem ocorrer em concentrações acima dos padrões estabelecidos pela legislação ambiental, como por exemplo, óleos e graxas, sulfetos, despejos amoniacais, tensoativos, fosfatos e polifosfatos (MELO, 2012). Em decorrência a esses compostos os efluentes possuem uma alta DQO, indicando assim, um alto índice de poluição (BOROSKI et al., 2009; BAUTISTA et al., 2010; MELO et al., 2013).

Os sulfetos além de apresentarem toxicidade possuem um odor desagradável. Os tensoativos mesmo não apresentando alta toxicidade resistem a biodegradação, além de ter efeito bactericida que prejudica os processos biológicos e o funcionamento dos ecossistemas aquáticos. Os despejos amoniacais por sua vez, além de serem tóxicos propendem a alcalinizar o meio líquido (ABHIPEC, 2005).

Melo et al. (2013) confirmou em seu estudo que o efluente da indústria cosmética possui uma elevada toxicidade, a mesma está associada com os sólidos em suspensão, compostos orgânicos voláteis e com os surfactantes. Ressalta-se que a alta carga de surfactantes é considerada como a principal fonte de toxicidade das águas residuárias pois estes afetam os organismos aquáticos.

Mesmo que os cosméticos estejam entre os compostos mais comumente encontrados nas

águas superficiais, ainda são poucos os estudos relacionados ao risco potencial da sua liberação nos corpos receptores (BRAUSCH; RAND, 2011). Neste contexto, o tratamento dos efluentes torna-se essencial, afim de evitar danos a qualidade de vida aquática e do ser humano, conseqüentemente a busca por tecnologias inovadoras e eficientes para o tratamento destes efluentes tende a crescer consideravelmente.

2.3 ELETROFLOCULAÇÃO

Afim de atender os padrões exigidos pela legislação, o desenvolvimento de novas tecnologias tem sido estimulado nos últimos anos. Dentre as tecnologias eletroquímicas, a EF tem sido investigada nas duas últimas décadas especialmente para o tratamento de efluentes. Além da simplicidade do processo de EF, o método é confiável e apresenta baixos custos para o tratamento de efluentes, pois não necessita de produtos químicos adicionais (YUKSEL et al., 2011).

A EF utiliza uma fonte de corrente contínua entre eletrodos de sacrifício metálicos submersos no efluente. Os materiais dos eletrodos mais utilizados no processo da EF são de Al e de Fe, devido a sua disponibilidade, seu baixo custo, além de proporcionar uma grande eficiência ao processo (AOUDJ et al., 2010; KHANDEGAR; SAROHA, 2013).

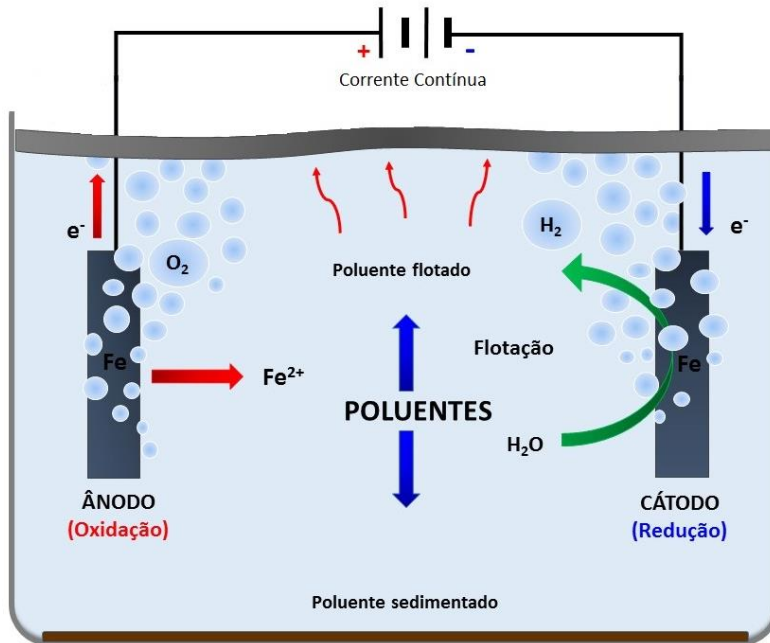
Atualmente existem diversos tipos de reatores de EF, sendo o reator monopolar o mais utilizado em tratamento de efluentes industriais. Em um reator monopolar com arranjo em paralelo a corrente elétrica é dividida entre o cátodo e o ânodo. Sendo que esta combinação requer um potencial menor se comparado com ligações em série (CERQUEIRA, 2006; KOBYA et al., 2011).

Eletrodos em conexão paralela são ligados em uma fonte de corrente contínua, a corrente por sua vez, provoca a oxidação do ânodo, produzindo íons metálicos (coagulante). A EF gera também microbolhas de gases de oxigênio (O₂) no ânodo, e de hidrogênio (H₂) no cátodo. Possibilitando assim a coagulação, floculação e flotação dos compostos a serem removidos (MOLLAH et al., 2001; AN et al., 2017).

O coagulante formado através da oxidação do eletrodo é responsável pela neutralização das cargas superficiais, desestabilização de partículas coloidais e quebra de emulsões. As partículas desestabilizadas são aglomeradas pelos hidróxidos de Fe ou Al, beneficiando a formação e o crescimento dos flocos. Os flocos absorvem as microbolhas de O₂ e H₂, carregando assim as impurezas e contaminantes em suspensão no meio para a superfície, proporcionando

dessa forma a clarificação do efluente, conforme exemplificado na Figura 1 (ELABBAS et al., 2016; MELCHIORS et al., 2016).

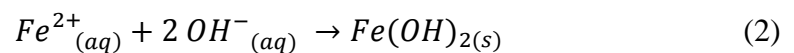
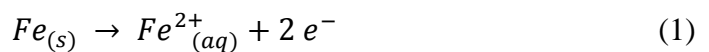
Figura 1 – Representação esquemática das reações que ocorrem na EF



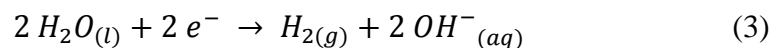
Fonte: Elaborado pelo autor.

Estudos recentes assumem que a oxidação do ânodo libera Fe^{2+} , e no cátodo são formados microbolhas de hidrogênio (SASSON et al., 2009; HAKIZIMANA et al., 2017). As reações eletrolíticas que ocorrem com os eletrodos de Fe, para a formação do agente coagulante são descritas nas Equações 1, 2, 3 e 4 a seguir, conforme proposto por Malakootian, Mansoorian e Moosazadeh (2010).

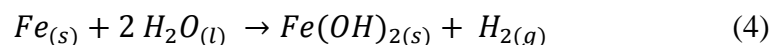
Ânodo:



Cátodo:



Reação Global:



Para que o processo de EF seja realizado com eficiência é preciso conhecer o sistema de tratamento e controlar algumas variáveis que podem influenciar e interferir, tais como pH do meio, a intensidade de corrente aplicada, condutividade do efluente a ser tratado, temperatura e

o tipo de eletrodos (MELCHIORS et al., 2016; HAKIZIMANA et al. 2017).

2.3.1 Aplicações da EF para o tratamento de efluentes industriais

Atualmente a EF vêm sendo aplicada no tratamento de diferentes efluentes industriais. Yuksel, Gurbulak e Eyvaz (2011), estudaram a EF aplicado ao efluente de indústria têxtil e observaram uma eficiência de remoção de 81 % de DQO, 85 % de Carbono Orgânico Total (COT) e 93,7 % para turbidez. Tones (2015), estudou a utilização de um painel fotovoltaico como fonte de alimentação para EF, onde verificou uma eficiência acima de 90 % na remoção da cor em misturas de corantes têxteis.

Elabbas et al. (2016) demonstraram em seu estudo que a EF é simultaneamente eficiente para remover cromo e DQO de efluentes de curtume altamente concentrados, onde foi possível atingir 99,7 % de remoção de cromo e 95 % de remoção de DQO após 360 min de tratamento a uma densidade de corrente 400 A m^{-2} .

Os pesquisadores Deghles e Kurt (2016) aplicaram a técnica híbrida de eletrofloculação/eletrodiálise no tratamento de efluentes de curtumes e obtiveram eficiência de remoção de DQO, $\text{NH}_3\text{-N}$, cromo e cor de 92, 100, 100, 100 % correspondendo respectivamente a um valor de condutividade de $0,371 \text{ mS cm}^{-1}$ a 45 min com eletrodos de Al. Já com o uso de eletrodos de Fe a eficiência de remoção de DQO, $\text{NH}_3\text{-N}$, cromo e cor foi de 87; 100; 100; 100 %, correspondendo respectivamente a um valor de condutividade de $1,5 \text{ mS cm}^{-1}$ a 75 min. Desta forma, os resultados satisfatórios provaram que a EF aliada a outras técnicas de tratamento é uma forma segura e eficaz para a remoção dos poluentes presentes em efluentes de curtume.

Com o objetivo de investigar a eficiência da EF Melchiors et al. (2016) aplicaram a técnica de tratamento em efluentes da indústria de laticínios. Como resultados obtiveram eficiência de remoção de 97 % para DQO e 99,6 % para turbidez utilizando eletrodos de sacrifício de Al, já para os eletrodos de Fe os valores de remoção foram de 97,4 % para DQO e de 99,6 % para turbidez. Evidenciando que a EF pode ser eficientemente empregada no tratamento de águas residuárias lácteas.

Biassi (2014) aplicou a EF para o tratamento de efluente de matadouro e frigorífico de suínos. A eficiência do processo baseou-se na remoção da cor, turbidez e DQO, onde obteve resultados de remoção em torno de 98, 99 e 81%, respectivamente. Mesmo com uma remoção de 81 % para o parâmetro de DQO, o mesmo ainda não atende ao valor máximo permitido pela legislação ambiental, necessitando-se novo tratamento seguinte.

A EF pode ser aplicada também a efluentes farmacêuticos e cosméticos como relatam Boroski et al. (2009) em seu estudo. A técnica foi executada em combinação com foto-auxiliar de TiO_2 , onde a EF removeu a maioria das substâncias orgânicas e materiais suspensos, porém os compostos refratários permaneceram. Em seguida, aplicando a fotocatalise heterogênea, estes foram degradados até a mineralização. Demonstrando assim, ser eficiente em combinação com outras técnicas de tratamento, como é o caso da fotocatalise.

2.3.2 Vantagens e desvantagens da EF

Um dos fatores de grande relevância da EF sobre as demais tecnologias não convencionais para o tratamento de efluentes, é que a mesma necessita apenas de equipamentos simples, onde pode ser projetada para qualquer capacidade de tratamento de efluentes. Salienta-se também que a técnica não necessita de nenhuma adição química, reduzindo desta forma a possibilidade de formação de poluentes secundários (KHANDEGAR; SAROHA, 2013; HAKIZIMANA et al., 2017).

O teor de sólidos dissolvidos totais após o efluente passar pela EF por exemplo, é menor em comparação com os tratamentos químicos. Se a água for recuperada para reutilizá-la dentro da indústria a baixa concentração de sólidos irá favorecer na diminuição dos custos de recuperação da água. A produção de lodo também é baixa, reduzindo assim os custos com a disposição final (MOLLAH et al., 2001).

A EF possui algumas limitações, uma delas está relacionada com a condutividade do efluente, pois a técnica demanda de uma condutividade mínima para que o tratamento obtenha eficiência (KHANDEGAR; SAROHA, 2013). Os eletrodos de sacrifício necessitam de substituição regularmente devido a passivação, esta é ocasionada pela formação de uma película que impede a oxidação dos eletrodos (HAKIZIMANA et al., 2017).

2.4 PARÂMETROS DE QUALIDADE FÍSICO-QUÍMICOS

Os parâmetros de qualidade são grandezas utilizadas para indicar as características da água e efluentes. Os parâmetros podem ser de natureza física, química ou biológica, os quais servem para prever impactos ambientais gerados por efluentes lançados em um corpo receptor, além de servir para avaliar o desempenho de um tratamento (JORDÃO; PESSÔA, 2011). A seguir são descritos os principais parâmetros utilizados na caracterização de efluentes.

2.4.1 pH

O potencial Hidrogeniônico (pH), pode ser definido como o logaritmo negativo da concentração de íon hidrogênio, que representa a intensidade das condições ácidas ou alcalinas do meio aquático. O pH é um parâmetro de grande relevância para o monitoramento operacional de estações de tratamento de águas e efluentes pela sua interferência em diversos processos e operações (JORDÃO; PESSÔA, 2011).

A uma temperatura de 25 °C, os valores de pH inferiores a 7 indicam condições ácidas, os valores acima, constituem condições alcalinas da água natural. As águas naturais apresentam pH variando de 6 a 8,5, intervalo propício à manutenção da vida aquática (LIBÂNIO, 2010).

A legislação estabelece as restrições de faixa de pH para lançamento de efluentes nos corpos receptores. A Resolução do CONAMA N° 430/2011 estipula em seu Art. 16, inciso primeiro que os valores de pH devem ficar em uma faixa entre 5 e 9.

2.4.2 Temperatura

A temperatura é um parâmetro físico e indica a magnitude da energia cinética do movimento aleatório das moléculas e sintetiza a transferência de calor para a massa líquida (LIBÂNIO, 2010).

Este parâmetro é de grande importância, uma vez que pode afetar a saturação de OD nos corpos hídricos, as elevações da temperatura podem ocasionar o aumento da taxa de reações químicas e biológicas e a elevação da taxa de transferência de gases ocasionando odores desagradáveis (JORDÃO; PESSÔA, 2011; VON SPERLING, 2005).

2.4.3 Cor

A cor da água ou efluente é produzida através da reflexão da luz em partículas coloides, onde estão finamente dispersas de origem orgânica com dimensões inferiores a 10 µm, relacionando-se com a concentração de carbono orgânico que está presente no meio aquático. A cor também pode estar relacionada com a presença de ferro e manganês ou com os diversos tipos de efluentes industriais lançados no corpo receptor (LIBÂNIO, 2010).

Para avaliação de águas, distingue-se a cor aparente, na qual é considerada as partículas em suspensão, da cor verdadeira (LIBÂNIO, 2010). A determinação da cor aparente pode ser

realizada comparando-se a amostra com um padrão de cobalto-platina, cuja unidade é apresentada em unidades de cor (uC) ou unidade Hazen (uH) (APHA, 2005).

2.4.4 Turbidez

A turbidez consiste em uma característica física, atribuindo a água uma aparência turva, devido a presença de partículas suspensas. Pode ser definida como o grau de interferência, que os sólidos suspensos na água, causam na passagem de um feixe de luz, proveniente da presença de compostos tóxicos e organismos patogênicos (VON SPERLING, 2005).

A turbidez é a medida das propriedades de reflexão de luz de uma massa líquida que contém partículas suspensas e coloidais. Normalmente a turbidez é causada devido à presença de partículas de argila, silte, plâncton, microrganismos e matéria orgânica e inorgânica particulada (LIBÂNIO, 2010; JORDÃO; PESSÔA, 2011).

2.4.5 Condutividade elétrica

A condutividade elétrica também chamada de condutância específica, indica a capacidade pela qual a água tem de conduzir corrente elétrica em decorrência das substâncias dissolvidas que se desagregam em ânions e cátions. Dentre as substâncias encontra-se usualmente íons de Fe e Mn, além de K^+ , Cl^- , Na^+ , Ca^+ e Mg^{+2} (LIBÂNIO, 2010).

Apesar de que não seja um parâmetro integrante do padrão de potabilidade brasileiro, a condutividade consiste em um importante indicador de eventuais lançamentos de efluentes por relacionar-se à concentração de sólidos totais dissolvidos (STD) (LIBÂNIO, 2010).

2.4.6 Oxigênio Dissolvido (OD)

A concentração de OD é o parâmetro que melhor expressa a qualidade de um ambiente aquático, onde existe uma concentração de saturação que está relacionada com a temperatura, salinidade e altitude (JORDÃO; PESSÔA, 2011).

Este parâmetro é essencial para os organismos aeróbios, uma vez que os mesmos fazem uso do OD para a realização de seus processos respiratórios podendo causar uma diminuição da sua concentração no meio. Caso o oxigênio venha a ser todo consumido, as condições anaeróbias irão predominar, podendo causar maus odores (JORDÃO; PESSÔA, 2011; VON SPERLING, 2005).

As variações do OD que podem ocorrer estão associadas aos fenômenos físicos, químicos e biológicos dos corpos hídricos. Para a manutenção da vida aquática aeróbia os teores mínimos de oxigênio dissolvido estão na faixa de 2 a 5 mg L⁻¹. Ressalta-se que para a maioria dos peixes o valor de OD é de 4 mg L⁻¹ para manter a sobrevivência das espécies (LIBÂNIO, 2010).

2.4.7 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A DQO indica a quantidade de oxigênio fundamental para oxidar a parcela orgânica de uma amostra, constituindo-se um importante indicador de qualidade das águas (JORDÃO; PESSÔA, 2011). A DQO é um parâmetro indispensável nos estudos de caracterização de esgotos sanitários e de efluentes industriais. Este parâmetro é muito útil quando utilizado em conjunto com a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) para observar a biodegradabilidade de despejos (CETESB, 2009).

Nos esgotos domésticos os valores de DQO podem variar de 200 e 800 mg.L⁻¹, no entanto para despejos de origem industrial as concentrações são ainda maiores. Dentre as vantagens da análise de DQO, está a rapidez para a obtenção de resultados que serve como indicativo do oxigênio requerido para estabilizar a matéria orgânica (JORDÃO; PESSÔA, 2011).

2.4.8 Sólidos Sedimentáveis

Os sólidos sedimentáveis podem ser definidos como a parcela de sólidos suspensos que tendem a sedimentar quando mantidos em repouso durante uma hora em um recipiente denominado de Cone Imhoff com capacidade para um litro, resultando na capacidade de sedimentação da matéria sólida (LIBÂNIO, 2010)

De acordo com Jordão e Pessôa (2011), os sólidos sedimentáveis constituem-se em um parâmetro para controle operacional das Estações de Tratamento de Efluentes (ETE), e também para avaliar a qualidade do efluente a ser lançado em um corpo receptor.

2.4.9 Sólidos em Suspensão

Os sólidos em suspensão seja ele de origem orgânica ou inorgânica, são responsáveis por conferir turbidez à água, afetando a captação de luz pelos organismos aquáticos responsáveis pela fotossíntese. Salienta-se que a presença de metais pesados presente no material sólido

particulado poderá acarretar em efeitos tóxicos a fauna e a flora do corpo receptor (SANT'ANNA JUNIOR, 2013).

Os sólidos em suspensão totais (SST) são divididos em duas categorias. Os sólidos em suspensão fixos (SSF) estão relacionados ao material de origem inorgânica que permanece retida na membrana após a calcinação (500-550 °C). Os sólidos em suspensão voláteis (SSV) estão associados ao material particulado de origem orgânica que volatiliza após a calcinação (500-550 °C), em outras palavras, é o resultado da subtração entre os SST e os SSF (SANT'ANNA JUNIOR, 2013).

2.4.10 Óleos e Graxas

Óleos e graxas ou também chamados de gorduras podem estar presentes sob a forma de óleos vegetais, minerais e derivados de petróleo (querosene e óleo lubrificante), tendo origem em efluentes domésticos, postos de gasolinas ou indústrias (JORDÃO; PESSÔA, 2011).

O teor de óleos e graxas é um indicador de uma imensa classe de substâncias que podem ser solubilizadas e extraídas através de solventes orgânicos. Este parâmetro tem a capacidade de quantificar uma imensa classe de poluentes hidrofóbicos, que por sua vez, interagem com membranas biológicas, podendo acarretar em efeitos tóxicos e acumulativos (SANT'ANNA JUNIOR, 2013).

A solubilidade dos óleos e graxas prejudica a sua degradação em estações de tratamento de efluentes utilizando processos biológicos. Quando presentes em corpos hídricos comumente utilizados para abastecimento público, podem ocasionar problemas no tratamento da água, além de prejudicar a transferência do oxigênio da atmosfera para o meio hídrico, acarretando em problemas à vida aquática (ABHIPEC, 2005).

2.4.11 Absorvância

A absorvância de uma solução ou efluente está relacionada com a medida de luz em um certo comprimento de onda, no qual é absorvida pelos elementos em uma solução, normalmente é medida em um espectrofotômetro em 254 nm, para uma extensão de 1,0 cm. A absorvância está relacionada com a transmitância de forma logarítmica (SKOOG et al., 2006; JORDÃO; PESSÔA, 2011).

A transmitância é importante nos casos que envolvem a desinfecção por radiação ultravioleta, onde a eficiência depende deste parâmetro. Destaca-se que a transmitância pode ser

afetada pela existência de sólidos em suspensão e também por compostos de ferro e substâncias húmicas (JORDÃO; PESSÔA, 2011).

2.5 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL E PADRÕES DE LANÇAMENTO DE EFLUENTES EM CORPOS HÍDRICOS

A Constituição Federal Brasileira de 1988 prevê em seu Art. 225 que “todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações”. Visando atender a Constituição Federal e preservar a qualidade das águas do país foram criadas leis, normas, portarias, resoluções e legislações.

A Resolução do CONAMA Nº 357/2005 dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, garantindo assim, a saúde e o bem-estar da população, além de do equilíbrio ecológico aquático.

A Resolução Nº 430/2011 do CONAMA complementa e altera a Resolução Nº 357/2005, onde em seu Art. 3º está previsto que “os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados diretamente nos corpos receptores após o devido tratamento e desde que obedçam às condições, padrões e exigências dispostos nesta Resolução e em outras normas aplicáveis”.

Muitos estados possuem a sua própria legislação, como é o caso do Rio Grande do Sul. O Conselho Estadual do Meio Ambiente (CONSEMA) dispõe em sua Resolução Nº 128/2006 sobre a fixação de padrões de lançamento de efluentes líquidos para fontes de emissão que lancem seus efluentes em águas superficiais no Rio Grande do Sul. Salienta-se que os órgãos estaduais podem adotar os mesmos padrões, complementá-los conforme a necessidade local e até mesmo aplicá-los de forma mais restritiva.

O efluente quando lançado em um corpo receptor deverá atender aos padrões de emissão e qualidade afim de garantir que o corpo receptor mantenha seu enquadramento, conforme definido na Resolução do CONAMA Nº 357/2005. A Tabela 1, mostra alguns dos parâmetros usuais de caracterização de efluentes industriais, para lançamento em corpo hídrico de água doce, Classe II.

Tabela 1 – Padrões de Lançamento de Efluentes em Corpo Hídrico Classe II conforme Resolução do CONAMA 357/05, CONAMA 430/11 e CONSEMA 128/06

Parâmetros	Resolução 357/2005 do CONAMA	Resolução 430/2011 do CONAMA	Resolução 128/2006 do CONSEMA	Unidade
Cor verdadeira	≤ 75,0	≤ 75,0	-	uC
Temperatura	-	< 40,0	< 40,0	°C
OD	> 5,0	> 5,0	-	mg L ⁻¹ O ₂
pH	6,0 a 9,0	5,0 a 9,0	6,0 a 9,0	-
Turbidez	≤ 100,0	≤ 100,0	-	UNT
Sólidos sedimentáveis	-	≤ 1,0	≤ 1,0	mL L ⁻¹
Óleos minerais	Virtualmente ausentes	≤ 20,0	≤ 10,0	mg L ⁻¹
Óleos vegetais e gorduras animais		≤ 50,0	≤ 30,0	mg L ⁻¹
Ferro dissolvido	≤ 0,3	≤ 15,0	-	mg L ⁻¹

Fonte: Adaptado da Resolução do CONAMA 357/05, CONAMA 430/11 e CONSEMA 128/06.

Embora as Resoluções do CONAMA N° 357/2005 e N° 430/2011 não façam referência ao parâmetro de DQO, algumas legislações ambientais estaduais estabelecem limites máximos para o mesmo. No caso da Resolução do CONSEMA N° 128/2006 fica estabelecido a variação dos padrões de emissão para a DQO e sólidos suspensos (SS) conforme as faixas de vazão. A Tabela 2 mostra os limites de lançamento de efluentes em função da vazão, os quais foram estabelecidos pelo CONSEMA N° 128/2006.

Tabela 2 – Limites de lançamento para os parâmetros de DQO e SS conforme Resolução do CONSEMA 128/06 para o Estado do Rio Grande do Sul

Faixa de Vazão (m³ dia⁻¹)	DQO (mg L⁻¹)	SS (mg L⁻¹)
Q <20	≤ 400	≤ 180
20 ≤ Q <100	≤ 360	≤ 155
100 ≤ Q <500	≤ 330	≤ 125
500 ≤ Q <1000	≤ 300	≤ 100
1000 ≤ Q <3000	≤ 260	≤ 80
3000 ≤ Q <7000	≤ 200	≤ 70
7000 ≤ Q <10000	≤ 180	≤ 60
10000 ≤ Q	≤ 150	≤ 50

Notas: (Q) vazão, (SS) sólidos suspensos Fonte: Adaptado CONSEMA 128/06.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização dos procedimentos experimentais e análises laboratoriais, foi utilizada a infraestrutura do Laboratório de Águas e Ecotoxicologia e Laboratório de Química Instrumental, ambos localizados na Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), campus Cerro Largo – RS.

3.1 AMOSTRA

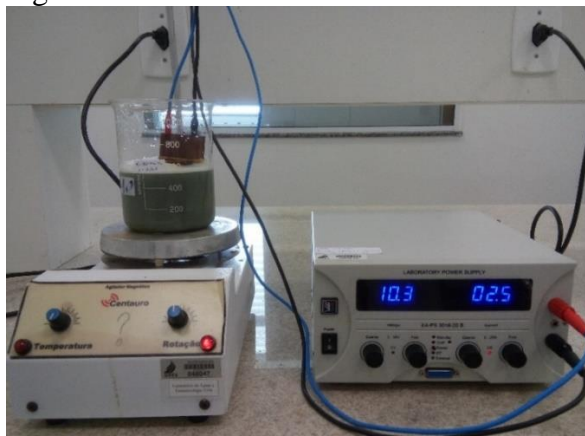
O efluente utilizado no estudo, provém de uma indústria de cosméticos localizada na região do Vale do Taquari no Estado do Rio Grande do Sul. A empresa conta com uma instalação de 6.000 m² e atua no mercado de cosméticos a mais de vinte anos. Possui um portfólio com cerca de 500 itens, divididos em produtos para o corpo, cabelo, linha infantil, linha verão e maquiagem.

Todo o efluente gerado pela empresa é previamente armazenado em caixas de fibra, para posterior destino a uma empresa terceirizada que realiza o devido tratamento. Foram coletados cerca de 50 litros do efluente e armazenados em uma bombona.

3.2 MÓDULO EXPERIMENTAL

Para o procedimento da EF, utilizou-se um reator em escala laboratorial, com agitação magnética, sob temperatura ambiente. O reator foi constituído por uma fonte de alimentação marca *Laboratory Power Supply*, modelo EA-PS 3016-20 B, um béquer com capacidade para 1 L de efluente e um par de eletrodos de Fe, conforme observa-se na Figura 2.

Figura 2 – Reator de EF utilizado no tratamento



Fonte: Autor.

3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Utilizou-se eletrodos de Fe, com área submersa em solução de 25 cm² para cada eletrodo, os quais foram isolados eletricamente a uma distância de 1 cm. O volume para tratamento foi estabelecido em 500 mL para cada ensaio a uma agitação de 600 rotações por minuto (RPM). O tempo de estabilização da solução eletrofloculada, para posterior coleta e análise, foi fixado em 30 min. Analisou-se os parâmetros DQO, turbidez, cor aparente e absorvância em cada ensaio.

Quando a condutividade inicial do efluente não for suficiente para atingir a corrente elétrica pretendida, será adicionado cloreto de sódio (NaCl) afim de aumentar a condutividade do efluente.

3.4 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para o planejamento experimental deste estudo utilizou-se como ferramenta o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) (RODRIGUES; LEMMA, 2009). Foram trabalhadas duas variáveis independentes: corrente elétrica (i) e o tempo de tratamento (t). Realizou-se um planejamento fatorial completo 2², incluindo 4 pontos axiais e 4 repetições no ponto central, totalizando 12 ensaios de EF.

A eficiência da EF foi baseada na remoção de DQO, turbidez, cor aparente e absorvância. Na Equação 5, tem-se o modelo geral para remoção destes parâmetros.

$$\% \text{ Remoção} = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_2 x_2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \varepsilon \quad (5)$$

Em que: x_i e x_i^2 são as variáveis codificadas, β_0 , β_i , β_{ii} e β_{ij} são os parâmetros do modelo de regressão e ε representa o erro experimental.

No Quadro 1 está representada a matriz do delineamento experimental.

Quadro 1 – Matriz do delineamento experimental

	Ensaio	X ₁	i (A)	X ₂	t (min)
Pontos Fatoriais	1	1	4,00	1	35,00
	2	1	4,00	-1	10,00
	3	-1	1,00	1	35,00
	4	-1	1,00	-1	10,00
Pontos Centrais	5	0	2,50	0	22,50
	6	0	2,50	0	22,50
	7	0	2,50	0	22,50
	8	0	2,50	0	22,50
Pontos Axiais	9	1,41	4,60	0	22,50
	10	-1,41	0,39	0	22,50
	11	0	2,50	1,41	40,10
	12	0	2,50	-1,41	4,90

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores das variáveis codificadas são mostrados na Tabela 3. Ressalta-se que os valores das variáveis independentes foram definidos a partir de testes preliminares com o efluente de indústria cosmética.

Tabela 3 – Valores estudados para as variáveis independentes

Variável Independente	Código	-1,41	-1	0	1	1,41
i (A)	X ₁	0,39	1,00	2,50	4,00	4,60
t (min)	X ₂	4,90	10,00	22,50	35,00	40,10

Fonte: Elaborado pelo autor.

3.5 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE

Para a caracterização inicial do efluente de indústria cosmética analisou-se parâmetros físico-químicos e seguiu-se as metodologias e procedimentos descritos no *Standard Methods* (APHA, 2005), conforme especificado na Tabela 4. Ressalta-se que todos os parâmetros foram novamente analisados após a EF utilizando as condições de tempo e corrente otimizadas.

Tabela 4 – Parâmetros físico-químicos analisados

Parâmetro	Unidade	Equipamento	Referência Metodológica
Absorvância	ua	Espectrofotômetro UV-Visível – Evolution 201	5910 B APHA (2005)
Condutividade	$\mu\text{S cm}^{-1}$	Condutivímetro Digmed – DM 32	2510 B APHA (2005)
Cor aparente	uC	Colorímetro Del Lab – DLA-COR	2120 APHA (2005)
DQO	$\text{mg L}^{-1} \text{O}_2$	-	5210 B APHA (2005)
Óleos e graxas	mg L^{-1}	-	5520 D APHA (2005)
OD	$\text{mg L}^{-1} \text{O}_2$	Sonda YSI Professional Plus	4500 G APHA (2005)
pH	-	pHmetro MS TecnoPON – mPA 210	4500 APHA (2005)
Sólidos em suspensão	mg L^{-1}	-	2540 B, C, D e E APHA (2005)
Sólidos sedimentáveis	mg L^{-1}	Cone de imhoff	2540 F APHA (2005)
Temperatura	$^{\circ}\text{C}$	Sonda YSI Professional Plus	2550 B APHA (2005)
Turbidez	UNT	Turbidímetro MS TecnoPON – TB 1000P	2130 B APHA (2005)

Notas: (APHA) *American Public Health Association*, 2005. Fonte: Elaborado pelo autor.

3.6 DETERMINAÇÃO DOS ÍONS DE FERRO

Para a quantificação dos íons de Fe presentes nas amostras eletrofloculada e não eletrofloculada as mesmas foram digeridas seguindo os procedimentos do *Standard Methods* (APHA, 2005). Em seguida as amostras foram submetidas ao Espectrofotômetro de absorção atômica com chama e forno de grafite, marca *GBA*, modelo SavantAA para obter a quantidade de ferro residual.

3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

A partir de uma análise estatística dos resultados obtidos no planejamento experimental, foi possível obter o modelo estatístico e realizar a análise de variância (ANOVA), mediante utilização do *software Microsoft Excel 2013* e do programa *Statistica® 11*. A representação gráfica do modelo constituiu-se em um gráfico de superfície, o qual auxiliou na determinação da região ótima de operação do tratamento por EF.

Uma vez que o modelo for válido para mais de uma variável resposta, aplica-se o método *Desirability* global (desejabilidade), função disponível no *software Statistica® 11*. O método proporciona a otimização simultânea de todas as variáveis respostas estudadas maximizando-se em um único valor, o qual é denominado de desejabilidade global.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção encontram-se os resultados e discussões obtidos no estudo em relação a caracterização do efluente bruto e da análise estatística, visando obter as condições otimizadas de tratamento por EF, com a utilização do eletrodo de Fe.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE DE INDÚSTRIA COSMÉTICA

Na Tabela 5, observa-se os resultados da caracterização físico-química do efluente de indústria cosmética, antes de ser submetido ao tratamento por EF, denominado bruto. Comparando-se os valores obtidos com as resoluções do CONSEMA N° 128/2006 e do CONAMA N° 357/2005 e N° 430/2011, nota-se que o efluente possui parâmetros que estão em desconformidade com os padrões para lançamento dos efluentes, tais como turbidez, pH, OD, DQO e óleos e graxas, evidenciando assim, a necessidade de realizar um tratamento antes de lançá-lo em um corpo receptor, a fim de atender as exigências ambientais.

Tabela 5 – Caracterização físico-química do efluente bruto

Parâmetros	Efluente bruto
Temperatura (°C)	25,90 ± 0,08
Cor aparente (uC)	8.989,25 ± 7,83
Turbidez (UNT)	818,67 ± 0,94
pH	5,38 ± 0,02
Condutividade (µS cm ⁻¹)	2.917,67 ± 9,67
OD (mg L ⁻¹)	1,78 ± 0,22
DQO (mg L ⁻¹ O ₂)	1.042,19 ± 43,70
Sólidos sedimentáveis (mL L ⁻¹ h ⁻¹)	0,09 ± 0,01
SST (mg L ⁻¹)	21,67 ± 2,36
SSF (mg L ⁻¹)	13,33 ± 2,36
SSV (mg L ⁻¹)	8,33 ± 2,36
Óleos e graxas (mg L ⁻¹)	57,00 ± 3,00
Absorvância a 350 nm (ua)	0,568 ± 0,00
Absorvância a 254 nm (ua)	0,238 ± 0,00
Ferro dissolvido (mg L ⁻¹)	1,96 ± 0,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a Resolução N° 430/2011 do CONAMA e N° 128/2006 do CONSEMA a temperatura de um efluente deve ser inferior a 40 °C para ser lançado no meio ambiente, neste sentido o efluente mesmo bruto atende a legislação no parâmetro temperatura. No que diz respeito aos sólidos (SST, SSF e SSV, sólidos sedimentáveis), estes foram detectados em

pequenas quantidades, também em conformidade com a legislação pertinente.

A Resolução do CONSEMA N° 128/2006 estabelece que a cor verdadeira não deve conferir mudança de coloração ao corpo receptor. Na caracterização do efluente bruto foi obtido apenas a cor aparente, a qual foi de $8.989,25 \pm 7,83$ uC, este encontra-se acima do valor estipulado pela Resolução do CONAMA N° 357 que é de 75 uC, podendo ser conferido principalmente à presença de sólidos dissolvidos e matéria em suspensão.

Para o parâmetro turbidez obteve-se um valor de $818,67 \pm 0,94$ UNT. Observa-se que esse valor encontra-se acima do padrão de lançamento de efluentes estipulado pelas Resoluções N° 357/2005 e N° 430/2010 do CONAMA, que determinam o valor máximo de 100 UNT. Este resultado pode ser atribuído a presença de matéria em suspensão (CETESB, 2009; ABOUBARAKA; ABOELFETO; EBEID, 2017).

Considerando a Resolução do CONSEMA N° 128/2006 o parâmetro pH encontra-se fora dos limites estabelecidos de lançamento. Embora o pH do efluente bruto encontra-se em meio ácido, a EF tem a capacidade de neutralizá-lo. Para efluentes ácidos, a EF tende a subir o valor do pH em virtude da redução de hidrogênio que ocorre no cátodo (CERQUEIRA, 2006; HAKIZIMANA et al., 2017).

A elevada condutividade ($2.917,67 \pm 9,67$ $\mu\text{S cm}^{-1}$) presente no efluente aponta altos teores de sólidos dissolvidos. Apesar de não possuir padrão legal para este parâmetro a CETESB (2009) estabelece que valores superiores a 100 $\mu\text{S cm}^{-1}$ indicam ambientes impactados. Por outro lado, a elevada condutividade favorece a EF, uma vez que a alta concentração de íons condutores no efluente aumentará a capacidade de condução de corrente elétrica, conseqüentemente a possibilidade de ocorrência de reações entre as substâncias presentes no efluente também será maior (CHEN, 2004; CERQUEIRA, 2006).

O alto valor de DQO no efluente bruto de indústria cosmética é indicativo de elevado teor de matéria orgânica presente. Melo (2012), avaliando a toxicidade de efluentes cosméticos obteve um resultado de DQO de 4549 mg L^{-1} , respectivamente. Já para Boroski et al. (2009), o resultado foi de 1.753 mg L^{-1} , os autores ainda identificaram um índice de OD de $8,10$ mg L^{-1} , o qual encontra-se relativamente superior ao obtido no presente estudo ($1,78 \pm 0,22$ mg L^{-1}). Apesar dos resultados apresentarem-se elevados há variações significativas entre os mesmos, estas divergências podem ser atribuídas principalmente à distinção de matérias-primas envolvidas no processo produtivo de produtos e, também, às diferentes quantidades de água utilizada nas operações.

Os óleos e graxas apresentaram-se em uma quantidade de $57,00$ mg L^{-1} . Em relação a legislação, este parâmetro encontra-se acima dos padrões de lançamento tanto para óleos

minerais quanto para óleos vegetais e gorduras animais. Para El-Gohary et al. (2010) o valor para este parâmetro foi de 169,7 mg L⁻¹ contrapondo-se os resultados nota-se que os mesmos aparecem com grande variação, esta se deve principalmente à quantidade de matéria-prima utilizada, modificando assim as características do efluente gerado.

Após realizar a varredura do efluente em um intervalo de 200 a 900 nm com o auxílio do Espectrofotômetro UV-Visível – Evolution 201, a absorvância máxima foi detectada em um comprimento de onda de 350 nm. De acordo com Boroski et al. (2009) este comprimento de onda corresponde aos grupos aromáticos conjugados.

Em relação ao ferro dissolvido, o efluente contém 1,96 mg L⁻¹, valor abaixo do estipulado pela resolução do CONAMA N° 430/2011, a qual fixa um valor máximo de 15,00 mg L⁻¹. Apesar de não se constituir em um elemento tóxico, pode ocasionar problemas para o abastecimento público de água (CETESB, 2009).

4.2 RESULTADOS DA APLICAÇÃO DE ELETROFLOCULAÇÃO

4.2.1 Eficiência na remoção de DQO, turbidez, cor aparente e absorvância (350 nm)

Com a finalidade de verificar a eficiência do tratamento sugerido no presente estudo, calculou-se a porcentagem média de remoção para as variáveis dependentes DQO, turbidez, cor aparente e absorvância (350 nm) para cada ensaio proposto. Os resultados podem ser observados no Quadro 2.

Quadro 2 – Resultados da remoção média (%) dos parâmetros analisados após a EF

Ensaio	Variáveis Codificadas		Variáveis Independentes		Variáveis Dependentes			
	X ₁	X ₂	i(A)	t(min)	% Remoção DQO	% Remoção Turbidez	% Remoção Cor Aparente	% Remoção Absorvância (350 nm)
1	1	1	4	35	49,74 ± 1,36	88,23 ± 0,32	0,00 ± 0,00	20,77 ± 1,50
2	1	-1	4	10	57,48 ± 1,48	89,74 ± 1,12	82,45 ± 2,15	82,39 ± 1,13
3	-1	1	1	35	60,89 ± 2,27	86,28 ± 3,41	84,43 ± 0,90	86,97 ± 2,89
4	-1	-1	1	10	22,16 ± 3,85	68,72 ± 1,81	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00
5	0	0	2,5	22,5	58,86 ± 1,11	89,04 ± 0,94	92,41 ± 0,23	78,87 ± 1,60
6	0	0	2,5	22,5	59,46 ± 3,83	86,89 ± 0,14	90,29 ± 5,97	85,91 ± 3,34
7	0	0	2,5	22,5	60,52 ± 1,19	95,97 ± 1,93	96,53 ± 4,12	95,42 ± 2,66
8	0	0	2,5	22,5	58,66 ± 2,44	94,46 ± 0,22	96,66 ± 1,44	94,72 ± 2,52
9	1,41	0	4,6	22,5	33,50 ± 0,76	86,77 ± 3,95	80,18 ± 0,87	84,15 ± 1,10
10	-1,41	0	0,39	22,5	34,77 ± 5,12	42,70 ± 1,87	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00
11	0	1,41	2,5	40,1	66,44 ± 2,33	82,33 ± 6,23	79,87 ± 3,23	59,51 ± 0,76
12	0	-1,41	2,5	4,9	46,24 ± 4,17	83,22 ± 3,56	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00

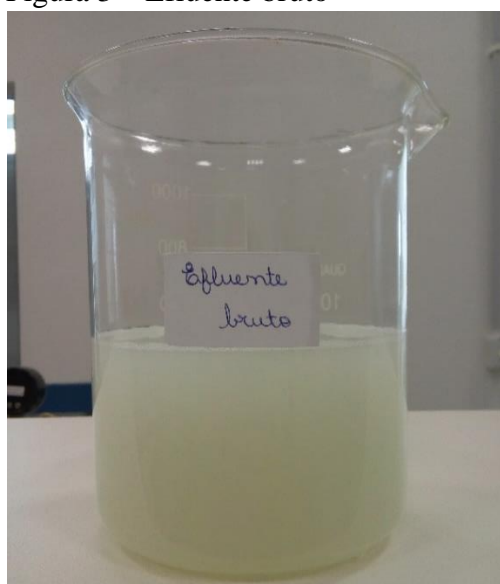
Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com os resultados do Quadro 2, verifica-se em análise simultânea de todos os ensaios, que a maiores porcentagens de remoção ocorreram no ensaio 7, tratado nas condições de tempo e corrente de 22,5 min e 2,5 A respectivamente, obtendo uma remoção de 60 % de DQO e acima de 95 % para os parâmetros turbidez, cor aparente e absorvância (350 nm).

As menores remoções foram observadas nos ensaios 4 ($22,16 \pm 3,85$ % de remoção de DQO; $68,72 \pm 1,81$ % de turbidez; sem remoção observada para os parâmetros cor aparente e absorvância (350 nm)), 10 ($34,77 \pm 5,12$ % de remoção de DQO; $42,70 \pm 1,87$ % de remoção de turbidez; sem remoção observada para os parâmetros cor aparente e absorvância (350 nm)) e 12 ($46,24 \pm 4,17$ % de remoção de DQO; $83,22 \pm 3,56$ % de turbidez; sem remoção observada para cor aparente e absorvância (350 nm)). Para as variáveis em que não foram observadas remoção ou nos ensaios em que foram observados menores valores de remoção das variáveis respostas estão atrelados a menor corrente elétrica ou menor tempo de tratamento aplicado.

Nas Figuras 3 e 4 é possível visualizar a diferença entre o efluente bruto e o efluente tratado por EF com eletrodo de Fe.

Figura 3 – Efluente bruto



Fonte: Autor.

Figura 4 – Efluente tratado por EF



Fonte: Autor.

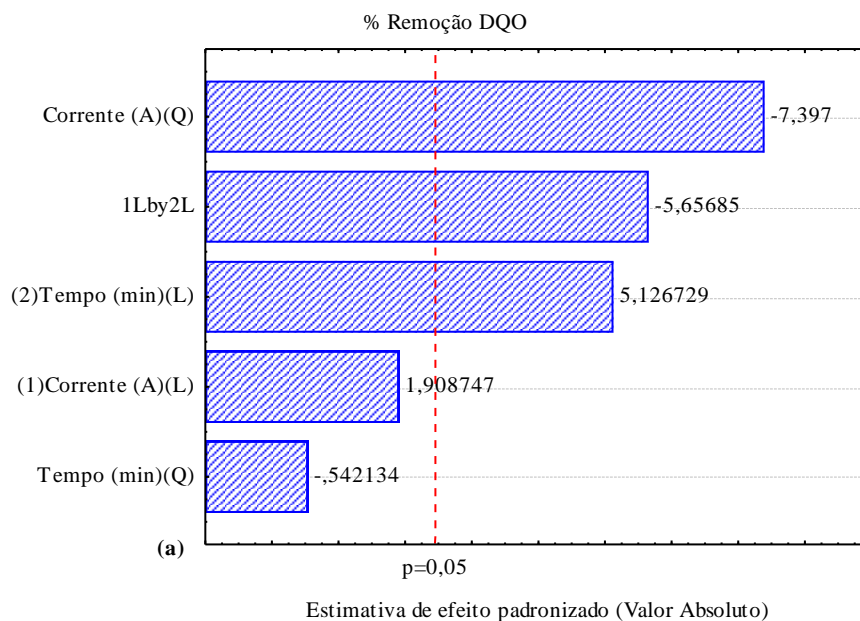
Ressalta-se que a adição de cloreto de sódio (NaCl) foi indispensável, uma vez que a condutividade inicial não foi o suficiente para atingir a corrente máxima proposta no DCCR. Para a corrente de 4,6 A, necessitou-se de 3,00 g de NaCl, para 4,0 A, foi necessário adicionar 2,50 g e para atingir a corrente de 2,5 A, foi realizada a inserção de 1,50 g de NaCl.

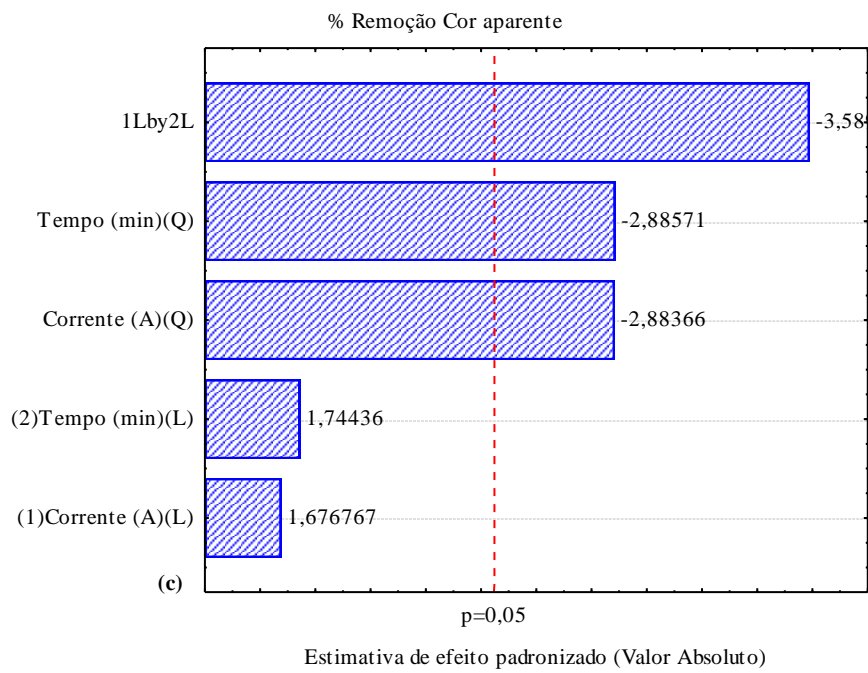
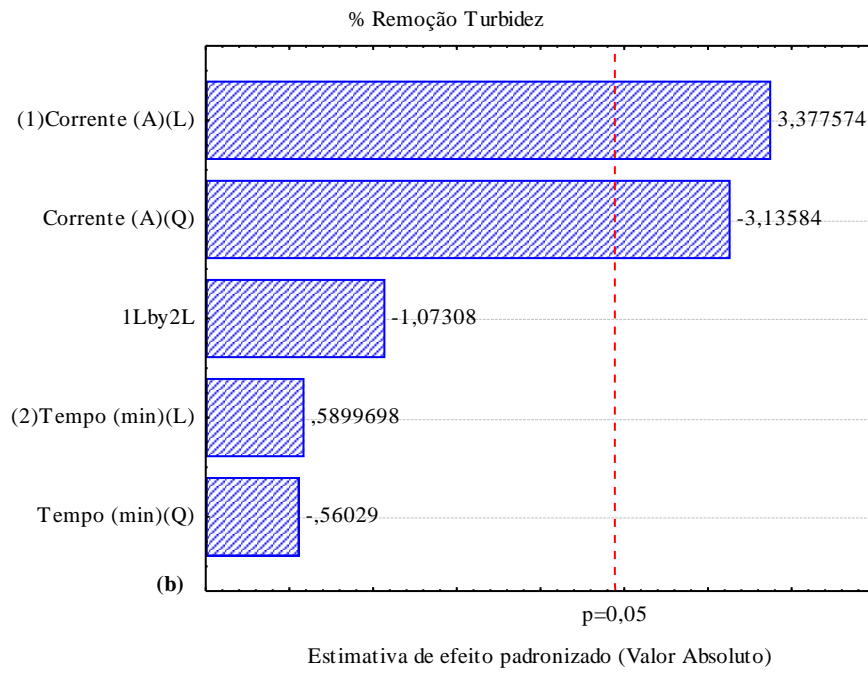
4.2.2 Otimização do processo de EF

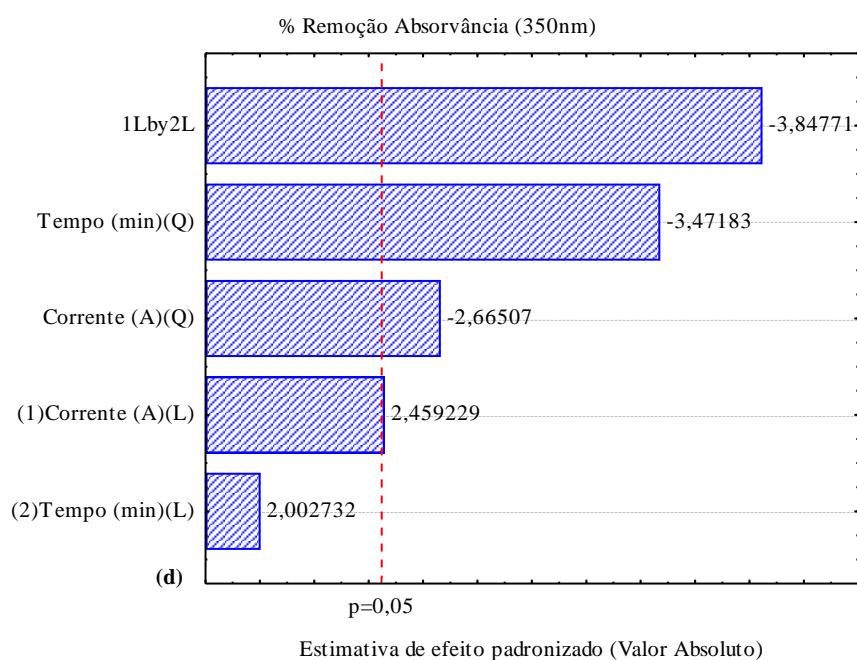
Com o intuito de validar o ajuste proposto pelos resultados obtidos, realizou-se a análise de variância (ANOVA) a partir do modelo previsto para a remoção da DQO, turbidez, cor aparente e absorvância (350 nm). Primeiramente, foram analisados os efeitos absolutos das variáveis, corrente e tempo de tratamento através do gráfico de Pareto, ilustrado na Figura 5.

Com o auxílio do gráfico de Pareto faz-se possível identificar quais os parâmetros e interações tem influências significativas sobre as variáveis respostas, com 95 % de confiança ($p < 0,05$), representado pela linha traçada vermelha. Os resultados dos efeitos das variáveis lineares (L), quadráticas (Q) e de interação linear entre as variáveis independentes são fornecidas através da extensão horizontal das barras. A grandeza do efeito é indicada ao lado das barras, onde o sinal positivo aponta um aumento na remoção de DQO, turbidez, cor aparente e absorvância (350 nm), já os valores negativos designam um efeito de redução na remoção.

Figura 5 – Gráfico de Pareto para as variáveis (a) DQO, (b) Turbidez, (c) Cor aparente e (d) Absorvância (350 nm)







Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a Figura 5, nota-se que a corrente em termos quadráticos se mostrou estatisticamente significativa no intervalo de 95 % de confiança para a remoção de DQO, turbidez, cor aparente e absorvância (350 nm). A variável tempo, foi estatisticamente significativa para a remoção de cor e absorvância, em termos quadráticos e para a DQO em termos lineares.

Os resultados obtidos na análise de variância (ANOVA), podem ser observados na Tabela 6.

Tabela 6 – Teste da análise de variância do modelo previsto para a redução de DQO, turbidez, cor aparente e absorvância (350 nm) pelo tratamento de EF ao nível de significância de 95 % ($p < 0,05$)

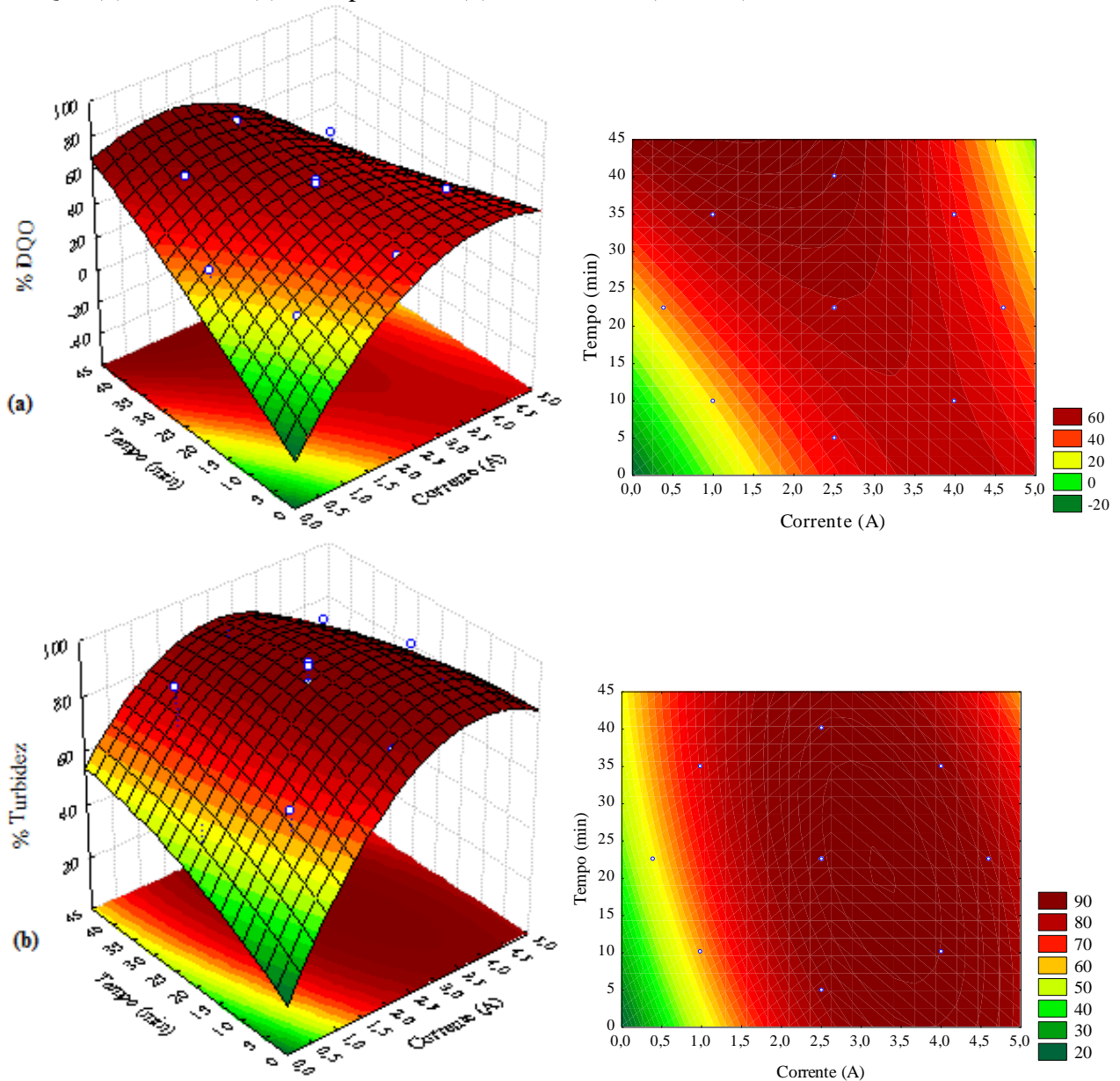
Parâmetro	Modelo Quadrático	Soma dos Quadrados	Grau de liberdade	Média dos quadrados	F Cal./Tab.	p-Valor
DQO	Regressão	2084,965	5	416,993	24,772/4,387	0,0006174
	Resíduos	101,202	6	16,867		
	Total	2186,167	11			
Turbidez	Regressão	2277,035	5	455,407	5,769/4,387	0,0272394
	Resíduos	473,613	6	78,936		
	Total	2750,648	11			
Cor aparente	Regressão	20924,948	5	4184,990	7,743/4,387	0,0135266
	Resíduos	3242,884	6	540,481		
	Total	24167,832	11			
Absorvância (350nm)	Regressão	17557,773	5	3511,555	9,418/4,387	0,0082950
	Resíduos	2237,044	6	372,841		
	Total	19794,817	11			

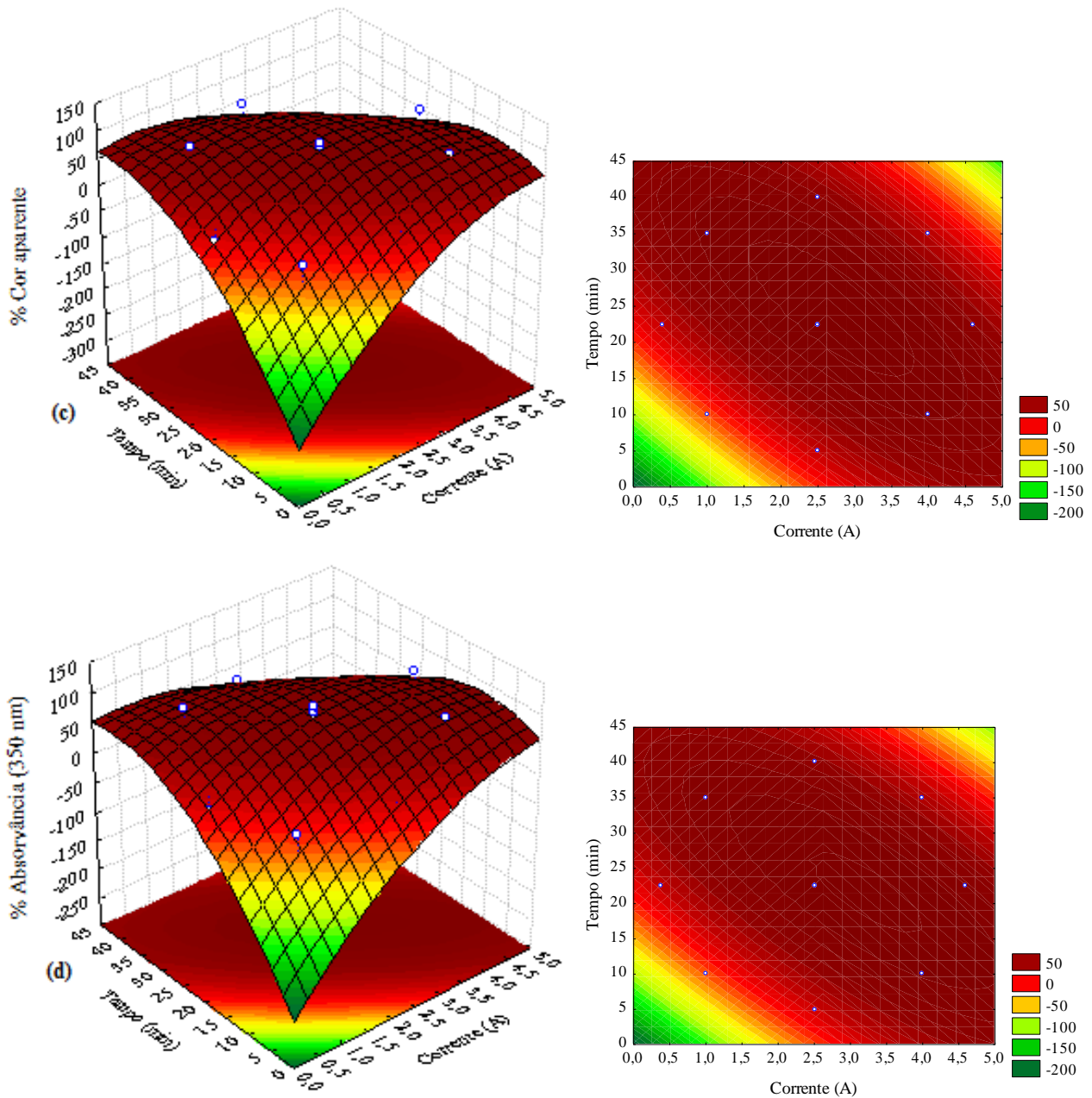
Fonte: Elaborado pelo autor.

Observa-se na Tabela 6 que o p-Valor das variáveis, corrente e tempo de tratamento mostraram-se estatisticamente confiáveis a 95 % ($p < 0,05$), para as variáveis respostas estudadas. Além do mais, $F_{cal} > F_{tab}$ demonstrando assim, que existem evidências de diferenças significativas entre pelo menos um par de médias de tratamentos, ao nível de 95 % de significância. Logo, o modelo é válido e a superfície de resposta pode ser gerada.

Os resultados podem ser observados nos gráficos de superfície de resposta e perfil de contorno, os quais são exibidos na Figura 6. Cada gráfico expressa o comportamento da porcentagem de remoção de cada variável resposta, em função das variáveis independentes, corrente (X_1) e tempo de tratamento (X_2).

Figura 6 – Superfície de resposta e perfil de contorno em relação à redução das variáveis (a) DQO, (b) Turbidez, (c) Cor aparente e (d) Absorvância (350 nm)





Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.3 Desejabilidade Global

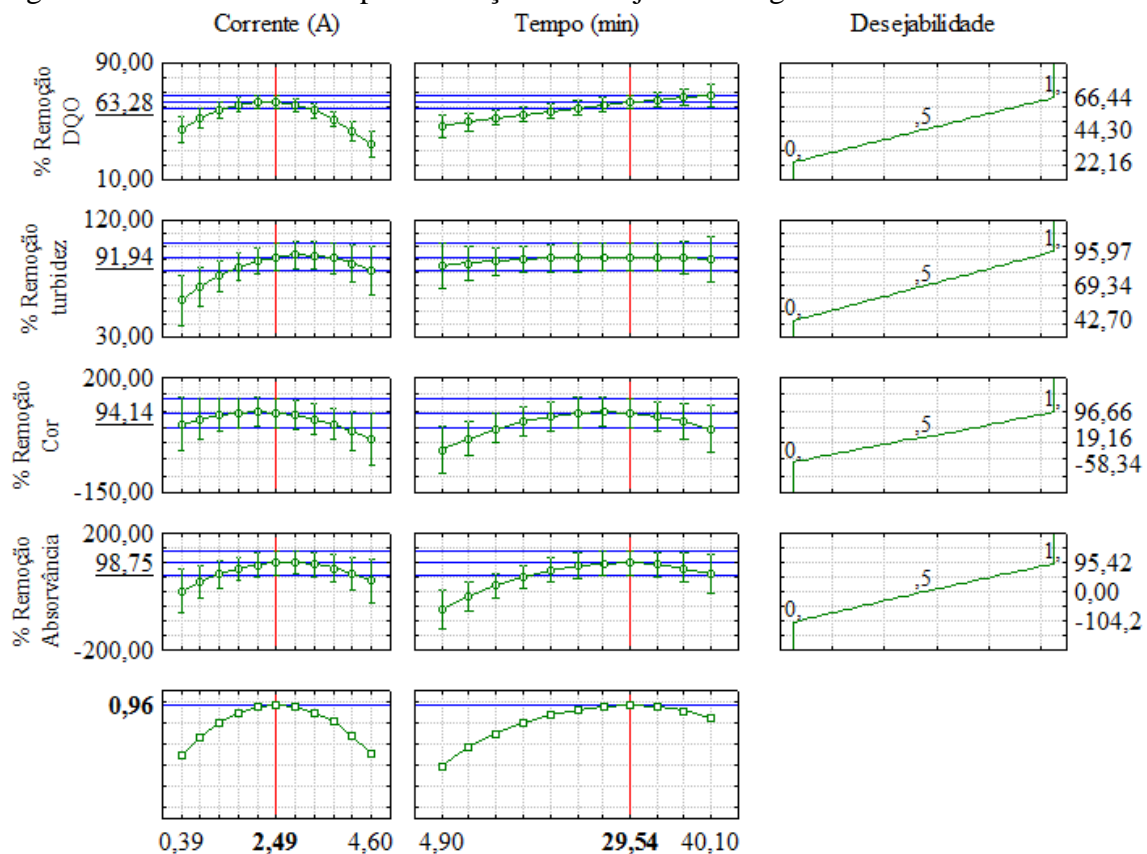
Conforme o exposto na Tabela 6 (ANOVA), o modelo proposto é válido para as quatro variáveis respostas estudadas, desta forma utilizou-se o método *Desirability*, função do software *Statistica® 11*, afim de obter os valores operacionais ótimos das variáveis independentes que satisfaçam conjuntamente todos os critérios necessários às variáveis dependentes.

A Figura 7 confirma a faixa ótima de trabalho através da superposição das curvas de nível para as respostas estudadas nos ensaios de EF. O valor de desejabilidade global varia de 0 a 1,

quanto mais próximo estiver de 1, mais próxima será a resposta obtida daquela pretendida. A função global alcançada foi de 0,96, indicando assim uma excelente resposta. O traçado em vermelho nos gráficos da linha de desejabilidade indica os valores das variáveis independentes, apontando para uma corrente de 2,49 A e tempo de tratamento de 29,54 min. Nessas condições, de acordo com o gráfico de desejabilidade global, supõe-se que as quatro variáveis respostas, DQO, turbidez, cor aparente e absorvância (350 nm), apresentam porcentagens de remoção após tratamento por EF, iguais a 63,28 %, 91,94 %, 94,14 % e 98,75 %, respectivamente.

Ainda de acordo com a Figura 7, nota-se nos gráficos de desejabilidade global em função da corrente e tempo de tratamento que qualquer alteração nestes fatores ocasionará em uma queda considerável na desejabilidade. Consequentemente, ambos os fatores devem ser mantidos sob controle.

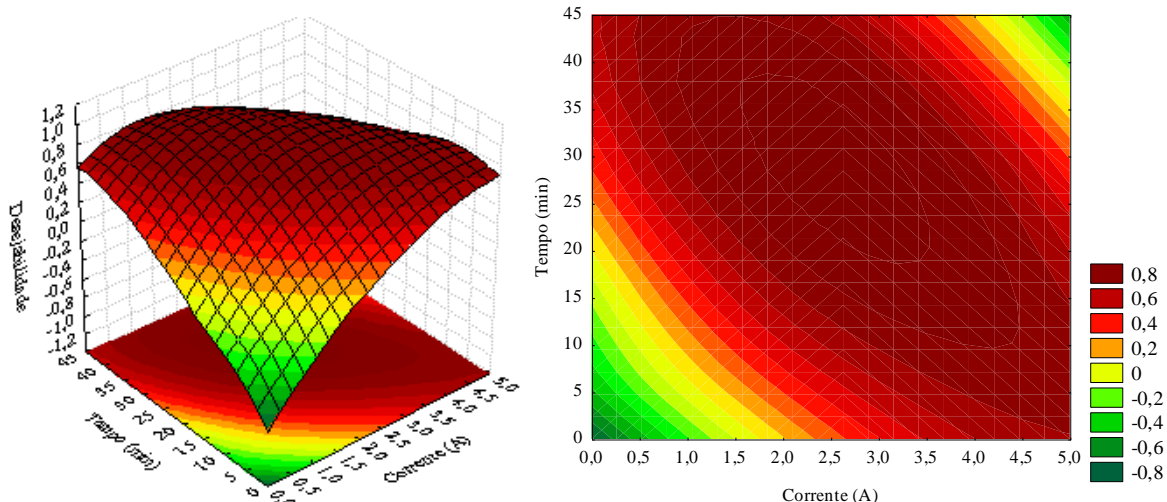
Figura 7 – Gráficos obtidos para a função de desejabilidade global



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 8 é possível observar a superfície de reposta, bem como o perfil de contorno da desejabilidade global em função da corrente e tempo de tratamento aplicado, corroborando com as informações observadas na Figura 7.

Figura 8 – Superfície de resposta e perfil de contorno da desejabilidade global em função da corrente e tempo de tratamento



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.4 Validação do modelo proposto

Por meio dos modelos gerados na análise estatística e dos resultados da função desejabilidade (Figura 7) realizou-se testes de validação. A Tabela 7 expõe os resultados obtidos na validação do modelo proposto, onde é possível perceber a tendência de remoção prevista pelo mesmo. Nota-se que a remoção obtida experimentalmente para as quatro variáveis respostas segue a tendência prevista pelo modelo.

Tabela 7 – Resultados alcançados a partir das condições de tempo e corrente otimizadas

Parâmetros	Efluente Bruto	Efluente tratado	% Remoção estimada	% Remoção real
DQO (mg L ⁻¹ O ₂)	1042,19 ± 43,70	402,80 ± 29,50	63,28	61,35 ± 2,83
Turbidez (UNT)	818,67 ± 0,94	62,81 ± 0,23	91,94	92,31 ± 0,01
Cor Aparente (uC)	8989,25 ± 7,83	618,35 ± 6,35	94,14	93,12 ± 0,07
Absorvância a 350 nm (ua)	0,568 ± 0,002	0,061 ± 0,002	98,75	92,69 ± 1,85

Fonte: Elaborado pelo autor.

A remoção de DQO para o ensaio de validação foi de 61,35 ± 2,83 %, valor muito próximo do estimado (63,28 %). Para Boroski et al. (2009), a remoção para este parâmetro foi de 91 %, porém com tempo de tratamento de 90 min e corrente de 5,0 A, o que acarreta em um maior custo operacional em decorrência do custo de energia e desgaste dos eletrodos.

Para a turbidez obteve-se um valor de 62,81 ± 0,23 UNT, representando 92,31 ± 0,01 % de remoção, valor considerado aceitável pelas resoluções do CONAMA N° 357/2005 e

Nº 430/2011. Desempenho semelhante ao obtido no tratamento de efluentes provenientes de suínos utilizando o ferro como eletrodo de sacrifício na EF (MORES et al., 2016).

A cor aparente por sua vez, teve desempenho de $93,12 \pm 0,07$ % de remoção, acarretando em uma diminuição de sólidos dissolvidos, principalmente material em estado coloidal orgânico e inorgânico associados a cor aparente (CETESB, 2009).

A absorvância no comprimento de onda respectivo a 350 nm, tem-se uma porcentagem de remoção de $92,69 \pm 1,85$ % evidenciando-se que ocorreu a quebra dos compostos aromáticos conjugados (BOROSKI et al., 2009).

Os parâmetros físico-químicos analisados na caracterização inicial do efluente foram novamente avaliados após a EF, utilizando as condições de tempo e corrente otimizadas. Os resultados são mostrados na Tabela 8.

Tabela 8 – Caracterização do efluente após o tratamento por EF

Parâmetros	Efluente bruto	Efluente tratado
Temperatura (°C)	$25,90 \pm 0,08$	$23,20 \pm 0,40$
pH	$5,38 \pm 0,02$	$7,39 \pm 0,01$
Condutividade ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	$2917,67 \pm 9,67$	$8373,01 \pm 4,99$
OD (mg L^{-1})	$1,78 \pm 0,22$	$5,44 \pm 0,24$
Sólidos sedimentáveis ($\text{mL L}^{-1} \text{ h}^{-1}$)	$0,09 \pm 0,01$	$0,92 \pm 0,03$
SST (mg L^{-1})	$21,67 \pm 2,36$	$70,50 \pm 7,5$
SSF (mg L^{-1})	$13,33 \pm 2,36$	$47,00 \pm 6,00$
SSV (mg L^{-1})	$8,33 \pm 2,36$	$23,50 \pm 1,50$
Óleos e graxas (mg L^{-1})	$57,00 \pm 3,00$	$8,70 \pm 2,10$
Absorvância a 254 nm (ua)	$0,238 \pm 0,00$	$0,317 \pm 0,00$
Ferro dissolvido (mg L^{-1})	$1,96 \pm 0,00$	$45,64 \pm 1,79$

Fonte: Elaborado pelo autor.

A temperatura do efluente após o tratamento por EF ficou em $23,20 \pm 0,40$ °C, mantendo-se próxima da temperatura do efluente bruto. Já o pH ficou em $7,39 \pm 0,01$, valor acima do obtido no efluente bruto. Esta elevação é decorrente da redução do hidrogênio no cátodo, pois em efluentes ácidos a EF tende a neutralizar o pH (CERQUEIRA, 2006; HAKIZIMANA et al., 2017).

Para a condutividade elétrica obteve-se uma média de $8373,01 \pm 4,99$ $\mu\text{S cm}^{-1}$. O aumento da condutividade elétrica se deve a adição de cloreto de sódio (NaCl). A incorporação de 1,50 g de sal fez-se necessária, uma vez que a condutividade inicial não foi o suficiente para atingir a corrente de 2,49 A em condições otimizadas.

Ocorreu um acréscimo nos parâmetros relacionados aos sólidos, o qual pode ser atribuído à presença de sais dissolvidos, que dificilmente são removidos (CRESPILHO; SANTANA;

REZENDE, 2004; MENESES et al., 2012). Mesmo com o aumento na concentração de sólidos, estes encontram-se em conformidade com a legislação vigente.

O OD aumentou para $5,44 \pm 0,24 \text{ mg L}^{-1}$. Alguns autores observaram uma diminuição no OD posteriormente a EF, a qual pode ser atribuída à oxidação do Fe^{2+} ao Fe^{3+} , uma vez que a oxidação depende da disponibilidade de oxigênio na água (LAKSHMANAM; CLIFFORD; SAMANTA, 2009; NARIYAN; AGHABABAEI; SILLANPÄ Ä, 2017).

A concentração de óleos e graxas diminuiu para $8,70 \pm 2,10 \text{ mg L}^{-1}$, representando aproximadamente 85 % de remoção. O tratamento de EF é particularmente eficaz na remoção do teor de óleos e graxas, uma vez que ocorre a desestabilização de emulsões de óleo em água (MENESES et al., 2012, AN et al., 2017).

Porém, ocorreu um aumento na absorvância no comprimento de onda respectivo a 254 nm, a qual caracteriza-se pela presença de matéria orgânica. Este aumento pode ter sido ocasionado devido ao Fe, pois dos compostos inorgânicos que podem afetar a transmissão, o Fe é considerado um dos principais interferentes no que diz respeito à absorção de Ultravioleta (UV) (METCALF; EDDY, 2003).

Após a EF a concentração de ferro residual aumentou para $45,64 \pm 1,79 \text{ mg L}^{-1}$, valor considerado acima dos padrões estipulados pela Resolução do CONAMA Nº 430 de 2011.

4.3 ANÁLISE DO FERRO RESIDUAL

Estimou-se a quantidade de ferro residual do tratamento de EF, proveniente dos eletrodos de sacrifício, em cada ensaio realizado. Os valores obtidos podem ser visualizados na Tabela 9.

Tabela 9 – Ferro dissolvido após o tratamento

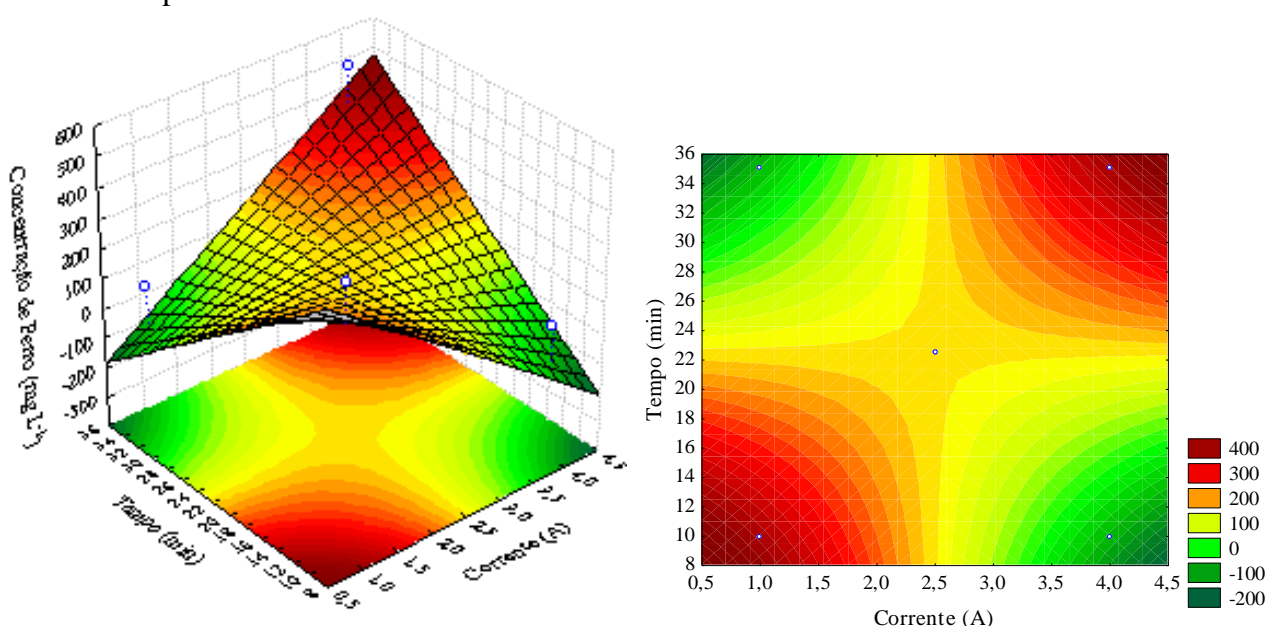
Ensaio	Variáveis Codificadas		Variáveis Independentes		Variável Dependente
	X ₁	X ₂	i(A)	t(min)	Fe dissolvido (mg L ⁻¹)
1	1	1	4	35	496,89 ± 0,00
2	1	-1	4	10	39,40 ± 0,00
3	-1	1	1	35	39,50 ± 0,00
4	-1	-1	1	10	493,93 ± 0,00
5	0	0	2,5	22,5	29,16 ± 0,00
6	0	0	2,5	22,5	24,36 ± 0,00
7	0	0	2,5	22,5	31,15 ± 0,00
8	0	0	2,5	22,5	11,28 ± 0,00
9	1,41	0	4,6	22,5	35,00 ± 0,00
10	-1,41	0	0,39	22,5	216,93 ± 0,00
11	0	1,41	2,5	40,1	70,76 ± 0,00
12	0	-1,41	2,5	4,9	431,76 ± 0,00

Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a Tabela 9, é possível observar que o valor de ferro residual variou de 11,28 mg L⁻¹ a 496,89 mg L⁻¹. Valores acima do permitido pela resolução do CONAMA Nº 430/2011, exceto para o ensaio 8. A elevada concentração pode ser atribuída principalmente a alta corrente que foi empregada.

Os resultados em relação à concentração de ferro residual após a EF podem ser visualizados no gráfico de superfície de resposta bem como no perfil de contorno, os quais são mostrados na Figura 10.

Figura 9 – Superfície de resposta e perfil de contorno em relação a concentração de Ferro residual após EF



Fonte: Elaborado pelo autor.

De acordo com a Figura 10, nota-se que a dissolução de ferro encontra-se em uma faixa intermediária. A menor dissolução de ferro ocorre em duas condições, a primeira com alta corrente (2,5 a 4,5 A), porém com menor tempo de tratamento (8,0 a 22,0 min). Para a segunda condição tem-se uma baixa corrente (0,5 a 2,5 A), com elevado tempo de tratamento (22,0 a 36,0 min).

Sabe-se que na EF haverá aumento na concentração de ferro devido a oxidação do eletrodo, apesar de não ser um elemento tóxico, sua presença em elevadas concentrações pode ocasionar danos a vida aquática, ao abastecimento público bem como para a saúde do ser humano (CETESB, 2009; KUMAR et al., 2017). Desta forma, esta análise servirá de base para estudos futuros de processos de pós-tratamento, afim de reduzir a sua concentração.

5 CONCLUSÃO

Com base no estudo desenvolvido, foi possível caracterizar o efluente proveniente da indústria cosmética por meio da análise de parâmetros físico-químicos, indicando que o efluente possui valores de parâmetros que se encontram em desconformidade com os padrões para lançamento dos efluentes sugeridos por resoluções do CONAMA N° 357/2005 e N° 430/2011 e CONSEMA N°128/2006, tais como turbidez, pH, OD, DQO e óleos e graxas.

O planejamento experimental DCCR utilizado, assim como a análise estatística, foram importantes para afirmar com 95 % de confiabilidade a significância das variáveis corrente e tempo de tratamento envolvidas no processo para obtenção das variáveis respostas, representadas pela porcentagem de remoção de DQO, turbidez, cor aparente e absorvância (350 nm).

Em razão de ter mais de uma variável resposta (remoção de DQO, turbidez, cor aparente e absorvância (350 nm)), e ter o interesse em constatar os valores ótimos das variáveis analisadas em um único valor, aplicou-se a função de desejabilidade global a qual forneceu uma corrente de 2,5 A com tempo de tratamento estimado em 29,54 min.

A partir da condição otimizada realizou-se a validação do tratamento de EF atingindo-se uma remoção de 61,35 % para DQO, 92,31 % para turbidez, 93,69 % de cor aparente e 92,69 % de absorvância (350 nm), os quais seguiram a tendência prevista pelo modelo de 63,28 % para DQO, 91,94 % para turbidez, 94,14 % para cor aparente e 98,75 % para a absorvância (350 nm), demonstrando-se uma técnica eficiente.

Estimou-se ainda a quantidade de ferro residual remanescente do tratamento de EF, resultante dos eletrodos de sacrifício, o qual foi encontrado em concentrações consideradas acima dos padrões fixados pela Resolução do CONAMA N° 430/2011. Em decorrência do elevado teor de ferro dissolvido sugere-se a elaboração de novos estudos com intuito de indicar um processo de pós-tratamento adequado para redução da concentração de ferro residual do efluente tratado, bem como análise do lodo remanescente.

REFERÊNCIAS

- ABIHPEC. Associação Brasileira de Higiene Pessoal, Perfumaria e Cosmética. **Anuário 2016**. São Paulo, 2016. Disponível em: <<https://abihpec.org.br/institucional/publicacoes/anuario-abihpec/>>. Acesso em: 28 de fev. 2017.
- ABIHPEC, **Brazilian Association of the Cosmetic Toiletry and Fragrance Industry**. São Paulo – SP – Brasil, 2014.
- ABIHPEC. Associação Brasileira de Higiene Pessoal, Perfumaria e Cosmética. **Guia Técnico Ambiental da Indústria de Higiene Pessoal, Perfumaria e Cosméticos – Por uma Produção Mais Limpa**. São Paulo, 2005.
- ABOUBARAKA, A. E.; ABOELFETO, E. F.; EBEID, E. M. Coagulation effectiveness of graphene oxide for the removal of turbidity from raw surface water. **Chemosphere**. v. 181, p. 738-746, 2017.
- ALVES, S. S. **Conservação e reuso de água em indústria de cosméticos: estudo de caso da Natura Cosméticos**. 2009. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, São Paulo, 2009.
- AN, C. et al. Emerging usage of electrocoagulation technology for oil removal from wastewater: A review. **Science of the Total Environment**. v. 579, p. 537–556, 2017.
- AOUDJ, S. et al. Electrocoagulation process applied to wastewater containing dyes from textile industry. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**. v. 49, p. 1176–1182, 2010.
- APHA. American Public Health Association. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21ª Ed. Washington – DC: APHA, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9800**: Critérios para lançamento de efluentes líquidos industriais no sistema coletor público de esgoto sanitário. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.
- BAUTISTA, P. et al. Catalytic wet peroxide oxidation of cosmetic wastewaters with Fe-bearing catalysts. **Catalysis Today**. v. 151, p. 148–152, 2010.
- BIASSI, B. F. **Tratamento de efluente de matadouro e frigorífico de suínos em reator batelada de eletrofloculação**. 2014. 42 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnólogo em Gestão Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso Superior em Tecnologia em Gestão Ambiental, Medianeira, 2014.
- BOROSKI, M. et al. Combined electrocoagulation and TiO₂ photoassisted treatment applied to wastewater effluents from pharmaceutical and cosmetic industries. **Journal of Hazardous Materials**, Maringá, v. 162, p. 448–454, 2009.
- BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Resolução RDC nº 79**, de 28 de agosto de 2000.

BRASIL. Constituição (1988). **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, 1988.

BRAUSCH, J. M.; RAND, G. M. A review of personal care products in the aquatic environment: Environmental concentrations and toxicity. **Chemosphere**, v.82, p. 1518–1532, 2011.

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

CETESB. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas e de amostragem**. São Paulo, 2009.

CHEN, G. Electrochemical technologies in wastewater Treatment. **Separation and Purification Technology**. v.38, p.11–41, out. 2004.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências**. Resolução nº 357 de 17 de março de 2005.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA**. Resolução nº 430 de 13 de maio de 2011.

CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Dispõe sobre a fixação de Padrões de Emissão de Efluentes Líquidos para fontes de emissão que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul**. Resolução nº 128 de novembro de 2006.

CRISPILHO, F. N.; SANTANA, C.G.; REZENDE, M.O.O. Tratamento de efluente da indústria de processamento de coco utilizando eletroflotação. **Química Nova**. v.27, n.3, p.387-392, 2004.

DEGHLES, A.; KURT, U. Treatment of tannery wastewater by a hybrid electrocoagulation/electrodialysis process. **Chemical Engineering and Processing: Process Intensification**. v. 104, p. 43–50, jun. 2016.

ELABBAS, S. et al. Treatment of highly concentrated tannery wastewater using electrocoagulation: Influence of the quality of aluminium used for the electrode. **Journal of Hazardous Materials**. v. 319, p. 69–77, 2016.

EL-GOHARY, F.; TAWFIK, A.; MAHMOUD, U. Comparative study between chemical coagulation/precipitation (C/P) versus coagulation/dissolved air flotation (C/DAF) for pre-treatment of personal care products (PCPs) wastewater. **Desalination**. v. 252, p. 106–112, 2010.

FAJARDO, A. S. et al. Phenolic wastewaters treatment by electrocoagulation process using Zn

anode. **Chemical Engineering Journal**. v. 275, p. 331–341, 2015.

HAKIZIMANA, J. N. et al. Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. **Desalination**. v. 404, p. 1–21, 2017.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. Parâmetros de Qualidade. In:_____. **Tratamento de Esgotos Domésticos**. 6. ed. Rio de Janeiro: ABES, 2011. cap. 2, p. 19-35.

KHANDEGAR, V.; SAROHA, A.K. Eletrocoagulation for the tratment of textile industry effluent – A review. **Journal of Environmental Management**, v.128, p.949-963, 2013.

KOBYA, M. et al. Treatment of potable water containing low concentration of arsenic with electrocoagulation: Different connection modes and Fe–Al electrodes. **Separation and Purification Technology**. v. 77, p. 283–293, 2011.

KUMAR, V. et al. Studies on high iron content in water resources of Moradabad district (UP), India. **Water Science**. v. 31, p.44-51, 2017.

LAKSHMANAM, D.; CLIFFORD, D. A.; SAMANTA, G. Ferrous and ferric ion generation during iron electrocoagulation. **Environmental Science & Technology**. v. 43, p. 3853-3859, 2009.

LIBÂNIO, M. Características das Águas Naturais. In:_____. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3. ed. Campinas, SP: Átomo, 2010. cap. 2, p. 25-78.

MALAKOOTIAN, M.; MANSOORIAN, H. J.; MOOSAZADEH, M. Performance evaluation of electrocoagulation process using iron-rod electrodes for removing hardness from drinking water. **Desalination**. v. 255, p. 67–71, 2010.

MELCHORS, M. S. et al. Treatment of wastewater from the dairy industry using electroflocculation and solid whey recovery. **Journal of Environmental Management**. v. 182, p. 574-580, 2016.

MELO, E. D. **Avaliação e identificação da toxicidade de efluentes líquidos de uma indústria de cosméticos**. 2012. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal de Viçosa. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Viçosa, 2012.

MELO, E. D. et al. Toxicity identification evaluation of cosmetics industry wastewater. **Journal of Hazardous Materials**. v. 244-245, p. 329-334, 2013.

MENESES, J. M. de et al. Tratamento do efluente do biodiesel utilizando a eletrocoagulação/flotação: investigação dos parâmetros operacionais. **Química Nova**. v. 35, p. 235-240, 2012.

METCALF, L.; EDDY, H. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. 4. ed. Revisado por George Tchobanoglous, Franklin L. Burton, H. David Stensel. McGrawHill, New York, 2003.

MOLLAH, M.Y.A. et al. Electrocoagulation (EC): science and applications. **Journal of Hazardous Materials**. v. 84, p. 29-41, 2001.

MORES, R. et al. Remove of phosphorous and turbidity of swine wastewater using electrocoagulation under continuous flow. **Separation and Purification Technology**. v. 171, p. 112-117, 2016.

NARIYAN, E.; AGHABABAEI, A.; SILLANPÄÄ, M. Removal of pharmaceutical from water with an electrocoagulation process; effect of various parameters and studies of isotherm and kinetic. **Separation and Purification Technology**. v. 128, p. 266-281, 2017.

RODRIGUES, M. I. LEMMA, A.R. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**. 2. ed. Campinas, São Paulo: Casa do Espírito Amigo Fraternidade Fé e Amor, 2009.

SANT'ANNA JUNIOR, G. L. Poluição Hídrica: Parâmetros e indicadores de interesse. In:_____. **Tratamento biológico de efluentes: Fundamentos e aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2013. cap. 3, p. 37-65.

SASSON, M. B.; CALMANO, W.; ADIN, A. Iron-oxidation processes in an electroflocculation (electrocoagulation) cell. **Journal of Hazardous Materials**. v. 171, p. 704–709, 2009.

SKOOG, A. D.; WEST, D. M.; HOLLER, F. J.; CROUCH, S. R. Introdução aos Métodos Espectroquímicos. In:_____. **Fundamentos de Química Analítica**. 8. ed. São Paulo: Thomson, 2006. cap. 24, p. 670-703.

TONES, A. R. M. **Estudo da aplicação da técnica de eletrofloculação na remoção da cor em misturas de corantes têxteis**. 2015. 70 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, Medianeira, 2015.

VON SPERLING, M. **Introdução a Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: Editora da UFMG, 2005.

YUKSEL, E.; GURBULAK, E.; EYVAZ, M. Decolorization of a reactive dye solution and treatment of a textile wastewater by electrocoagulation and chemical coagulation: technoeconomic comparison. **Environmental Progress & Sustainable Energy**. v.131, n.4, p.524-535, 2011.