

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

**RENATA WELTER MARTINS**

**ELETROCOAGULAÇÃO APLICADA AO TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS  
COSMÉTICAS**

**CERRO LARGO**

**2023**

**RENATA WELTER MARTINS**

**ELETROCOAGULAÇÃO APLICADA AO TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS  
COSMÉTICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do título de bacharela em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Aline Raquel Müller Tones

Coorientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Alcione Aparecida de Almeida Alves

**CERRO LARGO**

**2023**

### **Bibliotecas da Universidade Federal da Fronteira Sul - UFFS**

Martins, Renata Welter

ELETROCOAGULAÇÃO APLICADA AO TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS  
COSMÉTICAS / Renata Welter Martins. -- 2023.

88 f.

Orientadora: Dr<sup>a</sup> Aline Raquel Müller Tones      Co-orientadora: Dr<sup>a</sup>  
Alcione Aparecida de Almeida

Alves

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) -  
Universidade Federal da Fronteira Sul, Curso de  
Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária, Cerro Largo, RS,  
2023.

1. Tratamento de Efluente. 2. Eletrocuagulação. 3.  
Efluente Cosmético. I. Tones, Aline Raquel Müller, orient. II.  
Alves, Alcione Aparecida de Almeida, co-orient. III. Universidade  
Federal da Fronteira Sul. IV. Título.

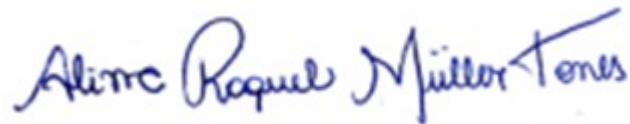
**RENATA WELTER MARTINS**

**ELETROCOAGULAÇÃO APLICADA AO TRATAMENTO CONTÍNUO DE ÁGUAS  
RESIDUAIS COSMÉTICAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para obtenção do título de bacharela em Engenharia Ambiental e Sanitária.

Este trabalho foi defendido e aprovado pela banca em 10/02/2023.

**BANCA EXAMINADORA**



---

Dr.<sup>a</sup> Aline Raquel Müller Tones – UFFS  
Orientadora



---

Dr.<sup>a</sup> Alcione Aparecida de Almeida Alves  
Coorientadora



---

Dr.<sup>a</sup> Bruna Souza dos Santos  
Avaliadora

Este trabalho é dedicado a todos aqueles que estiveram ao meu lado nos momentos de fraqueza. Vocês me ensinaram que a solidão só faz companhia para quem não se faz companhia. Obrigada por tudo.

## AGRADECIMENTOS

O desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso contou com a colaboração direta e indireta de diversas pessoas, as quais eu agradeço por todo apoio.

Primeiramente agradeço aos meus familiares, em especial minha mãe Jaqueline. Sem o seu apoio ao longo de toda graduação este trabalho não seria realizado, foram conversas, abraços, broncas e conselhos que me levaram até aqui para a realização deste sonho. A conquista não é apenas minha.

Também quero agradecer aos meus amigos que sempre me apoiaram em todos os momentos, até mesmo nos mais difíceis. Agradeço especialmente ao meu amigo e colega João Vitor Lodi, o qual me acompanhou nesse momento tão importante, a companhia na universidade foi fundamental para descontrair nos momentos mais estressantes

Ainda, agradeço aos meus colegas de laboratório por todo o suporte dado durante a realização dos experimentos deste trabalho, foram momentos de aprendizado que levarei sempre comigo.

Um grande agradecimento à Universidade Federal da Fronteira Sul por proporcionar um ensino gratuito e de qualidade. A todos os professores que contribuíram para minha formação acadêmica ao longo da graduação, ainda agradeço a todos os funcionários da Universidade Federal da Fronteira Sul- *campus* Cerro Largo pelo trabalho realizado em prol da educação.

Agradeço especialmente a minha orientadora Aline Tones e a minha coorientadora Alcione Alves, mulheres que me inspiram profissionalmente e pessoalmente. Obrigada por me orientarem com maestria, além de excelentes profissionais se mostraram grandes seres humanos, vocês são mulheres lindas por fora e especialmente por dentro.

Por fim, agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq por todo suporte financeiro ao desenvolvimento desta pesquisa. A pesquisa científica liberta, educa, evolui e nunca pode parar.

Inteligência é a habilidade das espécies para viver em harmonia com o meio ambiente (WATSON, 2006, não paginado).

## RESUMO

O aumento no consumo de produtos cosméticos no Brasil e no Mundo desencadeiam uma série de problemas ambientais, os quais trazem danos aos ecossistemas e a saúde humana. Em geral, a indústria de cosméticos utiliza de grandes volumes de água para fabricação de produtos e limpeza de maquinário, estes processos são os principais responsáveis pela geração de efluentes cosméticos. O efluente cosmético é considerado tóxico e de baixa biodegradabilidade, devido a presença de compostos como: parabenos, surfactantes, triclosan, óleos e graxas e outros, necessitando de um tratamento adequado antes do seu lançamento em corpo hídrico receptor, minimizando possíveis danos ambientais. Nesse sentido, a pesquisa buscou realizar a caracterização do efluente da indústria cosmética e avaliar o desempenho da Eletrocoagulação (EC) para tratamento deste efluente, através de um reator em batelada com uso de eletrodos de alumínio. A eficiência do tratamento foi avaliada por meio de análises estatísticas das variáveis respostas: cor, turbidez e demanda química de oxigênio (DQO) sobre diferentes condições de operação das variáveis independentes (corrente elétrica e tempo de tratamento). O planejamento experimental se deu por meio de um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), composto por 12 ensaios, onde buscou-se otimizar as variáveis independentes e maximizar a eficiência da EC. Através das análises estatísticas constatou-se que apenas as variáveis respostas cor e turbidez apresentaram significância para o modelo proposto no tratamento do efluente analisado, dessa forma a DQO foi descartada das análises. O modelo apresentou 95% de confiabilidade das variáveis corrente elétrica e tempo de tratamento para obtenção das variáveis respostas. A desejabilidade global do modelo apresentou condições ótimas de tratamento para uma intensidade de corrente de 1,0 A e 10 minutos de tratamento. Dessa forma, para validar o modelo proposto a partir da condição ótima de tratamento realizou-se o tratamento do efluente por EC nas condições descritas na desejabilidade global, atingindo uma remoção de 87,50% para cor e 93,37% para turbidez, os quais seguiram conforme os valores previstos, confirmando a eficiência da EC para tratamento da indústria cosmética.

Palavras-chave: tratamento de efluentes; eletrodos de alumínio; eletrocoagulação; indústria cosmética.



## ABSTRACT

The increase in the consumption of cosmetic products in Brazil and in the world triggers a series of environmental problems, which bring damage to ecosystems and human health. In general, the cosmetics industry uses large volumes of water to manufacture products and clean machinery, these processes are primarily responsible for the generation of cosmetic effluents. The cosmetic effluent is considered toxic and of low biodegradability, due to the presence of compounds such as: parabens, surfactants, triclosan, oils and greases and others, requiring adequate treatment before being released into the receiving water body, minimizing possible environmental damage. In this sense, the research sought to characterize the effluent from the cosmetic industry and evaluate the performance of Electrocoagulation (EC) for treating this effluent, through a batch reactor using aluminum electrodes. Treatment efficiency was evaluated through statistical analysis of the response variables: color, turbidity and chemical oxygen demand (COD) under different operating conditions of the independent variables (electrical current and treatment time). The experimental planning took place through a Rotational Central Composite Design (DCCR), composed of 12 trials, where we sought to optimize the independent variables and maximize the efficiency of the CE. Through statistical analysis, it was found that only the color and turbidity response variables were significant for the proposed model in the treatment of the analyzed effluent, thus COD was discarded from the analyses. The model showed 95% reliability for the variables electric current and treatment time to obtain the response variables. The overall desirability of the model showed optimal treatment conditions for a current intensity of 1.0 A and 10 minutes of treatment. Thus, in order to validate the proposed model based on the optimal treatment condition, the effluent was treated by EC under the conditions described in the global desirability, reaching a removal of 87.50% for color and 93.37% for turbidity, the which followed the predicted values, confirming the efficiency of EC for the treatment of the cosmetic industry.

Key words: wastewater treatment; aluminum electrodes; electrocoagulation; cosmetic industry.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1– Principais arranjos de eletrodos .....	41
Figura 2 – Representação esquemática do reator de eletrocoagulação utilizado .....	52
Figura 3 – Volume de sólidos decantado no tratamento preliminar .....	59
Figura 4 – Gráficos para a função de desejabilidade global .....	72

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1– Correlação entre os valores observados e previstos para a variável resposta turbidez.....	65
Gráfico 2 – Correlação entre os valores observados e previstos para a variável resposta cor.....	66
Gráfico 3 – Efeito das variáveis independentes sobre a remoção de turbidez a 95% de confiança (p <0,05) .....	67
Gráfico 4 – Efeito das variáveis independentes sobre a remoção de cor a 95% de confiança (p <0,05) .....	68
Gráfico 5 – Superfície de resposta em relação à remoção da turbidez .....	70
Gráfico 6 – Perfil de contorno em relação à remoção da turbidez .....	70
Gráfico 7 – Superfície de resposta em relação à remoção da cor .....	71
Gráfico 8 – Perfil de contorno em relação à remoção da cor .....	71

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classes de qualidade de água e usos .....	44
Quadro 2 – Matriz do delineamento experimental .....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Maiores consumidores da indústria de HPPC em 2021.....	22
Tabela 2 – Aplicações e eficiência de diferentes tecnologias no tratamento de efluentes cosméticos.....	30
Tabela 3 – Desempenho do processo de eletrocoagulação em diferentes tipos de efluentes em estudos atuais.....	34
Tabela 4 – Reações no ânodo e cátodo para eletrodos de Al e Fe.....	43
Tabela 5 – Valores máximos permitidos para lançamento de efluentes em corpo hídrico classe II e III.....	46
Tabela 6 – Padrões de lançamento em função da vazão no Estado do Rio Grande do Sul.....	47
Tabela 7 – VMP para lançamento de efluentes contendo metais em corpo hídrico classe II e III.....	48
Tabela 8 – Parâmetros físico-químicos analisados.....	51
Tabela 9 – Valores estudados para as variáveis independentes.....	54
Tabela 10 – Caracterização físico-química do efluente cosmético sem tratamento.....	57
Tabela 11 – Resultados da remoção média (%) dos parâmetros analisados após o tratamento por EC.....	62
Tabela 12 – Teste da análise de variância do modelo previsto para a remoção de turbidez e cor pelo tratamento de EC ao nível de significância de 95 % ( $p < 0,05$ ) .....	69
Tabela 13 – Resultados obtidos a partir das condições de tempo e corrente otimizadas.....	73

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

$\mu\text{g}$	Micrograma
$\mu\text{S}$	Microsiemens
A	Ampere
ABIHPEC	Associação Brasileira da Indústria de Higiene Pessoal, Perfumaria e Cosméticos
Al	Alumínio
ANOVA	Análise de Variância
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
BDD	Diamante Dopado com Boro
BP-S	Série Bipolar
cm	Centímetro
$\text{cm}^{-2}$	Centímetro Quadrado
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CONSEMA	Conselho Estadual do Meio Ambiente
Cr	Cromo
Cu	Cobre
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DCCR	Delineamento Composto Central Rotacional
DNA	Ácido desoxirribonucleico
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EC	Eletrocoagulação
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
Fe	Ferro
$\text{H}_2$	Hidrogênio
$\text{H}_2\text{O}$	Água
HPPC	Higiene Pessoal, Perfumaria e Cosméticos
L	Litro
LAS	Linear Alquilbenzeno Sulfonato
m	Metro
$\text{m}^2$	Metro Quadrado
Mg	Magnésio
mg	Miligrama

MP-P	Paralelo Monopolar
MP-S	Série Monopolar
Na	Sódio
NaCl	Cloreto de Sódio
ng	Nanograma
Ni	Níquel
O <sub>2</sub>	Oxigênio
OH <sup>-</sup>	Íon Hidroxila
Pb	Chumbo
PHBA	Ácido 4-parahidroxibenzóico
POAs	Processos Oxidativos Avançados
TOC	Carbono Orgânico Total
UV	Radiação Violeta
VMP	Valor Máximo Permitido
Zn	Zinco

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>18</b>
1.1	OBJETIVO GERAL .....	20
<b>1.1.1</b>	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>20</b>
<b>1.1.2</b>	<b>Justificativa .....</b>	<b>20</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>22</b>
2.1	INDÚSTRIA DE HIGIENE PESSOAL, PERFUMARIA E COSMÉTICOS (HPPC) .....	22
2.2	EFLUENTE DE INDÚSTRIA COSMÉTICA.....	24
<b>2.2.1</b>	<b>Toxicidade do Efluente de Industria Cosmética .....</b>	<b>26</b>
2.3	ALTERNATIVAS DE TRATAMENTO PARA O EFLUENTE DE INDUSTRIA COSMÉTICA.....	29
2.4	ELETROCUAGULAÇÃO PARA TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS .	33
<b>2.4.1</b>	<b><i>Princípios inerentes à tecnologia de eletrocoagulação .....</i></b>	<b>37</b>
2.4.1.1	<i>Densidade de corrente elétrica e tempo de eletrólise .....</i>	38
2.4.1.2	<i>Efeito do pH para o tratamento.....</i>	39
2.4.1.3	<i>Eletrodos de sacrifício.....</i>	40
2.4.1.4	<i>Arranjo e. configuração dos eletrodos de sacrifício .....</i>	41
2.4.1.5	<i>Reações químicas no ânodo e no cátodo.....</i>	43
2.5	LEGISLAÇÃO AMBIENTAL .....	44
<b>3.</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>51</b>
3.1	EFLUENTE DA INDÚSTRIA COSMÉTICA .....	51
<b>3.1.1</b>	<b>Caracterização físico-química do efluente .....</b>	<b>52</b>
3.2	SISTEMA PILOTO.....	53
<b>3.2.1</b>	<b>Procedimento Experimental.....</b>	<b>53</b>
3.3	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL .....	54
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>57</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE COSMÉTICO SEM TRATAMENTO ...	57
4.2	EFICIÊNCIA DA EC NA REMOÇÃO DE COR, TURBIDEZ E DQO.....	62
4.3	ANÁLISE ESTATÍSTICA DO DELINEAMENTO COMPOSTO CENTRAL ROTACIONAL.....	65
<b>4.3.1</b>	<b>Otimização da Desejabilidade Global.....</b>	<b>73</b>



<b>4.3.2</b>	<b>Validação do modelo proposto .....</b>	<b>74</b>
<b>5.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>75</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>76</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O ramo de beleza e cuidados pessoais é um dos maiores do mundo, segundo dados da Associação Brasileira da Indústria de Higiene Pessoal, Perfumaria e Cosméticos (ABIHPEC) em 2021 o mercado se tornou o 4º maior mercado consumidor do mundo, faturando cerca de US\$ 22,9 bilhões. Uma das características marcantes do setor é a constante necessidade de apresentar novidades no ramo de cosméticos, para isso o investimento anual nesse setor costuma ser grande, atingindo valores superiores a R\$ 24 milhões para o ano de 2022. Atualmente, as indústrias de cosméticos e produtos de higiene pessoal são impulsionadas pela inovação da comunidade científica, onde diante de um mercado competitivo o método mais barato para formulações é favorecido, e na maioria das vezes os ingredientes sintéticos (parabenos, silicones, formaldeídos, surfactantes, entre outros) são escolhidos (ZORIĆ *et al.*, 2022).

Uma das maiores preocupações geradas devido ao crescimento constante da indústria de higiene pessoal, perfumaria e cosmético (HPPC) é a geração de efluentes, a qual ocorre no processo de fabricação dos diversos produtos. O efluente da indústria cosmética costuma apresentar propriedades físico-químicas complexas que implicam significativamente no tratamento deste efluente. Estas dependem de diversos fatores, como: sazonalidade de produção, produto fabricado, matéria-prima, processos de limpeza, entre outros. Comumente o efluente da indústria cosmética apresenta valores relativamente altos de demanda química de oxigênio (DQO), sólidos em suspensão, surfactantes com alta abundância de nitrogênio orgânico, fósforo e microplásticos. Ainda, é possível que contenha ingredientes tóxicos como benzofenona-3, tonalide, parabenos, surfactantes, triclosan e outros, os quais representam risco aos ecossistemas aquáticos e saúde humana (AKBAY *et al.*, 2022).

Em virtude das características supracitadas, o tratamento do efluente de indústria cosmética costuma ser complexo (TONES, 2020). A maioria dos compostos empregados nos processos de fabricação são tóxicos para microrganismos, impossibilitando o tratamento através de sistemas biológicos podendo bioacumular em ecossistemas aquáticos. Estes compostos podem ainda causar efeitos adversos na saúde humana, como danos ao DNA, distúrbios endócrinos, risco de câncer, reações alérgicas, distúrbios reprodutivos e outros (LIMA; MELO; AGUIAR, 2022).

Estações de tratamento de efluentes (ETE) instaladas em indústrias cosméticas comumente utilizam sistemas de tratamento simplificados, como os sistemas biológicos, devido

ao baixo custo de instalação e operação, entretanto, estes sistemas não conseguem remover efetivamente alguns compostos empregados na fabricação de cosméticos e produtos de higiene pessoal, como microplásticos, filtros solares, produtos químicos, compostos perfluoroalquil e almíscares sintéticos. Além da descarga de efluentes com cargas de contaminantes em corpos hídricos, outra rota de chegada destes compostos ao meio ambiente é através do lodo de ETE ser utilizado como fertilizante de culturas, representando riscos biológicos dessas substâncias na saúde humana e nos ecossistemas (BILAL; MEHMOOD; IQBAL, 2020).

Na literatura, diversos tratamentos vem sendo testados no intuito de tratar de maneira eficiente os efluentes cosméticos, como: tratamento heterogêneo foto Fenton-Like (ANDRADE *et al.*, 2020), coagulação de  $Al_2(SO_4)_3$  seguida de flotação (ARAÚJO *et al.*, 2021), ultrafiltração seguida de lodo ativado e nanofiltração seguida de lodo ativado (MELO; MOUNTEER, 2019), adsorção reductiva seguida de reação Fenton (ANDRADE; DUFROYER; BRITO, 2018), mistura coagulante: policloreto de alumínio com poliacrilamida (HENTZ, 2018), Eletrocoagulação (TONES *et al.*, 2020).

Nesse contexto, destaca-se a Eletrocoagulação (EC), pois essa tecnologia continua a atrair pesquisadores devido a capacidade de remoção de uma ampla gama de contaminantes em uma variedade de efluentes, apresenta um custo operacional baixo, fácil operação, possibilidade de automação e possui capacidade de neutralizar o pH da solução. Além disso, a geração *in situ* do coagulante faz com que a EC seja uma tecnologia relativamente limpa, visto que não demanda da adição de químicos e restringe a possibilidade de contaminação secundária (NIDHEESH *et al.*, 2022).

Durante o processo de tratamento do efluente via EC as moléculas de contaminantes são desestabilizadas pela passagem da eletricidade. Devido a interferência de fortes campos elétricos no meio, os contaminantes são submetidos a reações de oxi-redução que propiciam a formação de moléculas menos reativas, insolúveis e de maior estabilidade, estas são agregadas em flocos coagulados e podem ser removidos por sedimentação, flotação ou filtração (DAS; SHARMA; PURKAIT, 2022).

Diante deste cenário, o objetivo deste trabalho foi investigar o tratamento de efluente de uma indústria cosmética utilizando a EC. Por se tratar de um efluente complexo perante suas características físico-químicas, este tipo de tratamento se faz relevante devido a versatilidade e eficiência na remoção de diversos contaminantes que a tecnologia apresenta. Todavia, a literatura ainda relata pouca aplicação para o tratamento de efluente cosmético (TONES *et al.*, 2020), visto que a maioria dos estudos combinam duas ou mais tecnologias, como: membranas (AKARSU *et al.*, 2022), Fenton (ANDRADE; DUFROYER; BRITO, 2018), EC combinada

com processos oxidativos avançados (CARMO, 2018), EC combinada com lodo ativado (SCHNEIDER, 2022).

## 1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho da tecnologia de EC para o tratamento de efluentes da indústria cosmética utilizando um reator em batelada com eletrodos de alumínio.

### 1.1.1 Objetivos Específicos

Realizar a caracterização do efluente de indústria cosmética através de análise de parâmetros físicos e químicos, como: temperatura, cor, pH, turbidez, condutividade elétrica, ferro total, DQO, sólidos totais e sedimentáveis.

Definir as melhores condições operacionais do reator proposto para máxima remoção dos parâmetros analisados, por meio de um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR).

Realizar um comparativo do efluente de indústria cosmética após o tratamento com os valores máximos permitidos de lançamento de efluentes em corpos hídricos Classes II e III, os quais são definidos pelas Resoluções N° 357/05 e N° 430/11 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) e Resolução N° 355/2017 do Conselho Estadual do Meio Ambiente-RS (CONSEMA).

### 1.1.2 Justificativa

Diante de um cenário onde o consumo de produtos cosméticos é cada vez maior e os impactos destes no meio ambiente são comumente relatados, sistemas de tratamento de efluentes da indústria cosmética tornam-se alternativas viáveis para minimização dos impactos nocivos destas substâncias ao meio ambiente (DUIS; JUNKER; COORS, 2022).

Diversas tecnologias podem ser empregadas para o tratamento deste efluente, contudo, por conter uma variedade de substâncias tóxicas, como parabenos, triclosan, cloretos,

surfactantes e outros, alguns tratamentos físico-químicos ou biológicos podem não remover em sua totalidade estas substâncias (LIMA; MELO; AGUIAR, 2022).

A EC é uma tecnologia de tratamento de águas e efluentes que vem recebendo grande destaque por ser flexível, não demandar de adição de produtos químicos, apresenta menor geração de lodo, ser de fácil operação e poder lidar com uma ampla variedade de contaminantes. A tecnologia apresenta grande eficiência para remoção de sólidos totais, carbono orgânico, óleos e graxas, metais pesados, DQO, cor e turbidez (DAS; SHARMA; PURKAIT, 2022). (SHOKRI; FARD, 2022) (NIDHEESH *et al.*, 2022).

Uma das responsabilidades ambientais da indústria é garantir a qualidade do efluente antes do seu lançamento, dessa forma é necessário que a tecnologia de tratamento seja eficiente para degradar todos os compostos presente no efluente (ABIDEMI *et al.*, 2019). Apesar de ser um efluente complexo e com limitações para o tratamento, devido a presença de compostos recalcitrantes, o emprego de tecnologias alternativas de tratamento para o efluente de indústria cosmética ainda é pouco investigado. A maioria dos estudos com este efluente usam a coagulação como alternativa de tratamento, contudo a EC, que possui semelhança com esta alternativa e ainda apresenta pontos positivos sobre a mesma, ainda é pouco investigada (LIMA; MELO; AGUIAR, 2022).

Nesse contexto, o trabalho avaliou o desempenho da EC para o tratamento de efluentes de indústria cosmética, a fim de minimizar os impactos deste efluente ao meio ambiente e à saúde humana.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

Nesta revisão de literatura encontram-se descritas as principais considerações a respeito das águas residuais da indústria cosmética, os diversos tratamentos passíveis de aplicação e, em especial a tecnologia de EC e às variáveis inerentes ao processo.

### 2.1 INDÚSTRIA DE HIGIENE PESSOAL, PERFUMARIA E COSMÉTICOS (HPPC)

A origem dos cosméticos ainda é incerta, contudo, o uso destes produtos é relatado a cerca de 30.000 anos, quando as primeiras civilizações utilizavam de corantes naturais misturados com água e óleo para pintar seus corpos. O Egito antigo é uma das maiores referências da utilização de cosméticos, sendo Cleópatra um ícone da cosmetologia, a mesma é conhecida pela sua preocupação com a pele e cabelos. A produção de cosméticos acompanhou a evolução humana e científica, estando sempre presente nas sociedades (ALVES, 2009) (MELO, 2012).

O setor da Indústria de Higiene Pessoal, Perfumaria e Cosméticos (HPPC), comumente denominada como indústria cosmética, tem apresentado um crescimento constante nas últimas décadas, representando um mercado promissor. Segundo a Agência Nacional de Vigilância Sanitária - ANVISA (2015) produtos de higiene pessoal, perfumaria e cosméticos compreendem todas as preparações de substâncias naturais ou sintéticas destinadas ao uso externo nas diversas partes do corpo humano com o objetivo de limpar, perfumar, alterar aparência, corrigir, proteger ou manter em bom estado as mesmas.

A ANVISA (2015) relatou ainda que, estes produtos podem ser classificados em dois grupos distintos, sendo estes: (a) produtos de Grau 1: aqueles que possuem propriedades básicas ou elementares e que requerem informações detalhadas quanto ao seu modo de usar ou restrições de uso; e (b) Grau 2: aqueles que possuem indicações específicas, cujas características exigem comprovação de segurança e/ou eficácia, e requerem de informações quanto ao modo e restrições de uso. Tal classificação ocorre de acordo com a probabilidade de ocorrência de efeitos não desejados (alergias, intoxicações) devido ao uso errôneo do produto, sua formulação, finalidade de uso, área do corpo a qual é destinado e cuidados necessários durante a utilização.

Em 2021, a indústria brasileira foi o 4º maior mercado, movimentando cerca de 22,9 bilhões de dólares, conforme observa-se na Tabela 1. Ainda no referido ano, o país realizou exportação de seus produtos para 173 países, representando 6,3% do total de vendas. A indústria cosmética mobiliza e promove o desenvolvimento do país, juntamente com redes de franquia, consultoria de vendas direta e salões de beleza, gerando cerca de 5,4 milhões de oportunidades de trabalho (ABIHPEC, 2022).

Tabela 1 - Maiores consumidores da indústria de HPPC em 2021

País	% Crescimento em 2021	Faturamento em 2021 (US\$)
Estados Unidos	19,40%	102,6
China	16,70%	88,2
Japão	6,20%	32
<b>Brasil</b>	<b>4,30%</b>	<b>22,9</b>
Alemanha	3,90%	20,4
Reino Unido	3,30%	17,6
França	2,90%	15,5
Índia	2,90%	15,4
Coreia do Sul	2,60%	13,8
Itália	2,30%	12,1

Fonte: Adaptado de Associação Brasileira da Indústria de Higiene Pessoa, Perfumaria e Cosméticos (ABIHPEC, 2022).

Dentre os principais fatores que justificam o crescimento está o aumento no poder de compra e a maior participação da mulher no mercado de trabalho brasileiro, sendo estas as maiores consumidoras. Além disto, o aumento na expectativa de vida da população também impulsiona o mercado com o consumo de cosméticos anti-idade (TEIXEIRA, 2019).

Até o primeiro semestre de 2022, o Brasil contava com cerca de 3372 empresas de HPPC, deste total cerca de 1998 encontram-se localizadas na região sudeste, sendo destas 1375 no Estado de São Paulo. A região Sul fica em segundo lugar com cerca de 690 empresas, sendo 259 no Paraná, 226 no Rio Grande do Sul e 205 em Santa Catarina (ABIHPEC, 2022).

Em seu processo produtivo a indústria de cosméticos acaba gerando um efluente com uma significativa parcela de contaminantes pouco biodegradáveis, como surfactantes, corantes, fragrâncias, microplásticos, sulfetos, parabenos e outros que são incorporados aos produtos durante a fabricação. Esses compostos quando lançados em corpos hídricos podem causar sérios impactos aos ecossistemas e à saúde humana, necessitando assim de um tratamento adequado antes do lançamento (LIMA; MELO; AGUIAR, 2022). Uma das consequências do crescimento

da indústria de HPPC é o aumento na geração de resíduos, sejam eles sólidos ou líquidos. A má gestão destes resíduos pode acarretar em uma contaminação do solo, do ar e das águas superficiais e subterrâneas afetando a qualidade do meio ambiente e a saúde humana (BOM *et al.*, 2019).

Diante de um cenário de crescimento da indústria cosmética em escala mundial, o setor tem evidenciado responsabilidade social corporativa, onde a sustentabilidade tem se tornado cada vez mais importante aos negócios. Assim, um dos principais conceitos levados em consideração é o ciclo de vida do produto, o qual é considerado o ponto de partida de avaliação da sustentabilidade de uma empresa. Nesse sentido, a indústria cosmética tem buscado investir e não negligenciar as etapas que envolvem o ciclo de vida de um produto, desde a matéria-prima utilizada até o pós-consumo deste produto (BOM *et al.*, 2019) (KOLLING; RIBEIRO; MEDEIROS, 2022).

Nesse sentido, é necessário que a indústria cosmética sendo um setor impulsionado pela ciência e altamente inovador desenvolva alternativas na sua cadeia produtiva objetivando minimizar os impactos negativos ao meio ambiente (BOM *et al.*, 2019).

## 2.2 EFLUENTE DE INDÚSTRIA COSMÉTICA

Por efeito de sua ampla área produtiva a indústria cosmética utiliza diversas matérias-primas e insumos em todas as etapas do seu processo produtivo, as quais incluem corantes e pigmentos, essências, polímeros, biopolímeros, emplastos peptídeos sintéticos, enzimas clareadoras da pele, vitaminas, antioxidantes, extratos vegetais, híbridos químicos (MIGUEL, 2012). Os processos de produção, lavagem e linhas de enchimento fazem com que a água se misture com as diversas matérias-primas utilizadas na indústria gerando um efluente líquido com baixa biodegradabilidade e recalcitrante (ANDRADE *et al.*, 2020).

Os processos produtivos da indústria cosmética são comumente baseados em operações unitárias de homogeneização, aquecimento e resfriamento. As principais etapas realizadas na indústria cosmética consistem em: recebimento, armazenamento, pesagem e separação de matérias-primas, preparação de lotes, realização de análises físico-químicas e microbiológicas, preenchimento e expedição de pedido. Em virtude da produção de diversos itens na indústria cosmética ocorrer em lotes, o consumo de energia é relativamente baixo, contudo, a demanda de água é grande, especialmente nas etapas de resfriamento e limpeza dos equipamentos, gerando grandes volumes de efluentes (LIMA; MELO; AGUIAR, 2022).



O efluente gerado costuma ser tóxico ao meio ambiente por apresentar baixa biodegradabilidade, alta carga de matéria orgânica recalcitrante, altos teores de sólidos totais suspensos, gorduras e óleos. Ressalta-se ainda, que a complexidade em tratar este efluente pode ser atribuída composição do mesmo que varia de acordo com o produto produzido (RIBEIRO *et al.*, 2021).

Os principais produtos produzidos na indústria de HPPC incluem sabonetes, shampoos, condicionadores, fragrâncias, cremes, óleos corporais, filtros solares, maquiagens, álcool em gel, entre outros. Para a fabricação destes produtos comumente são empregados ingredientes tóxicos, incluindo o Triclosan e os surfactantes, os quais apresentam alta frequência de detecção no ambiente aquático, representando risco toxicológico em espécies de algas invertebrados aquáticos mesmo quando em concentrações baixas ( $2,5 \mu\text{g L}^{-1}$ ) (AKBAY *et al.*, 2022) (BANERJEE *et al.*, 2016).

Além de apresentar efeitos nocivos aos ecossistemas aquáticos, algumas substâncias presentes em produtos cosméticos representam uma ameaça potencial à saúde humana. Essas substâncias podem afetar a sinalização endócrina, alterar o equilíbrio hormonal sexual e impedir a capacidade reprodutiva. O Triclosan é um dos compostos de maior preocupação à saúde humana e animal, pois o mesmo pode inibir a epóxido hidrolase, levar à metemoglobinemia, desregular o sistema receptor de estrogênio e andrógeno, ocasionar partos pré-maturos, afetar o crescimento corporal do feto, causar danos ao DNA e até mesmo câncer em células mamárias humanas (LEE *et al.*, 2020) (YUN *et al.*, 2020).

Ainda, os efluentes de indústria cosmética costumam apresentar numerosos desreguladores endócrinos, como compostos de almíscares sintéticos e filtros UV, os quais apresentam efeito estrogênicos e tóxicos na saúde humana e ao meio ambiente. A estrutura destes compostos torna o efluente tóxico, recalcitrante e com grandes concentrações de sólidos e gorduras em suspensão e alto teor surfactante, essas características tornam o efluente incompatível com os métodos convencionais de tratamento biológico (MUSZYŃSKI *et al.*, 2019) (PATIDAR; SRIVASTAVA, 2022).

Os surfactantes são comumente utilizados na indústria cosmética devido as suas propriedades de reduzir a tensão superficial ou induzir a formação de espuma. A estrutura deste tipo de composto permite que ele se dissolva em líquidos polares e não polares afetando a interação entre as superfícies carregadas negativamente (por exemplo, células bacterianas, fibras de tecido) e a partícula surfactante. Os surfactantes são contaminantes perigosos e o seu uso demasiado levanta preocupações sobre possíveis impactos negativos no meio ambiente e na saúde humana (KLIMONDA; KOWALSKA, 2021).

Devido a ampla utilização de surfactantes para produção de produtos de banho a presença destes compostos tem sido cada vez mais relatada em ambientes aquáticos. Estudos relatam que a presença de surfactantes em ambientes aquáticos pode aumentar as concentrações de xenobióticos, diminuir a quantidade de oxigênio dissolvido e causar a formação de espuma qual afeta a atividade fotossintética (MURARI *et al.*, 2017).

O principal surfactante comercializado no mundo é o Linear Alquilbenzeno Sulfonato (LAS), sendo a maior fonte de agentes tensoativos em águas residuais. O LAS é conhecido por ser biodegradável, contudo, essa condição se limita à ambientes aeróbios. A presença do LAS em corpos hídricos representa um risco aos organismos aquáticos e a qualidade da água (KIM; SEO; LEE, 2020).

Além de causas a desestabilização na flora e fauna aquática, a presença de surfactantes induz sabor e odor desagradáveis na água e provoca alterações de curto e longo prazo a saúde humana, podendo causar dermatite e irritação ocular, e também um dos perigos associados aos surfactantes é a seu efeito carcinogênico (SIYAL *et al.*, 2020).

Segundo os mesmos autores, a toxicidade dos surfactantes está relacionada com a hidrofobicidade, propriedade de repelir água, destes compostos. O aumento nos grupos alquil ocasiona o aumento na hidrofobicidade destes tensoativos resulta no aumento da toxicidade da molécula.

### **2.2.1 Toxicidade do Efluente de Indústria Cosmética**

Nos últimos anos a atenção sobre a qualidade do meio ambiente tem aumentado visto a crescente ameaça que o mesmo vem sofrendo pelos processos de urbanização e industrialização acelerados. Um dos principais problemas enfrentados é a contaminação das águas superficiais e subterrâneas por diferentes compostos tóxicos. A maior fonte de contaminação é a presença de produtos farmacêuticos e de higiene pessoal, os quais afetam a saúde humana, os ecossistemas aquáticos, a qualidade ambiental e até mesmo o bem-estar econômico e social (AGUILAR-PÉREZ *et al.*, 2021).

A ocorrência de compostos utilizados na indústria cosmética em águas superficiais tem sido relatada em concentrações dentro de faixas de  $\text{ng L}^{-1}$  e  $\mu\text{g L}^{-1}$ . A presença destes compostos em águas, mesmo em baixos níveis de concentração, impacta na redução da diversidade de macroinvertebrados, provoca alteração no comportamento dos peixes, pode ocasionar

interrupção do desenvolvimento e na reprodução dos peixes, entre outros (DU KANG *et al.*, 2018).

A introdução de produtos cosméticos em sistemas aquáticos e os impactos adversos relacionam-se com a bioatividade, toxicidade e potencial de bioacumulação em organismos. Comumente as estações de tratamento de esgoto empregam sistemas biológicos de tratamento, devido ao baixo custo de implantação e operação, contudo estes sistemas podem apresentar limitações para remover efetivamente alguns compostos utilizados na indústria cosmética, como produtos químicos, microplásticos, filtros orgânicos UV, compostos perfluoroalquil e almíscares sintéticos (BILAL; MEHMOOD; IQBAL, 2020).

Ainda segundo o mesmo autor, os compostos de indústria cosmética representam riscos ecológicos mais persistentes devido à utilização desse tipo de produto ser contínua durante toda a vida e costumam entrar no meio ambiente sem alterações e em grandes volumes.

A indústria cosmética costuma utilizar diversos métodos para prolongar a vida útil de seus produtos, uma das alternativas mais utilizadas é adição de conservantes, ou seja, substâncias que inibem o crescimento microbiano. Os principais conservantes utilizados são os parabenos, que são ésteres do ácido 4-parahidroxibenzóico (PHBA), estes são classificados como contaminantes emergentes pois apresentam muitos efeitos adversos como ação desreguladora do sistema endócrino de espécies animais, incluindo os seres humanos. A presença de parabenos em águas residuais é um desafio para os sistemas de tratamento convencionais por sistemas biológicos, visto que esse tipo de composto inibe o crescimento microbiano e afeta a eficiência de tratamento (NOWAK; JABŁOŃSKA; RATAJCZAK-WRONA, 2021).

A remoção incompleta de parabenos nas estações de tratamento de efluente funciona como principal rota de entrada destes compostos no meio ambiente. Os parabenos são relatados em altas concentrações e representam uma preocupação sobre os resultados da exposição de organismos a estes compostos. Os efeitos adversos da exposição aos parabenos incluem danos ao DNA, atividade antiandrogênica, estrogenicidade, distúrbios endócrinos, efeitos citotóxicos e genotóxicos em linfócitos e até mesmo risco de câncer em seres humanos (BILAL; MEHMOOD; IQBAL, 2020) (VALE *et al.*, 2022).

Outro composto amplamente utilizado na indústria cosmética e que representa risco ambiental é o Triclosan, o qual é empregado como conservante em uma variedade de produtos, como xampus, cremes dentais, detergentes, sabonetes para as mãos, desodorantes e protetores solares. Devido ao grande consumo, o Triclosan é comumente relatado em águas superficiais em grandes concentrações e também tem sido detectado em amostras humanas, como plasma,

urina e leite materno. Este composto representa um risco ambiental devido seu potencial de desregulador endócrino e letalidade em alguns microrganismos (BILAL; BARCELÓ; IQBAL, 2020).

Um dos compostos de maior preocupação ambiental utilizado pela indústria cosmética são os surfactantes que são tóxicos e bioacumuláveis. Os surfactantes possuem efeitos nocivos e tóxicos sobre uma ampla diversidade de organismos aquáticos, mesmo quando em baixas concentrações. Além disto a presença de surfactantes em corpos hídricos pode ocasionar a geração de espumas que dificultam a transferência de oxigênio entre a água e a atmosfera, diminuindo a concentração de oxigênio na água e sendo letal a diversos microrganismos (NUNES; TEIXEIRA, 2022).

A presença de surfactantes em corpos hídricos também pode alterar alguns parâmetros de qualidade da água, sendo eles a demanda química de oxigênio (DQO), demanda biológica de oxigênio (DBO), sólidos totais dissolvidos e a turbidez (SASI *et al.*, 2021).

Com o aumento do uso de protetores solares em todo o mundo, a indústria cosmética tem aumentado a fabricação destes produtos nos últimos anos. Estes compostos foram relatados nos ambientes aquáticos em concentrações de  $\text{ng L}^{-1}$  e podem representar riscos a diversos ecossistemas aquáticos. Os principais riscos associados a presença de filtros UV orgânicos em ambientes aquáticos são relacionados a bioacumulação em organismos e por serem desreguladores endócrinos podem prejudicar a reprodução, além disto estudos mostram que estes compostos podem ocasionar o branqueamento e morte de recifes de corais (LI *et al.*, 2022).

Outro material amplamente usado na fabricação de produtos cosméticos são as microesferas de plástico, conhecidas como microplásticos ( $<5\text{mm}$ ), utilizadas como limpadores abrasivos em uma infinidade de produtos, incluindo creme dental, produtos de limpeza para as mãos, sabonetes, shampoos, banhos de espuma e esfoliantes. Além das funções de limpeza, os materiais plásticos podem ser inseridos aos produtos como um papel decorativo (MIRAJ; PARVEEN; ZEDAN, 2019).

Estes compostos chegam aos ambientes aquáticos e são ingeridos por organismos aquáticos devido à falta de métodos eficazes para a remoção de microplásticos e a alta resistência de degradação. Os microplásticos representam riscos devido a bioacumulação e biomagnificação que levam estes materiais ao nível trófico superior da cadeia alimentar (K.L. *et al.*, 2022).

A principal forma de evitar a chegada destes contaminantes ao meio ambiente é através de sistemas de tratamento de águas residuais eficientes. Devido ao baixo custo de implantação

e operação relativamente fácil comumente indústrias utilizam de processos biológicos para tratar os efluentes gerados. No entanto, as principais dificuldades na aplicação de sistemas biológicos em efluentes de indústria cosmética é a presença de surfactantes, conservantes, fragrâncias, corantes, pigmentos e outros diversos compostos tóxicos. A presença de substâncias tóxicas em sistemas biológicos pode inibir a atividade microbiana e diminuir a eficiência de tratamento. Dessa forma, devido às limitações de sistemas biológicos estudos são desenvolvidos afim de investigar tecnologias avançadas de tratamento para atingir uma maior eficiência, afim de minimizar os impactos ambientais e atender as regulamentações (FRIHA *et al.*, 2014).

Neste cenário, fica evidente a complexidade do efluente gerado na indústria cosmética e a importância da realização de um tratamento eficiente para degradação dos compostos tóxicos presentes. A crescente presença de poluentes orgânicos persistentes e recalcitrantes em grandes volumes em efluentes gerados pela indústria de cosméticos demanda de sistemas de tratamento eficiente antes do lançamento destes efluentes no meio ambiente afim de minimizar os impactos ambientais e atender a legislação vigente (BANERJEE *et al.*, 2016).

### 2.3 ALTERNATIVAS DE TRATAMENTO PARA O EFLUENTE DE INDUSTRIA COSMÉTICA

Em decorrência do aumento da procura por produtos sustentáveis e a pressão exercida pelas regulamentações, as indústrias cosméticas tem modificado seus processos produtivos de forma a garantir a qualidade, a segurança e a sustentabilidade de seus produtos. As principais mudanças ocorrem nas matérias-primas empregadas na fabricação dos produtos que frequentemente são substituídas por produtos menos nocivos ao meio ambiente, ou seja, cosméticos que não contenham parabens, silicones, fenoxietanol, corantes, entre outros compostos. Contudo, este mercado ainda é pouco representativo e a indústria cosmética segue sendo uma grande fonte poluidora do meio ambiente (FIORE *et al.*, 2021).

Além da pressão exercida pelas regulamentações, a indústria cosmética tem buscado inovações sustentáveis por conta do aumento da conscientização dos consumidores quanto as questões ambientais, especialmente preocupações com segurança, exposição a componentes químicos e substâncias tóxicas, impacto do descarte de embalagens, testes em animais e os impactos sociais pelo consumo destes produtos. Apesar das principais modificações ocorrem nas matérias-primas empregadas na fabricação, a indústria tem investido em estratégias de

mídia e marketing para buscar seu fortalecimento neste mercado (BOM *et al.*, 2019) (KOLLING; RIBEIRO; MEDEIROS, 2022).

A indústria cosmética é um ramo industrial que gera uma significativa quantidade de resíduos no seu processo produtivo. Os resíduos sólidos provenientes da produção de cosméticos e outros produtos comumente são incinerados ou depositados em aterros, já os efluentes gerados são tratados em estações de tratamento no local devido à grande concentração de poluentes que costumam apresentar (DEMICHELIS; FIORE; ONOFRIO, 2018).

Nesse cenário, diversas tecnologias são investigadas a fim de definir diferentes formas de tratamento eficiente para o efluente de indústria cosmética. Os processos de tratamento mais pesquisados atualmente são: coagulação/floculação, flotação por ar dissolvido, flotação por ozônio dissolvido, eletrocoagulação, sistemas de membrana, biorreator de membrana submersa, reator anaeróbio de manta de lodo de fluxo ascendente, processos de oxidação avançados (CÜCE; TEMEL, 2021). Na Tabela 2, estão descritos os estudos realizados utilizando efluente de indústria cosmética, bem como apresenta-se a eficiência destes tratamentos em relação a remoção de alguns parâmetros avaliados.

Tabela 2 – Aplicações e eficiência de diferentes tecnologias no tratamento de efluentes cosméticos

<b>Tecnologia</b>	<b>% Remoção dos parâmetros avaliados</b>	<b>Modo de operação do reator</b>	<b>Referência</b>
foto Fenton-Like	95,50% DQO 81,21% Fenol 89,61% Turbidez	Contínuo	(ANDRADE <i>et al.</i> , 2020)
Eletrocoagulação	78,38% Turbidez 47,29% DQO 40,90% TOC	Contínuo	(TONES <i>et al.</i> , 2020)
MBR	99,22% Cor 98,86% Triclosan 99,74% Surfactantes 99,33% DQO 98,39% Sólidos Totais	Contínuo	(BANERJEE <i>et al.</i> , 2016)
US-EC	80,9% DQO 433,5 kWh (kg DQO removido) <sup>-1</sup>	Batelada	(PATIDAR; SRIVASTAVA, 2022)
EO/H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	69% DQO 73% COD	Batelada	(GONÇALVES <i>et al.</i> , 2022)
UV/Fe <sup>0</sup> /H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> acoplado com lodo ativado	97,7% DQO 98% Fósforo Total 98% Nitrogênio Total	Batelada	(MUSZYŃSKI <i>et al.</i> , 2019)
Ultrafiltração acoplada com lodo ativado	70% COD 95,3 % DQO	Batelada	(MELO; MOUNTEER, 2019)
Coagulação de Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> seguida de flotação	97,87% Turbidez 97,41% Óleos e Graxas 42,7% DQO	Batelada	(ARAÚJO <i>et al.</i> , 2021)

Nota: (COD) Carbono Orgânico Dissolvido; (COT) Carbono Orgânico Total; (DOF) Flotação de ozônio dissolvido; (DQO) Demanda Química de Oxigênio; (EO-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) Eletro-oxidação combinada com Peróxido de Hidrogênio; (MBR) Biorreator de membrana; (SS) Sólidos Suspensos; (ST) Sólidos Totais.

Fonte: Autora (2022).

A aplicação de processos oxidativos avançados (POAs) pode alcançar resultados promissores na degradação de poluentes orgânicos presentes no efluente, além disto, a

mineralização completa ou a transformação destes poluentes em compostos menos tóxicos também pode ocorrer de forma satisfatória através de processos de oxidação química. A maior desvantagem dos POAs é a presença de espécies sequestrantes de radical hidroxila no efluente, que leva a uma redução da eficiência de remoção de poluentes (GOSWAMI *et al.*, 2018).

As tecnologias eletroquímicas apresentam-se como extremamente vantajosas para o tratamento de efluentes com alta concentração de contaminantes orgânicos e refratários. A eletroquímica consiste na transferência de carga entre uma substância condutora ou semicondutora e um condutor iônico (líquidos, fundidos ou eletrólitos sólidos), ocorrendo reações dentro dos eletrólitos e reações resultantes (SUMAN; SANGAL; VASHISHTHA, 2021).

Além da eficiência de remoção de contaminantes, os processos eletroquímicos também apresentam vantagens em relação a relativa disponibilidade de energia elétrica, condições energéticas reacionais reduzidas, sistemas reprodutíveis e facilmente controláveis, permitindo a automação, e plantas relativamente compactas (MATTOS *et al.*, 2021).

O processo de (EC) é um dos tratamentos de efluentes mais estudados na atualidade. Este processo recebe destaque devido sua eficiência para remoção de diversos contaminantes através da produção de coagulante *in-situ* através do ânodo de sacrifício. Os principais mecanismos de remoção de contaminantes no processo de EC consistem na coagulação do floco de varredura, a adsorção e neutralização de carga (NIDHEESH *et al.*, 2022).

Ainda, segundo os autores, uma das maiores vantagens do processo de EC é o custo operacional relativamente baixo, contudo o processo apresenta como limitação a necessidade de energia elétrica para conduzir o processo, especialmente para águas residuais de baixa condutividade. Os benefícios do processo, a alta eficiência e o crescente interesse por processos eletrificados levam a um aumento em pesquisas envolvendo processos de EC para tratamento de diversos efluentes, incluindo o efluente de indústria cosmética.

Nesse contexto, Carmo (2018) investigou a combinação dos processos de eletrocoagulação e processos oxidativos avançados ( $H_2O_2/UV$  e  $TiO_2/H_2O_2/UV$ ) para o tratamento de efluentes da indústria de produtos capilares. No estudo, o reator eletrolítico utilizado consistia em seis placas de metal (150 x 130 x 1,5 mm) equidistantes 1,5 cm uma da outra, a área superficial de contato com o efluente correspondente a 0,0374 m<sup>2</sup> e a relação entre a área superficial de contato com o efluente e o volume de efluente de 18,7 m<sup>2</sup>/m<sup>3</sup>, dessa forma, foram tratados 2 L de efluente por batelada. A densidade de corrente foi mantida em 50 A/m<sup>2</sup> e o tempo de eletrólise foi de 30 min.



O referido estudo apresentou resultado satisfatório de remoção de diversos parâmetros quando utilizou a combinação dos dois sistemas, destacando-se a eficiência de remoção de 96,9% DQO, 89,4% DBO, 87% COT, 73,8% COD e 99,5% Surfactantes aniônicos. Os testes que utilizaram apenas EC para o tratamento do efluente da indústria de produtos capilares apresentaram resultados semelhantes, atingindo eficiência de remoção de 97,3% de DQO, 88% DBO, 85,8% COT, 71,5% COD e 98,9% Surfactantes aniônicos. Contudo, a remoção da toxicidade aguda apresentou resultados satisfatórios apenas para o processo de EC, sendo este tratamento determinante para o sucesso do sistema combinado proposto e necessitando ser investigada.

## 2.4 ELETROCUAGULAÇÃO PARA TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS

A EC é uma alternativa de tratamento de efluentes que vem recebendo grande destaque, especialmente pela capacidade de degradação de diversos poluentes. Essa tecnologia é considerada de baixo custo de implantação e operação, devido a zero adição de produtos químicos durante o processo. Por não demandar nenhuma adição de produto químico, a eletrocoagulação não apresenta risco de geração de contaminantes secundários durante o processo de tratamento, ao contrário da coagulação química. Por apresentar um custo baixo e uma alta taxa de remoção de contaminantes a eletrocoagulação é uma das principais alternativas de tratamento para efluentes altamente contaminados (DAS; SHARMA; PURKAIT, 2022).

A primeira experiência envolvendo a EC foi relatada na Inglaterra em 1889 para o tratamento de esgotos. Em 1946 ocorreu o primeiro relato do uso da tecnologia nos Estados Unidos para tratamento de efluentes sanitário, contudo, por muito tempo a aplicação da tecnologia se manteve restrita (SONG *et al.*, 2017). Com o rápido desenvolvimento da indústria e a crescente complexidade dos efluentes gerados, nas últimas décadas a EC tem chamado a atenção e vem sendo estudada para uma ampla diversidade de efluentes. As principais aplicações da EC são em efluentes da indústria têxtil (LACH *et al.*, 2022), efluentes de lavanderia (FENG *et al.*, 2021), efluentes com altas concentrações de óleos e graxas (ZINI *et al.*, 2020) e efluentes contaminados com metais pesados (YU *et al.*, 2023).

Na EC os processos eletrolíticos são controlados eletricamente, dessa forma o processo não demanda de constantes manutenções pois não existem peças móveis no equipamento. Outro fator importante e fundamental é a simplicidade de operação do processo, a qual permite completa automação da unidade de eletrocoagulação (RAHMAN *et al.*, 2021).

O processo de EC pode utilizar eletrodos de diversos materiais, comumente são utilizados eletrodos de ferro e alumínio, conhecidos como eletrodos de sacrifício. Os eletrodos são responsáveis pela geração *in situ* de coagulantes metálicos após aplicação de corrente contínua no ânodo. A quantidade de íons metálicos gerados varia de acordo com a densidade de corrente aplicada, a qual aumenta proporcionalmente. Os íons metálicos formados interagem com o hidróxido gerado no cátodo durante a inserção de corrente, formando hidróxidos metálicos que são muito bons adsorventes para os poluentes, formando flocos (NIDHEESH; SINGH, 2017).

Ainda de acordo com Nidheesh e Singh (2017), as reações no cátodo e no ânodo tem capacidade de gerar gás hidrogênio e oxigênio, respectivamente, e estes desempenham papel fundamental na remoção dos flocos formados. O gás hidrogênio tem capacidade de levar os microflocos formados para o topo da solução aquosa, formando uma espuma que pode ser removida por escumação. Por outro lado, o oxigênio gerado no ânodo tem papel fundamental na formação do peróxido de hidrogênio, o qual tem capacidade oxidativa de substâncias tóxicas para substâncias não tóxicas.

A EC pode ser caracterizada em três etapas sucessivas quanto a geração e formação de flocos, sendo estas a geração eletroquímica de coagulantes e  $\text{OH}^-$ , geração e transferência de massa de flocos e remoção de poluentes por adsorção de flocos. Quando comparada ao processo de coagulação química a EC tem capacidade de geração de flocos em faixas de pH mais amplas e de formas mais rápida, indicando uma vantagem do uso desta tecnologia (TEGLADZA *et al.*, 2021).

Estudos indicam que o processo de EC apresenta eficiência de mais de 85% de remoção de poluentes em diversos tipos de efluentes, o que comprova sua confiabilidade para tratamento de efluentes. Além da eficiência de remoção de diversos poluentes, o baixo custo, a zero adição de produtos químicos, geração de subprodutos não perigosos e a configuração operacional fácil fazem da eletrocoagulação uma das opções de tratamento de efluentes mais sustentáveis. Em contrapartida, a EC apresenta limitações, sendo a principal a deterioração dos eletrodos de sacrifício durante o processo, demandando de substituições periódicas. Nesse contexto, existe espaço para melhorias no emprego da EC, principalmente na otimização dos parâmetros operacionais para qualidade de tratamento e rendimento, na Tabela 3 está apresentado o desempenho do processo de EC em vários tipos de efluentes em estudos atuais (TAHREEN; JAMI; ALI, 2020).

Tabela 3 – Desempenho do processo de eletrocoagulação em diferentes tipos de efluentes em estudos atuais

<b>Tipo de efluente</b>	<b>Poluentes removidos</b>	<b>Modo de operação do reator</b>	<b>ânodo/cátodo</b>	<b>Condições operacionais</b>	<b>Eficiência de remoção</b>	<b>Referências</b>
Efluentes da indústria de papel	Cor DQO	batelada	Aço-carbono	t: 60 min j: 24,80 mA cm <sup>-2</sup> pH: 7,0 [ ] 1,0 g L <sup>-1</sup> Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	94% 68%	(KUMAR; SHARMA, 2022)
Efluente de moinho de arroz	DQO TDS SST	batelada	Al-Al	pH: 7,0 j: 20 mA cm <sup>-2</sup> t: 30 min	94,79% 96,62% 88,76%	(ANUF <i>et al.</i> , 2022)
Efluente de fábrica de óleo de palma cru	DBO DQO SS	batelada	palha de aço	i: 19,07 A pH: 4,37 t: 45 min	99,26% 97,21% 99,00%	(NASRULLAH <i>et al.</i> , 2022)
Efluente têxtil	Cor DQO SST	fluxo contínuo	Fe-Fe	q: 0,5 L min <sup>-1</sup> pH: 8,24 V: 70 V	96,87% 89,77% 84,46%	(HENDAOUÏ; TRABELSI-AYADI; AYARI, 2022)

(continua)

<b>Tipo de efluente</b>	<b>Poluentes removidos</b>	<b>Modo de operação do reator</b>	<b>ânodo/cátodo</b>	<b>Condições operacionais</b>	<b>Eficiência de remoção</b>	<b>Referências</b>
Efluente industrial de destilaria	cor DQO	batelada	Fe-Fe	t: 3,5 h pH: 7 j: 0,4 A dm <sup>-2</sup>	90,57% 86,54%	(ASAITHAMBI <i>et al.</i> , 2021)
Efluentes farmacêuticos	Cloretos SS STD	batelada	Fe-Al	t: 15 min i: 0,04 A pH: 7	90,40% 86,30% 81,50%	(PADMAJA; CHERUKURI; REDDY, 2020)
Efluentes lácteos	DQO Fosfato SS	batelada	Al-Al	pH: 6,8 j: 0,65 A m <sup>-2</sup>	80% 98% 100%	(BASSALA <i>et al.</i> , 2017)
Efluentes petrolíferos	DQO fenol	batelada	PS- Fe	pH: 6,30 j: 22 mA cm <sup>-2</sup> t: 39 min	96,18% 94,02%	(AKKAYA, 2022)

(conclusão)

Nota: (Al) alumínio; (DBO) demanda bioquímica de oxigênio; (DQO) demanda química de oxigênio; (Fe) ferro; (PS) ferro perfurado; (SS) sólidos suspensos; (SST) sólidos suspensos totais; (STD) sólidos totais dissolvidos.

Fonte: Autora (2022).

A EC tem sido aplicada em diversos tipos de efluentes com concentrações variadas de poluentes, apresentando alta eficiência de tratamento. A tecnologia é reconhecida não apenas pela sua eficiência para remoção de contaminantes, mas por ser simples, demandar de menos tempo para o tratamento e por apresentar um custo relativamente baixo. Contudo, a EC é uma tecnologia que depende de diversos parâmetros de operação, como concentração inicial, pH, tipo e arranjo dos eletrodos, corrente elétrica, entre outros, que serão abordados na sequência (DAS; SHARMA; PURKAIT, 2022).

#### 2.4.1 Princípios inerentes à tecnologia de eletrocoagulação

O tratamento por EC combina diversos mecanismos que podem ocorrer de forma simultânea e/ou paralelos. Estes mecanismos podem ser eletroquímicos (dissolução de metais e redução da água, eletro-oxidação ou eletro-redução de poluentes), químicos (equilíbrio ácido/base com mudança de pH, precipitação de hidróxidos, reação redox), adsorção, coagulação e flotação. Durante a etapa de coagulação as espécies coagulantes são geradas *in situ* devido a eletrodissolução de um eletrodo de sacrifício, os quais costumam ser de ferro ou alumínio pela disponibilidade do material, o custo reduzido e a eficiência no tratamento (HAKIZIMANA *et al.*, 2017).

Por envolver vários mecanismos, a EC sofre influência de diversos parâmetros operacionais, sendo os principais a distância entre eletrodos, pH da solução, tipo de eletrodo, densidade de corrente aplicada, condutividade, tempo de tratamento e configuração dos eletrodos. Afim de otimizar estes parâmetros e garantir os melhores resultados para o tratamento diversos estudos são realizados para verificar as melhores condições operacionais para o sistema (DAS; SHARMA; PURKAIT, 2022).

A combinação de eletrodos de Al e Fe, por exemplo, tem sido relatada como extremamente eficiente para remoção de contaminantes e também na menor demanda de energia, a qual impacta nos custos do processo. Os eletrodos de Al e Fe, quando submetidos a uma corrente elétrica, se dissolvem em íons  $Al^{3+}$  e  $Fe^{2+}/Fe^{3+}$  na solução, estes atuarão como coagulantes (TAHREEN; JAMI; ALI, 2020) (GRECCO; SOUZA; ZANONI, 2022).

Além do material dos eletrodos, diversos outros fatores podem afetar o desempenho da EC e devem ser investigados. A disposição dos eletrodos e a distância entre eles vem sendo comumente investigada devido a sua influência sobre o processo. Os eletrodos podem ser dispostos de diversas formas, sendo um cátodo e um ânodo a forma mais simples. O arranjo

complexo de eletrodos pode ser classificado em paralelo monopolar (MP-P), série monopolar (MP-S) ou série bipolar (BP-S). Estudos mostram que eletrodos monopolares requerem uma baixa voltagem e uma corrente mais alta, ao contrário dos eletrodos bipolares, ademais não existem comprovações de qual arranjo de eletrodos é melhor que o outro com base apenas no rendimento da EC (HAKIZIMANA *et al.*, 2017).

Diante deste cenário, Rahman *et al.* (2021) sugerem que apesar de diversos avanços, vantagens e alta eficiência do processo de eletrocoagulação, esta tecnologia ainda não está totalmente pronta para ser implantada comercialmente devido a carência definições das condições operacionais ideais. Ressalta-se que apesar destas considerações, atualmente a empresa Estadunidense *WaterTectonics* vem alcançando resultados satisfatórios na aplicação da EC no tratamento de água, o que pode ser considerado muito promissor para o desenvolvimento e aprimoramento do setor (WATERTECTONICS, 2022).

#### 2.4.1.1 Densidade de corrente elétrica e tempo de eletrólise

A densidade de corrente elétrica e tempo de eletrólise são fatores determinantes para a EC, pois controlam a geração de coagulante. Em um estudo realizado por Galvão, Souza e Vidal (2020) investigou-se a relação entre o tempo de eletrólise e a densidade de corrente elétrica na eficiência do processo de tratamento de lixiviado de aterro sanitário, utilizando eletrodos de alumínio. Os resultados indicam que quanto maior a corrente aplicada maior é a eficiência de remoção, além disto, o tempo de eletrólise mostrou-se determinante para remoção de alguns parâmetros, como cor e turbidez, visto que a taxa de coagulação é inicialmente lenta e requer mais tempo de eletrólise.

A densidade de corrente ou corrente aplicada por área de superfície efetiva, é o principal parâmetro de influência nas taxas de liberação de elétrons, a qual se dá pela eletrodissolução do eletrodo metálico. Este parâmetro impacta no desempenho da EC e deve levar em consideração as características do efluente, uma vez que a variação na densidade de corrente aplicada se dá pelas mudanças na interação iônica, a qual é causada pelos contaminantes presentes (DAS; SHARMA; PURKAIT, 2022).

Um estudo desenvolvido por Changmai, Pasawan e Purkait (2019), buscou investigar a eletrocoagulação seguida do processo de microfiltração para o tratamento de efluentes oleosos contendo metais como Na, Cr, Cu, Pb e Ni. As variáveis investigadas foram a densidade de corrente (20 - 80 A m<sup>2</sup>), distância entre os eletrodos (0,005 - 0,2 m) e pH inicial (3,6 - 8,7). Os

resultados mostraram, que para este efluente, com 20 minutos de tratamento, a redução da taxa de óleos e graxas foi de 70,86 %, ainda foi possível identificar que quanto maior a densidade de corrente maior a produção de flocos, e conseqüentemente maior a remoção de contaminantes.

Devido a taxa de remoção de poluentes ser diretamente proporcional ao tempo de eletrólise e a densidade de corrente, sendo o valor mais alto de densidade de corrente útil para garantir a liberação de diferentes íons necessários para a formação de flocos coagulantes e o tempo de eletrólise determinante para remoção de parâmetros como cor e turbidez, comumente identificadas em efluentes, a determinação de condições ótimas de operação para estas variáveis é importante para o processo de EC, pois garante uma redução do consumo de energia necessária (ALJABERI, 2022).

#### 2.4.1.2 Efeito do pH para o tratamento

Um parâmetro muito importante para a EC é o pH da solução, pois desempenha um papel fundamental para formação de coagulantes. Comumente, os efluentes tratados por EC apresentam uma variedade de espécies em equilíbrio, como complexos iônicos metálicos e complexos hidróxidos monoméricos ou poliméricos. Estas espécies podem interagir de diferentes formas com os contaminantes presentes e proporcionar diferentes desempenhos no processo (DAS; SHARMA; PURKAIT, 2022).

Ainda segundo os autores, o pH controla a liberação e formação de coagulantes durante o processo de EC, podendo aumentar ou diminuir a eficiência de tratamento. Estudos mostram que com o aumento de  $H_2$  nas proximidades do cátodo e a formação de  $OH^-$  ocasiona o aumento do pH da solução, contudo, em condições inadequadas o pH pode inibir a formação de coagulante e diminuir a eficiência de tratamento. Além disto, variações no pH garantem a melhor capacidade de adsorção de poluentes das espécies coagulantes durante o processo de EC.

Um estudo realizado por Bae *et al.* (2022) investigou os efeitos do oxigênio dissolvido e pH na taxa de remoção de selenato e selenito dissolvido por eletrocoagulação de ferro. Resultados mostram que nos experimentos realizados em condições estritamente anóxicas, a corrente foi estável a 60 mA nos primeiros 60 minutos, mas depois flutuou entre 60–90 mA em pH 6 e 70–90 mA em pH 8 nos últimos 60 minutos. Aumentos na corrente e densidade de

corrente indicam que a resistência da solução está aumentando, dessa forma o pH 8 se mostrou o mais favorável para o tratamento por apresentar maior estabilidade.

Em outro estudo desenvolvido por Demirbas e Koby (2017) foi investigado o uso de eletrodos de Fe-Fe e Al-Al com variações de pH em efluentes de metalúrgica. Este trabalho mostrou que eletrodos de Fe apresentam melhor desempenho quando utilizados em pH 7,5, enquanto eletrodos de Al operam melhor sob pH 6,5. Esta variação de pH da solução apresentou efeito significativo no desempenho do processo para ambos eletrodos testados, o que evidencia a influência do pH para o tratamento.

#### 2.4.1.3 Eletrodos de sacrifício

O processo de EC caracteriza-se pela eletrodissolução de eletrodos metálicos, chamados de eletrodos de sacrifício, através da inserção de corrente elétrica aos ânodos imersos no efluente. A eletrodissolução promove o aumento dos íons metálicos, os quais atuam como agentes coagulantes no processo de remoção dos contaminantes. Diversos materiais metálicos podem ser utilizados como eletrodos de sacrifício, sendo os mais comuns Fe e Al pela disponibilidade e custo (GARCIA-SEGURA *et al.*, 2017).

Um material dos eletrodos é descrito como um fator condicionante da eficiência do processo. Eletrodos de Al e Fe tem sido comumente utilizado nos processos de EC devido ao seu custo relativamente baixo, sua disponibilidade no mercado e alta eficiência de remoção de diferentes contaminantes. Ainda, segundo a literatura, os ânodos de alumínio podem apresentar desempenho superior em relação aos ânodos de ferro, contudo essa eficiência de remoção depende das características do efluente (OMWENE; KOBYA; CAN, 2018).

Ainda que, a maioria dos processos de EC optem por utilizar eletrodos de Al e Fe, diversos materiais são testados a fim de verificar a sua influência na eficiência do sistema. Recentemente, o titânio foi descrito como um excelente ânodo para remover diversos contaminantes, especialmente o cromo (NIDHEESH *et al.*, 2022). Outro material testado é o diamante dopado com boro (BDD), porém, este material possui um custo muito elevado, o que por vezes pode inviabilizar o sistema (GHAZOUANI; BOUSSELMI; AKROUT, 2020). O aço é um dos materiais mais resistentes utilizados na EC, contudo, esse tipo de eletrodo pode apresentar limitações para remoção de alguns contaminantes, não atingindo níveis satisfatórios (CHANDRAKER *et al.*, 2021).



Em um estudo desenvolvido por Bagastyo *et al.* (2022), o magnésio (Mg) é descrito como um material anódico de sacrifício excelente devido a sua propensão à correção. O material tem menor potencial de redução padrão em comparação com outros metais (Al, Cu, Fe, Ni, Zn), além disto, o material é biodegradável, atóxico e de fácil reciclagem. Por apresentar uma rápida dissolução e corrosão não galvânica, a utilização do ânodo de Mg reduz a demanda de energia para a liberação de íons. Contudo, um fator determinante para a utilização desse material é a pureza do produto, sendo a liga de Mg a mais indicada devido a maior liberação de íons.

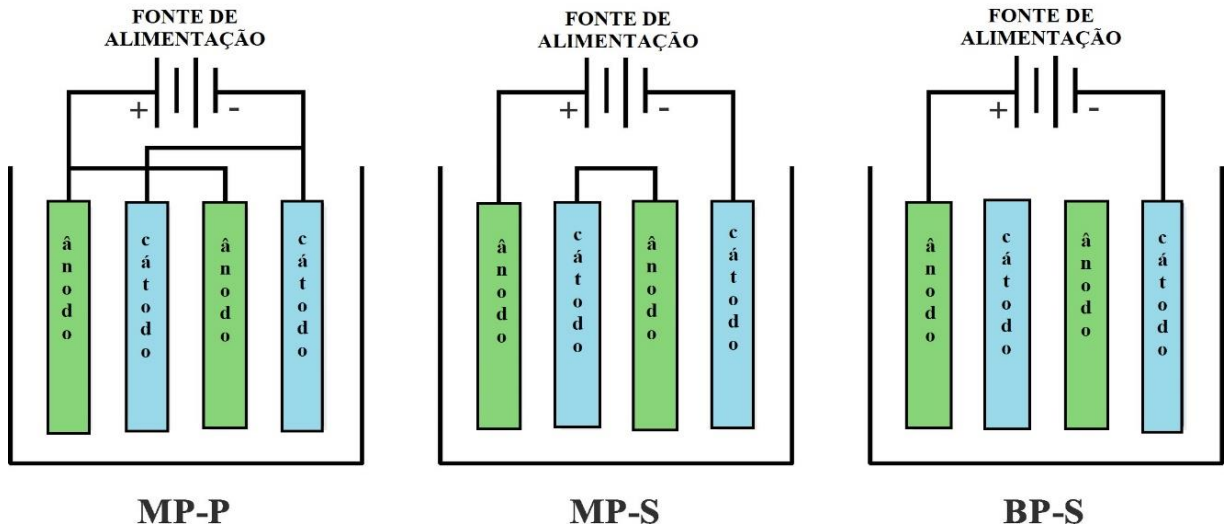
#### 2.4.1.4 Arranjo e configuração dos eletrodos de sacrifício

Além do material utilizado, o arranjo e a configuração dos eletrodos de sacrifício são fatores determinantes para a eficiência do tratamento por EC. Os reatores podem operar em fluxo contínuo ou batelada, podendo os contínuos ser de fluxo turbulento, transporte aéreo ou fluxo modificado. Os reatores de EC podem conter um ou vários pares de ânodo-cátodo, podendo estes ter conexões monopolares ou bipolares, ainda podem estar dispostos paralelamente no sentido vertical ou horizontal (TITCHOU *et al.*, 2021).

Um dos fatores de grande impacto no tratamento por EC é a geometria do reator, pois quando não bem projetada pode ocasionar a geração de zonas indesejada ao sistema, as conhecidas zonas mortas. Estas zonas caracterizam-se por regiões isoladas do reator que podem ocasionar a redução do tempo de residência e da eficiência do tratamento, além disto a geometria do reator costuma afetar o custo-benefício do processo e a facilidade de operação (KOBAYA *et al.*, 2020).

Da mesma forma que a geometria do reator, a disposição dos eletrodos no reator também afeta a eficiência de remoção dos contaminantes. Existem diversos arranjos de conexão entre ânodo e cátodo que podem ser utilizados, entre estes arranjos destacam-se os arranjos monopolares paralelamente (MP-P), os monopolares em série (MP-S) e os bipolares em série (BP-S) (ZAIED *et al.*, 2020). Conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1- Principais arranjos de eletrodos



Fonte: Adaptado de Zaied *et al.* (2020).

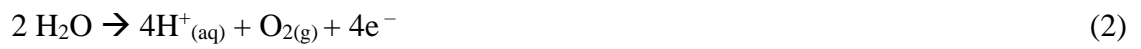
Além do material utilizado, do arranjo, a orientação dos eletrodos também pode afetar o sistema. Dessa forma, diversos estudos investigam a variação da orientação dos eletrodos e seus impactos na remoção de contaminantes. Nasrullah *et al.* (2018) investigaram o impacto destas variáveis para a remoção de contaminantes do efluente de fábrica de óleo de palma por EC. Os experimentos utilizaram eletrodos orientados na vertical e horizontal, arranjo MP-S, MP-P e BP-S, e placas de alumínio, ferro e palha de aço como material. O estudo mostrou que os melhores resultados foram atingidos utilizando orientação vertical, arranjo MP-S e material de alha de aço. Contudo, economicamente os arranjos MP-S apresentam um custo operacional maior quando comparado aos demais.

A distância entre eletrodos também pode afetar a eficiência de tratamento, o consumo de energia e o tempo de residência entre ânodo e cátodo para sistemas contínuos. Estudos mostram que o consumo de energia diminui proporcionalmente com a diminuição do intervalo entre os eletrodos, além disso com a redução dos espaços entre eletrodos mais bolhas de gás são geradas eletroquimicamente, aumentando a transferência de massa e taxa de reação entre espécies coagulantes e contaminantes (HAKIZIMANA *et al.*, 2017).

Os eletrodos utilizados tendem a passivar com o tempo, ou seja, tornam-se eletroquimicamente menos reativos, o que diminui a capacidade de remoção de contaminantes. Contudo, a passivação dos eletrodos pode ser controlada de algumas formas, as mais utilizadas são a alteração de polaridade do eletrodo no reator de EC, aeração ou aumento da turbulência, limpeza mecânica do eletrodo e uso de eletrodos com acabamento superficial rugoso (MOHORA *et al.*, 2018).

#### 2.4.1.5 Reações químicas no ânodo e no cátodo

Durante o processo de EC, para a geração de coagulantes *in situ*, diversos fenômenos físicos e químicos ocorrem como a dissolução anódica, redução catódica, floculação, flotação e adsorção. Para formar os flocos e promover a remoção dos poluentes, a corrente elétrica inserida provoca a dissolução dos íons metálicos e perda elétrons (Equação 1), paralelamente no ânodo ocorre a formação de microbolhas de oxigênio (O<sub>2</sub>) (Equação 2) pela eletrólise da água. Além disto, durante o processo o cátodo pode liberar gás hidrogênio e hidroxila pela eletrólise da H<sub>2</sub>O (Equação 3), o gás proporciona a flutuação dos flocos finos até a superfície, formando uma espécie de espuma. A liberação de hidroxilas ao meio na presença de íons metálicos permite a formação de hidróxidos metálicos, os quais atuam como agentes coagulantes (Equação 4) (LU *et al.*, 2022) (GRECCO; SOUZA; ZANONI, 2021).



Diferentes materiais são testados para o processo de EC, contudo este material necessita ser atóxico e ecologicamente corrente. Os materiais mais utilizados são Al e Fe, os quais quando utilizados como ânodo liberam Al<sup>3+</sup> e Fe<sup>3+</sup>, contudo disponibilidade de íons hidroxila, liberados no cátodo, em solução depende principalmente do pH. Cabe ressaltar que conforme apresentado na Tabela 4, ambos eletrodos podem sofrer oxidação e redução (ZAIED *et al.*, 2020).

Tabela 4 - Reações no ânodo e cátodo para eletrodos de Al e Fe

Uso de eletrodos de ferro	Uso de eletrodos de alumínio
Ânodo faz reação de oxidação:	O ânodo faz a reação de oxidação:
$Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$	$Al \rightarrow Al^{3+} + 3e^{-}$
$Fe \rightarrow Fe^{3+} + 3e^{-}$	O cátodo faz a reação de redução:
Cátodo faz reação de redução:	$3H_2O + 3e^{-} \rightarrow 1.5H_2 + 3OH^{-}$
$2H_2O + 2e^{-} \rightarrow H_2 + 2OH^{-}$	Então, durante a eletrólise, a reação geral ocorre da seguinte forma:
$3H_2O + 3e^{-} \rightarrow 1.5H_2 + 3OH^{-}$	$Al^{3+} + 3OH^{-} \rightarrow Al(OH)_3$
Então, durante a eletrólise, a reação geral ocorre da seguinte forma:	
$Fe^{2+} + 2OH^{-} \rightarrow Fe(OH)_2$	
$Fe^{3+} + 3OH^{-} \rightarrow Fe(OH)_3$	

Fonte: Zaiied *et al.* (2020).

Os mecanismos que envolvem a remoção de contaminantes pelo processo EC assemelham-se com os mecanismos utilizados na coagulação química convencional. Contudo, na EC devido a geração *in situ* do coagulante os resultados apresentam maior eficiência e menor produção de lodo. O lodo gerado durante a EC é considerado por muitos como ecologicamente correto e mais fácil de manusear, podendo ser reciclado como coagulante ou adsorvente, utilizado na produção de tijolos ou como combustível (BISWAS; GOEL, 2022).

## 2.5 LEGISLAÇÃO AMBIENTAL

No Brasil, as duas principais Resoluções acerca do lançamento de efluentes em corpos hídricos são as Resoluções de N° 357/2005 e N° 430/2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), estas dispõem sobre a classificação dos corpos hídricos e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelecem as condições e os padrões de lançamento de efluentes.

A Resolução CONAMA N° 357 (2005) em seu Art. 4° classifica os corpos hídricos de águas doces em cinco classes de qualidade baseadas em um conjunto de condições e padrões de qualidade de água necessários ao atendimento dos usos preponderantes, atuais ou futuros. No quadro 1 estão definidas as cinco classes de qualidade de água bem como seus principais usos.

Quadro 1 – Classes de qualidade de água e usos

<b>Classe</b>	<b>Usos permitidos</b>
Especial	Abastecimento para consumo humano, com desinfecção, preservação do equilíbrio natural das comunidades aquáticas e preservação dos ambientes aquáticos em unidades de conservação de proteção integral.
Classe 1	Abastecimento para consumo humano, após tratamento simplificado, proteção das comunidades aquáticas, recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA nº 274, de 2000, irrigação de hortaliças que são consumidas cruas e de frutas que se desenvolvam rentes ao solo e que sejam ingeridas cruas sem remoção de película e proteção das comunidades aquáticas em Terras Indígenas.
Classe 2	Abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional, proteção das comunidades aquáticas, recreação de contato primário, tais como natação, esqui aquático e mergulho, conforme Resolução CONAMA nº 274/2000, irrigação de hortaliças, plantas frutíferas e de parques, jardins, campos de esporte e lazer, com os quais o público possa vir a ter contato direto e aquicultura e à atividade de pesca.
Classe 3	Abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado, irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras, pesca amadora, recreação de contato secundário e dessedentação de animais.
Classe 4	Navegação e harmonia paisagística.

Fonte: Autora (2022).

Além de definir as classes de qualidade dos corpos hídricos a Resolução CONAMA N° 357 (2005) também define os padrões e valores máximos permitidos de lançamento de efluentes em cada uma dessas classes de forma a garantir a qualidade deste corpo hídrico receptor e minimizar o impacto ambiental causado pelo lançamento de efluentes.

A Resolução CONAMA N° 430 (2011), complementa a Resolução N° 357/2005 em diversos parâmetros não contemplados anteriormente, como diretrizes mínimas a serem

adotadas para os testes de toxicidade antes do lançamento do efluente. Além disto, esta resolução alterou diversos valores máximos permitidos (VMP) de lançamento de parâmetros físico-químicos e incluiu alguns parâmetros inorgânicos.

No estado do Rio Grande do Sul, o Conselho Estadual do Meio Ambiente – CONSEMA estabelece a Resolução N° 355/2017, dispõe sobre os critérios e padrões de emissão de efluentes líquidos para as fontes geradoras que lancem seus efluentes em águas superficiais no território do Estado.

De forma a garantir a qualidade do corpo hídrico receptor de acordo com o seu enquadramento e atender os padrões de lançamento de efluentes, observa-se a Tabela 5, na qual estão apresentados os principais VMP para lançamento de efluente em corpo hídrico de água doce Classe II e Classe III, conforme Resoluções N° 357/2005 e N° 430/2011 do CONAMA e Resolução N° 355/2017 do CONSEMA.

Tabela 5 – Valores máximos permitidos para lançamento de efluentes em corpo hídrico classe II e III

Parâmetro	Lançamento em corpo hídrico classe II			Lançamento em corpo hídrico classe III		
	Resolução Nº 357/2005	Resolução Nº 430/2011	Resolução Nº 355/2017	Resolução Nº 357/2005	Resolução Nº 430/2011	Resolução Nº 355/2017
Cor (mg Pt L <sup>-1</sup> )	≤ 75,0	≤ 75,0	VND	≤ 75,0	VND	VND
Carbono Orgânico Total (mg L <sup>-1</sup> )	5,0	VND	VND	10,0	VND	VND
DBO (mg L <sup>-1</sup> )	≤ 5,0	≤ 5,0	-	10,0	VND	*
DQO (mg L <sup>-1</sup> )	VND	VND	-	VND	VND	*
Fósforo total (mg L <sup>-1</sup> )	0,1	VND	-	0,15	VND	*
Nitrogênio total (mg L <sup>-1</sup> )	2,18	VND	VND	VND	VND	VND
Oxigênio Dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )	> 5,0	> 5,0	VND	> 4,0	VND	VND
Óleos minerais (mg L <sup>-1</sup> )	VND	≤ 20,0	≤ 10,0	VND	VND	≤ 10,0
Óleos vegetais e gorduras animais (mg L <sup>-1</sup> )	VND	≤ 50,0	≤ 30,0	VND	VND	≤ 30,0
pH	6,0 a 9,0	5,0 a 9,0	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0	5,0 a 9,0	6,0 a 9,0
Sólidos Dissolvidos Totais (mL L <sup>-1</sup> )	500,0	VND	VND	VND	VND	VND
Sólidos Sedimentáveis (mL L <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	VND	≤ 1,0	≤ 1,0	VND	VND	≤ 1,0
Sulfato total (mg L <sup>-1</sup> )	250	250	VND	250,0	250	VND
Surfactantes (mg L <sup>-1</sup> ) LAS	0,2	VND	-	0,5	VND	-
Temperatura (°C)	VND	< 40,0	< 40,0	VND	VND	< 40,0
Toxicidade Aguda- FTbl para Vibrio fischeri	VND	CECR ≤ CL50/10	VND	VND	CECR ≤ CL50/3	VND
Toxicidade Aguda- FTd para Daphnia magna	VND	VND	VND	VND	VND	VND
Toxicidade crônica-Ftd para Scenedesmus subspicatus	VND	CECR ≤ CENO	VND	VND	VND	VND
Turbidez (UNT)	≤ 100,0	VND	VND	≤ 100,0	VND	VND

Nota: (CECR) concentração do efluente no corpo receptor; (CENO) concentração de efeito não observado; (CL50) concentração letal mediana; (FTbl) fator de toxicidade para a bactéria luminescente; (FTd) fator de toxicidade para Daphnia magna; (VND) valor não definido; (UNT) unidade nefelométrica de turbidez; \* valores variam de acordo com a vazão de lançamento.

Fonte: Adaptado das Resoluções do Nº 357/2005 e Nº 430/2011 do CONAMA e Nº 070/2009 do CONSEMA.

Além dos valores apresentados, a Resolução CONSEMA N° 355 (2017) em seu artigo Art. 12 estabelece que não será permitido o lançamento, direta ou indiretamente, de efluentes líquidos que contenham quaisquer dos poluentes orgânicos persistentes listados, originários da manipulação ou descontaminação de passivos ambientais, incluindo remediação de áreas degradadas. Os poluentes listados incluem Aldrin, Bifenilas Policloradas (PCBs), Clordano (cis + trans), DDT (4,4'DDT+4,4'DDE+4,4'DDD), Dieldrin, Endrin, Heptacloro e Heptacloro epóxido, Hexaclorobenzeno, Mirex (Dodecacloro Pentaciclodecano) e Toxafeno.

Ainda, para o Estado do Rio Grande do Sul os valores máximos permitidos para lançamento de efluentes líquidos, exceto efluentes líquidos sanitários, os parâmetros DBO<sub>5</sub>, DQO, Sólidos Suspensos Totais (SST), Fósforo Total, Nitrogênio Amoniacal e Coliformes Termotolerantes devem atender aos valores de concentração estabelecidos ou a eficiência mínima fixada, conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Padrões de lançamento em função da vazão no Estado do Rio Grande do Sul

Faixa de vazão do efluente (m <sup>3</sup> /dia)	DBO <sub>5</sub> (mg L <sup>-1</sup> )	DQO (mg L <sup>-1</sup> )	SST (mg L <sup>-1</sup> )	Fósforo Total		Nitrogênio Amoniacal (mg L <sup>-1</sup> )
				mg L <sup>-1</sup>	Eficiência	
Q < 100	120	330	140	4	75%	20
100 ≤ Q < 500	110	330	125	3	75%	20
500 ≤ Q < 1000	80	300	100	3	75%	20
1000 ≤ Q < 3000	70	260	80	2	75%	20
3000 ≤ Q < 7000	60	200	70	2	75%	20
7000 ≤ Q < 10000	50	180	60	2	75%	20
10000 ≤ Q	40	150	50	1	75%	20

Fonte: Adaptado da Resolução CONSEMA n° 355/2017.

Na Tabela 7, são listados alguns VMP para metais em efluentes para o lançamento em corpo hídrico receptor de Classe II e III, de acordo com as Resoluções N° 357/2005 e N° 430/2011 do CONAMA e Resolução CONSEMA N° 355/2017.



Tabela 7 - VMP para lançamento de efluentes contendo metais em corpo hídrico classe II e III

Metais (mg L <sup>-1</sup> )	Lançamento em corpo hídrico classe II			Lançamento em corpo hídrico classe III		
	Resolução N° 357/2005	Resolução N° 430/2011	Resolução N° 355/2017	Resolução N° 357/2005	Resolução N° 430/2011	Resolução N° 355/2017
Alumínio dissolvido	0,1	VND	VND	0,2	VND	VND
Arsênio total	0,01	0,5	0,1	0,033	0,5	0,1
Ferro Dissolvido	0,3	15,0	VND	5,00	15,0	VND
Bário total	0,7	5,0	5,0	1,00	5,0	5,0
Chumbo Total	0,01	0,5	0,2	0,033	0,5	0,2
Cobre dissolvido	0,009	1	VND	0,013	1	VND
Cromo Total	0,05	VND	0,5	0,05	VND	0,5
Cobalto total	0,05	VND	0,5	0,2	VND	0,5
Manganês dissolvido	VND	1,0	1,0	VND	1,0	1,0
Níquel total	0,025	2,0	1,0	0,025	2,0	1,0
Selênio total	0,01	0,3	0,05	0,05	0,3	0,05
Vanádio total	0,1	VND	1	0,1	VND	1
Zinco total	0,18	5,00	2,00	5,00	5,00	2,00

Fonte: Adaptado das Resoluções do N° 357/2005 e N° 430/2011 do CONAMA e N° 070/2009 do CONSEMA.

Como evidenciado, apesar de não definir um valor máximo permitido para o Manganês dissolvido, a Resolução CONAMA N° 357/2005 define um valor para o Manganês total, sendo o máximo permitido  $0,1 \text{ mg L}^{-1} \text{ Mn}$ .

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste item estão contempladas informações quanto a caracterização do efluente de indústria cosmética, equipamentos e metodologias empregadas nos experimentos realizados para este estudo. As análises foram feitas no Laboratório de Águas e Ecotoxicologia da Universidade Federal da Fronteira Sul - *campus* Cerro Largo, Rio Grande do Sul, Brasil.

#### 3.1 EFLUENTE DA INDÚSTRIA COSMÉTICA

A coleta do efluente bruto, foi realizada em uma indústria cosmética, localizada na região Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul. O efluente é gerado durante o processo de fabricação de sabonetes líquidos, hidratantes, perfumes para roupas e ambientes e difusores/aromatizadores de ambientes. No total foram coletados cerca de 100 L de efluente a temperatura ambiente antes do ponto de equalização, dessa forma, o efluente em questão não passou por nenhum tipo de tratamento, nem ao menos remoção de óleos e graxas.

De acordo com a indústria que cedeu o efluente, os principais insumos utilizados na produção de sabonetes líquidos, hidratantes, perfumes para roupas e ambientes e difusores/aromatizadores de ambientes, são:

(a) Sabonetes Líquidos: Água Deionizada; Methylchloroisothiazolinone (Conservante); Lauril Éter Sulfato de Sódio 27% (Tensoativo Principal); Cocoamida propil betaína (Tensoativo); Amida 90 - Dietanolamida de Palmiste: (Emulsificante, Surfactante); Copolímero (Formador de Gel e Suspensor); Aminomethyl propanol (Agente Neutralizador); Glicerina (Umectante); Essência (Fragrância - podem ser veganas ou não); Rennex (Nonoxynol-9). Função: Emulsificante, Surfactante e solubilizante; Glitter (Decorativo, não é usado em todas as linhas).

(b) Hidratantes: Água deionizada; Álcool cetoestearílico, Álcool cetílico, Álcool cetoestearílico etoxilado (Emolientes, Surfactante); Manteiga de Karité (Cera Gordurosa); EDTA (Quelante); Triclosan (Conservante e Antimicrobiano, nome: 2,4,4,"-triclora-2" hidroxí difenil éter); Methylchloroisothiazolinone (Conservante); Phenoxyethanol (and) Caprylyl Glycol (Conservante); Glicerina (Umectante); Vaselina líquida (Emoliente); Essências (Fragrância); Vitamina E (Fortalecedor); Silicone PMX-1501 (Formador de Filme, Emoliente); Silicone VS 7158 (Emoliente); Aminomethyl propanol (Agente Neutralizador).

(c) Perfumes para roupas e ambientes: Álcool etílico 96°; Água Deionizada; Nonoxynol-9 (Função: Emulsificante, Surfactante e solubilizante); Essências (Fragrância); Propilenoglicol (umectante e solubilizante).

(d) Difusores/aromatizadores de ambientes: Álcool Etilico 96°; Essência (fragrância); Água Deionizada.

### 3.1.1 Caracterização físico-química do efluente

Para caracterização do efluente bruto da indústria cosmética analisou-se os parâmetros físico-químicos descritos na Tabela 8. As metodologias, procedimentos e equipamentos empregados para realização da caracterização estão descritas no *Standard Methods* (APHA, 2012).

Tabela 8 - Parâmetros físico-químicos analisados

Parâmetro	Unidade	Equipamento	Referência Metodológica
Condutividade	$\mu\text{S cm}^{-1}$	Condutímetro DM-32 (Digimed)	-
Cor	$\text{mg Pt L}^{-1}$	Colorímetro DM-COR (Digimed)	-
DQO	$\text{mg L}^{-1}$	Bloco Digestor DQO (PoliControl)	(APHA, 2012)
Ferro Total	$\text{mg L}^{-1}$	Sonda Multiparametro (Digimed)	-
Sólidos Sedimentáveis	$\text{mg L}^{-1}$	Cone Imhoff	(APHA, 2012)
pH	-	pHmetro mPA210 (MS TECNOPON)	-
Sólidos Totais	$\text{mg L}^{-1}$	-	(APHA, 1998)
Temperatura	$^{\circ}\text{C}$	-	-
Turbidez	UNT	Turbidímetro DM-TU (Digimed)	-

Nota: (APHA) *American Public Health Association*, 1998; Demanda Química de Oxigênio (DQO); Unidade de Turbidez (UNT).

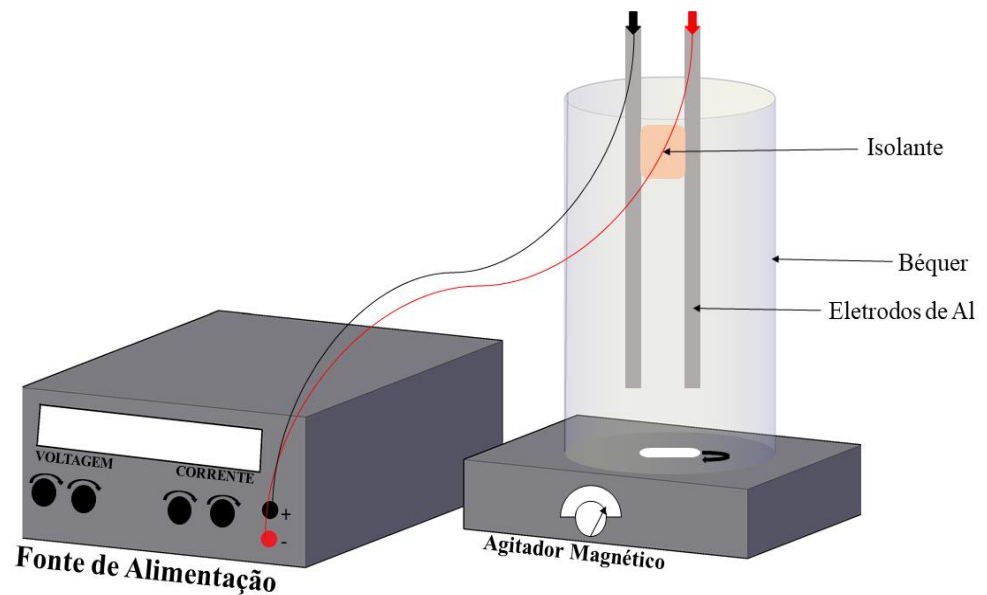
Fonte: Autora (2022).

Após a caracterização físico-química o efluente foi mantido em condições adequadas para que mantivesse suas características originais, mantendo homogeneidade no efluente para todos os testes realizados.

### 3.2 SISTEMA PILOTO

Para realização do procedimento da EC, utilizou-se um reator em escala laboratorial, mantido sob agitação e temperatura ambiente. O reator utilizado era composto por um béquer com capacidade para 1L de efluente e um par de eletrodos de Alumínio (Al) ligados a uma fonte de alimentação marca Laboratory Power Supply, modelo EA-PS 3016-20 B. O sistema foi mantido sob agitação (1800 rpm) através de um agitador magnético marca Centauro, modelo CAMA-15, conforme Figura 2.

Figura 2 - Representação esquemática do reator de eletrocoagulação utilizado



Fonte: Autora (2022).

### 3.2.1 Procedimento Experimental

Para que o processo não sofresse interferências fez-se necessário a realização de um tratamento preliminar de decantação para possibilitar condições favoráveis de aplicação da EC ao efluente estudado. O emprego do tratamento preliminar foi realizado pois o efluente não havia passado por nenhum tipo de remoção de óleos e graxas na indústria geradora do efluente.

O procedimento foi feito em um decantador de escala laboratorial confeccionado em vidro, com dimensões de 37 cm de comprimento por 12,5 cm de altura, com um comprimento de separação de 32 cm com um defletor com altura de 11,5 cm. O tempo de decantação foi 3 horas, após este período o efluente decantado foi coletado e posto em um funil de separação por mais 24 horas onde a camada de gordura foi separado do efluente, ao findar dessa etapa foram realizados os ensaios experimentais com o efluente. Ainda, em razão da condutividade inicial do efluente não ser suficiente para atingir a corrente elétrica pretendida, fixou-se a adição de uma concentração de 5 g L<sup>-1</sup> de cloreto de sódio (NaCl) para cada ensaio.

O sistema manteve-se operando em fluxo batelada com um volume para tratamento estabelecido em 1L para cada ensaio experimental. Os eletrodos de Al utilizados apresentam uma área ativa submersa de 25 cm<sup>2</sup> de cada eletrodo e foram mantidos isolados eletricamente a uma distância de 1cm. O tempo de estabilização da solução para posterior coleta e análise foi fixado em 1 hora. Após o tempo de estabilização da solução, foram feitas análises dos parâmetros DQO, turbidez e cor aparente em cada ensaio.

### 3.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Para o planejamento experimental foi utilizado um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) (RODRIGUES; LEMMA, 2009), para tal foram avaliadas duas variáveis independentes: corrente elétrica (i) e tempo de tratamento (t). Realizou-se um planejamento fatorial completo 2<sup>2</sup>, incluindo 4 pontos 4 axiais e 4 repetições do ponto central, totalizando 12 ensaios.

A eficiência da EC baseou-se na remoção dos parâmetros DQO, turbidez e cor aparente. Conforme Equação 5, tem-se o modelo geral para remoção dos 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 variáveis codificadas e  $\beta_0$ ,  $\beta_i$ ,  $\beta_{ii}$  e  $\beta_{ij}$  são os parâmetros do modelo de regressão e  $\varepsilon$  representa o erro experimental. No Quadro 2 está representada a matriz do delineamento experimental.

Quadro 2 – Matriz do delineamento experimental

	Ensaio	$X_1$	$i(A)$	$X_2$	$t(\text{min})$
<b>Pontos Fatoriais</b>	1	1	1,5	1	15
	2	1	1,5	-1	5
	3	-1	0,5	1	15
	4	-1	0,5	-1	5
<b>Pontos Centrais</b>	5	0	1	0	10
	6	0	1	0	10
	7	0	1	0	10
	8	0	1	0	10
<b>Pontos Axiais</b>	9	1,41	1,71	0	10
	10	-1,41	0,29	0	10
	11	0	1	1,41	17,05
	12	0	1	-1,41	2,95

Fonte: Autora (2022).

Salienta-se que para a definição dos valores das variáveis independentes foram realizados testes preliminares com o efluente da indústria cosmética. Os valores das variáveis codificadas são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Valores estudados para as variáveis independentes

Variável Independente	Código	-1,41	-1	0	1	1,41
$i(A)$	$X_1$	0,29	0,5	1	1,5	1,71
$t(\text{min})$	$X_2$	2,95	5	10	15	17,05

Fonte: Autora (2022).

### 3.4 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Todos os resultados obtidos foram submetidos à análise estatística com utilização do software Microsoft Excel 2021 e o programa *Statistica*® 11. Para o DCCR a Análise de Variância (ANOVA) a 95% de confiança ( $p\text{-valor} < 0,05$ ) foi realizada e os modelos foram

gerados, a fim de verificar a convergência entre os resultados obtidos e os estimados pelos modelos.

Para os resultados obtidos nos parâmetros físico-químicos avaliados, foi aplicado o método de Desejabilidade Global e o sistema de EC foi otimizado para operar nas melhores condições. Este método permite a determinação simultânea do desempenho ideal de cada variável independente avaliada para múltiplas respostas.

De acordo com Derringer e Suich (1980), no processo de definição das condições ótimas individuais para as variáveis respostas resposta ( $Y_i$ ), por meio da desejabilidade global  $d_i(y_i)$  dentro dos limites desejáveis, existe uma função onde atribui-se números entre 0 e 1 aos valores possíveis de  $Y_i$ , com  $d_i(y_i) = 0$ , representando um valor desejável e ideal  $d_i(y_i) = 1$ .



## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Neste item encontram-se os resultados e discussões obtidos para a caracterização do efluente bruto e análise estatística dos experimentos realizados, visando obter as condições otimizadas de tratamento por EC, com a utilização do eletrodo de Al.

### **4.1 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE COSMÉTICO SEM TRATAMENTO**

Com base na análise dos parâmetros físico-químicos do efluente de indústria cosmética bruto, foi possível verificar o atendimento dos parâmetros analisados frente aos valores máximos permitidos nas legislações vigentes para lançamento em corpo hídrico receptor Classes II e III. Na Tabela 10 encontram-se apresentadas informações acerca da caracterização físico-química do efluente cosmético bruto, bem como a análise ao atendimento da legislação vigente.

Tabela 10 - Caracterização físico-química do efluente cosmético sem tratamento

Parâmetro	Efluente Bruto	Lançamento em corpo hídrico classe II			Lançamento em corpo hídrico classe III		
		Resolução N° 357/2005	Resolução N° 430/2011	CONSEMA N° 355/2017	Resolução N° 357/2005	Resolução N° 430/2011	CONSEMA N° 355/2017
Cor (mg Pt L <sup>-1</sup> )	825,45 ± 9,67	VND	VND	VND	VND	VND	VND
Ferro Total (mgL <sup>-1</sup> )	78,25 ± 16,13	VND	VND	10,00	VND	VND	10,00
pH	10,22	6,0 a 9,0	5,0 a 9,0	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0	5,0 a 9,0	6,0 a 9,0
Temperatura (°C)	22,4 ± 0,05	VND	< 40,0	< 40,0	VND	VND	< 40,0
Turbidez (UNT)	11290,05 ± 9,67	≤ 100,0	VND	VND	≤ 100,0	VND	VND
DQO (mg L <sup>-1</sup> )	59444,66 ± 645,16	VND	VND	-	VND	VND	-
Sólidos Totais (mL L <sup>-1</sup> )	3120 ± 0,00	VND	VND	VND	VND	VND	VND
Sólidos Sedimentáveis (mL L <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	00,00 ± 0,00	VND	≤ 1,0	≤ 1,0	VND	VND	≤ 1,0
Condutividade (μS/cm)	374,93 ± 0,00	VND	VND	VND	VND	VND	VND

Fonte: Autora (2023).

Como pode ser observado na Tabela 10, diversos parâmetros analisados encontram-se em inconformidade com os VMP estabelecidos pelas Resoluções CONAMA N° 357/2005, CONAMA N° 430/2011 e CONSEMA N° 355/2017 para lançamento de efluente em corpo hídrico receptor Classes II e III. A discrepância dos parâmetros analisados com a legislação salienta a necessidade de tratamento antes do lançamento em corpo hídrico receptor, a fim de atender a legislação e minimizar os impactos ambientais negativos.

Para lançamento de efluentes provenientes da indústria, em corpo hídrico Classes II e III, a Resolução CONSEMA N° 355/2017, estipula um valor de  $300 \text{ mg L}^{-1}$  de DQO para vazões inferiores a  $100 \text{ m}^3 \text{ dia}^{-1}$ , estando o efluente analisado em total inconformidade para lançamento em corpo hídrico sem antes a realização de um tratamento.

As altas concentrações de matéria orgânica em efluentes de indústria cosmética estão relacionadas com as linhas de produção e os insumos utilizados. Comumente grandes quantidades de óleos e graxas são empregadas nas formulações dos produtos, especialmente aqueles com base líquida. Estes insumos em seu processo de decomposição possuem a característica de reduzir a quantidade de oxigênio dissolvido no meio, aumento a DBO e a DQO, causando alterações negativas nos ecossistemas aquáticos quando não submetidos a tratamento antes do lançamento (HENTZ, 2018).

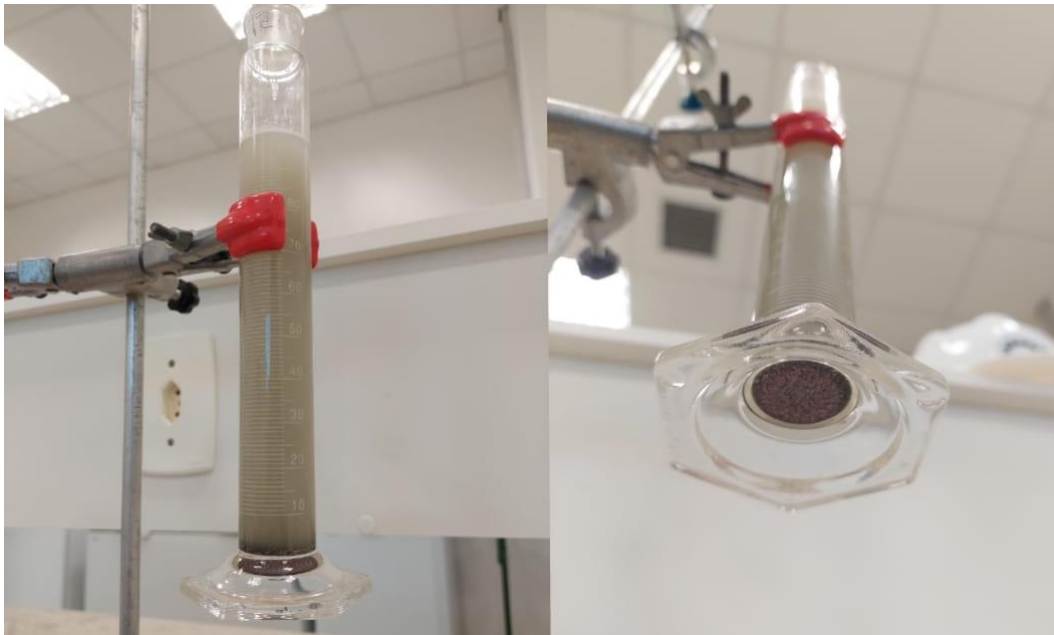
De acordo com Lima, Melo e Aguiar (2022), os valores médios para DQO relatados para efluentes brutos da indústria cosmética situam-se entre  $901\text{--}36.000 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ . Para o efluente analisado a DQO encontrada foi de  $59.444,66 \pm 645,16 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$ , estando acima dos valores médios comumente relatados. Em um estudo realizado por Andrade *et al.* (2020) relatou-se uma DQO de  $49.300,36 \pm 759,46 \text{ mg O}_2 \text{ L}^{-1}$  para o efluente bruto de indústria cosmética, devido a elevada concentração de matéria orgânica para que o estudo atingisse a eficiência desejada através da tecnologia de tratamento heterogêneo foto Fenton-Like foi necessário a adição de químicos como pré-tratamento.

Ainda quanto a caracterização físico-química do efluente bruto, as Resoluções CONAMA N° 357/2005, CONAMA N° 430/2011 e CONSEMA N° 355/2017 não estipulam uma concentração máxima de sólidos totais para lançamento em corpo hídrico receptor Classes II e III, entretanto a análise do parâmetro é extremamente importante visto que efluentes de indústria cosmética costumam possuir grandes concentrações de sólidos. Essa concentração elevada se dá pela produção de cosméticos fazer uso de grandes quantidades de corantes, os quais ficam emulsificados na base líquida, e podem ser removidos através de um sistema preliminar (SCHNEIDER, 2022).

Ainda segundo o autor, o tratamento preliminar é importante para que a eficiência desejada seja atingida no tratamento final de qualquer tipo de efluente, em razão desse processo ter como finalidade remover sólidos grosseiros, gorduras, óleos e outros materiais flutuantes preparando o efluente para o tratamento, evitando interferências. Os principais processos utilizados no tratamento preliminar envolvem gradeamento, caixa de areia e caixa separadora de água e óleo.

O efluente estudado não passou por nenhum tipo de tratamento preliminar na indústria geradora, exigindo que este fosse simulado em laboratório antes da realização dos testes. Assim, conforme observa-se na Figura 3, é possível perceber grande quantidade de sólidos retidos após o processo de decantação realizado, dos quais a maior porção era composta por glitters incorporados aos produtos durante o processo de fabricação.

Figura 3 - Volume de sólidos decantado no tratamento preliminar



Fonte: Autora (2023).

Em um estudo realizado por Tones *et al.* (2020) relatou-se uma concentração de sólidos totais de aproximadamente  $1.574,00 \text{ mg L}^{-1}$  para o efluente bruto da indústria cosmética, para este estudo, com base na caracterização, identificou-se uma concentração de sólidos totais de  $3.120,00 \text{ mg L}^{-1}$  para o efluente da indústria cosmética sem tratamento, estando dessa forma acima dos valores comumente relatados na literatura. Além de causar interferências durante o tratamento do efluente, elevadas concentrações de sólidos costumam afetar a turbidez. De acordo com Lima, Melo e Aguiar (2022), os valores médios para turbidez relatados para

efluentes brutos da indústria cosmética situam-se entre 25,5 – 11.420 UNT, essa variação depende da remoção de sólidos no tratamento preliminar. Para o efluente analisado o valor encontrado é de  $11290,05 \pm 9,67$  UNT. A Resolução CONAMA N° 357/2005 estipula um valor máximo de turbidez permitido para o lançamento de efluente em corpo hídrico receptor menor ou igual a 100 UNT, estando o efluente analisado cerca de 11 mil vezes acima do valor máximo permitido.

A Resolução do CONSEMA N° 355/2017 estabelece que efluentes líquidos de fontes poluidoras podem ser lançados em corpos d'água superficiais somente se a cor verdadeira não conferir mudança de coloração ao corpo hídrico receptor. Por se tratar de um efluente com alta turbidez, na caracterização do efluente bruto foi obtido apenas a cor aparente, a qual foi de  $825,45 \pm 9,67$  mg Pt L<sup>-1</sup>, estando acima do valor estipulado pela Resolução do CONAMA N° 357 que é de 75 mg Pt L<sup>-1</sup>, o valor elevado tem relação direta com a concentração de sólidos totais.

Concentrações elevadas de ferro na água podem promover alguns inconvenientes, como: alteração no odor e sabor da água, aparecimento de incrustações e de bactérias ferruginosas no sistema de distribuição e interferência em processos industriais. Apesar de não existir relatos de danos à saúde humana, elevadas concentrações de ferro podem afetar os ecossistemas aquáticos (APOLINARIO *et al.*, 2018).

Para a concentração de ferro total não existe nenhum valor estipulado para as Resoluções CONAMA N° 357/2005 e CONAMA N° 430/2011, entretanto a Resolução CONSEMA N° 355/2017 estipula um valor máximo permitido de 10,00 mg L<sup>-1</sup> para lançamento em corpo hídrico receptor Classes II e III. Para o efluente analisado a concentração de ferro total é de  $78,25 \pm 16,13$  mg L<sup>-1</sup>, estando cerca de sete vezes acima do valor máximo permitido pela legislação.

Outro parâmetro relevante para análise dos impactos do lançamento de efluente em corpo hídrico receptor é a toxicidade, em geral, os efluentes da indústria cosmética costumam apresentar grandes concentrações de surfactantes, triclosan e parabenos, estes são poluentes que contribuem para os altos níveis de toxicidade do efluente da indústria cosmética. Os altos níveis de toxicidade não representam risco apenas aos corpos hídricos, mas também aos sistemas de tratamento biológico de efluentes, uma vez que os diversos compostos presentes no efluente são tóxicos para os microrganismos e inviabilizam a aplicação do tratamento. Dessa forma, é necessário a aplicação de tecnologias eficientes a redução dos contaminantes neste efluente para minimização dos impactos ambientais (BILAL; MEHMOOD; IQBAL, 2020).

#### 4.2 EFICIÊNCIA DA EC NA REMOÇÃO DAS VARIÁVEIS DEPENDENTES

Para verificar a eficiência do tratamento na remoção dos parâmetros avaliados, calculou-se as porcentagens médias de remoção para as variáveis dependentes (cor, turbidez e DQO) para cada ensaio proposto no planejamento experimental, os resultados podem ser observados na Tabela 11.

Tabela 11- Resultados da remoção média (%) dos parâmetros analisados após o tratamento por EC

Ensaio	I(A)	t(min)	Cor Aparente (Pt-Cor)	% remoção de cor aparente	Turbidez (UNT)	% remoção de turbidez	DQO (mg L <sup>-1</sup> )	% redução de DQO
<b>BRUTO</b>			<b>825,45 ± 9,67</b>	0,00	<b>11290,5 ± 9,67</b>	0,00	<b>59444,66 ± 645,16</b>	0
1	1,5	15	127,27 ± 15,02	84,58	808,67 ± 15,37	92,84	59423,18 ± 0,007	0,036
2	1,5	5	219,33 ± 1,79	73,43	3373,33 ± 3,06	70,12	59444,08 ± 0,028	0,001
3	0,5	15	446,00 ± 3,36	45,97	5166,67 ± 4,04	54,24	59437,11 ± 0,016	0,013
4	0,5	5	266,17 ± 2,91	67,75	4643,33 ± 1,53	58,87	59436,53 ± 0,007	0,014
5	1	10	90,33 ± 2,93	89,06	1344,67 ± 4,51	88,09	59444,08 ± 0,044	0,001
6	1	10	111,13 ± 4,10	86,54	1764,00 ± 9,54	84,38	59439,44 ± 0,013	0,009
7	1	10	86,40 ± 1,65	89,53	1200,00 ± 4,36	89,37	59438,86 ± 0,014	0,010
8	1	10	103,93 ± 27,25	87,41	1967,33 ± 16,29	82,58	59441,18 ± 0,027	0,006
9	1,71	10	398,33 ± 16,54	51,74	5336,67 ± 2,89	52,73	59443,50 ± 0,003	0,002
10	0,29	10	515,00 ± 4,50	37,61	4600,00 ± 5,57	59,26	59434,21 ± 0,020	0,018
11	1	17,05	496,33 ± 2,40	39,87	6333,33 ± 2,89	43,91	59438,86 ± 0,027	0,010
12	1	2,95	632,00 ± 2,26	23,44	7796,67 ± 10,60	30,94	59441,18 ± 0,024	0,006

Fonte: Autora (2023).

Como observado na Tabela 11, não ocorreu nenhuma redução significativa de DQO nos ensaios propostos. Esse resultado insatisfatório é decorrente das características físico-química do efluente estudado, o qual apresentou grande concentração de óleos e graxas fato este observado por não ser submetido a nenhum tipo de tratamento preliminar logo após o processo de geração na indústria.

Ainda de acordo com os resultados da Tabela 11, para os parâmetros cor e turbidez, verifica-se que em todos os ensaios ocorreram remoções. O maior percentual de remoção de turbidez (92,84%) pode ser observado no ensaio 1, tratado sob condições operacionais de intensidade de corrente de 1,5 A e tempo de tratamento de 15 minutos, para esta condição operacional a remoção de cor foi de 84,58%. Já o maior percentual de remoção de cor (89,53%) foi observada para a condição operacional de 1 A e 10 minutos de tratamento, na qual a remoção de turbidez foi de 89,37%.

Resultados inferiores para a remoção de cor e turbidez puderam ser observados no ensaio 12, no qual o sistema operou sob uma intensidade de corrente elétrica de 1 A e 2,95 minutos de tratamento, obtendo para esta condição operacional uma remoção de cor de 23,44% e uma remoção de turbidez de 30,94%.

Observou-se com este estudo que apesar dos ensaios realizados apresentarem elevadas porcentagens de remoção de cor e turbidez, eles não atendem ao estabelecido pelas legislações vigentes para lançamento de efluente em corpo hídrico receptor Classes II e III. Conforme estabelecido na Resolução CONAMA N° 357/2005, para lançamento de efluente em corpo hídrico receptor Classes II e III, a turbidez deve  $\leq 100$  UNT, para a maior remoção de turbidez o valor atingido foi de 808,67 UNT, estando incompatível com a legislação para lançamento em corpo hídrico receptor. Ainda, para lançamento de efluente em corpo hídrico receptor Classes II e III, as Resoluções CONAMA N° 357/2005 e N° 430/2011 estabelecem um valor máximo permitido de cor de 75,00 mg Pt L<sup>-1</sup>, para a maior remoção de cor o resultado foi de 86,40 mg Pt L<sup>-1</sup>, estando incompatível com a legislação.

A divergência do efluente com a legislação CONAMA N° 357/2005 quanto aos valores máximos permitidos de cor e turbidez para lançamento de efluente em corpo hídrico receptor, mesmo após a realização do tratamento, é reflexo das elevadas concentrações de sólidos presentes no efluente que elevam estes parâmetros, conforme identificado na caracterização físico-química.

Em um estudo desenvolvido por Akarsu *et al.* (2022), investigou-se a eficiência do tratamento integrado de filtração por membrana e eletrocoagulação para tratamento de águas residuais cosméticas. Os parâmetros operacionais otimizados foram: pH 4, densidade de



corrente de  $50 \text{ A m}^{-2}$  e duração de 180 minutos de tratamento para a EC com o uso de eletrodos de aço, o sistema foi acoplado com osmose reversa. Para tais condições o sistema apresentou 99,18% de eficiência de remoção de DQO, além de diminuir a concentração de microplásticos de  $1030 \text{ partículas L}^{-1}$  para uma concentração final de  $80 \text{ partículas L}^{-1}$ .

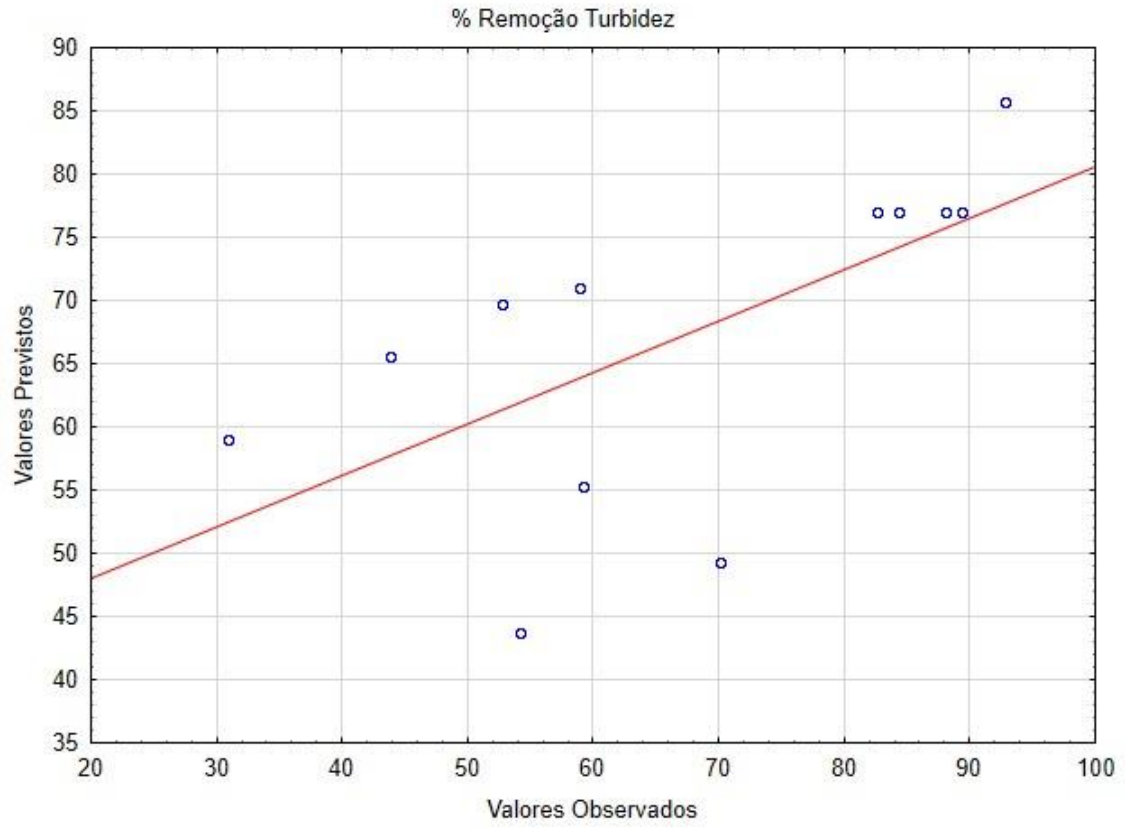
Nesse sentido, entende-se que, apesar da alta eficiência algumas condições podem interferir na eficiência da EC. Dessa forma, a utilização de tecnologias integradas torna-se uma alternativa para efluentes sem tratamentos preliminares ou que apresentem concentrações muito elevadas de poluentes.

#### 4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DO DELINEAMENTO COMPOSTO CENTRAL ROTACIONAL

Após a realização do tratamento do efluente cosmético por EC foram realizadas as análises de cor, turbidez e DQO e os resultados foram avaliados por meio de gráficos de dispersão, gráficos de Pareto, análises de variância (ANOVA) e a desejabilidade global foi aplicada para a EC otimizada, para as condições propostas neste estudo. Ressalta-se que apesar de realizadas análises em laboratório os resultados obtidos para redução de DQO não foram considerados para otimização deste modelo, pois os mesmos não foram significativos nas condições operacionais propostas para o efluente analisado.

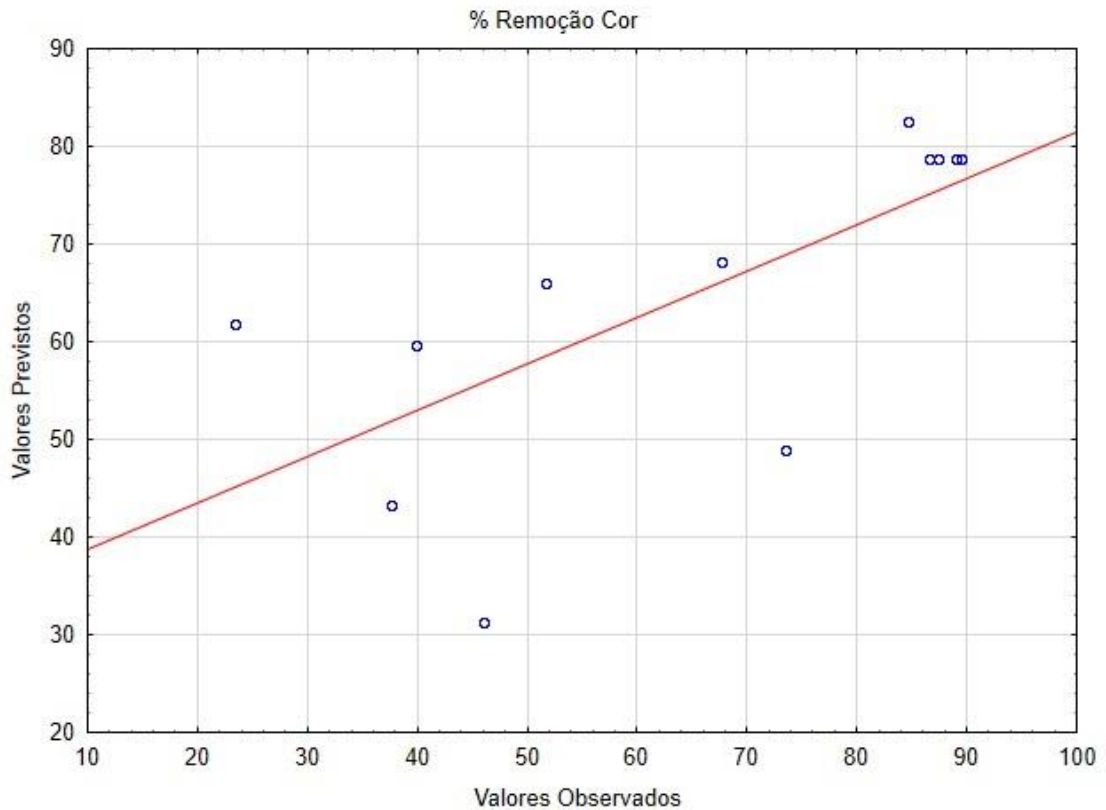
Nos Gráficos 1 e 2 é possível observar o comportamento dos valores observados e sua relação com os valores previstos para remoção das variáveis respostas turbidez e cor, respectivamente.

Gráfico 1 - Correlação entre os valores observados e previstos para a variável resposta turbidez



Fonte: Autora (2023).

Gráfico 2 - Correlação entre os valores observados e previstos para a variável resposta cor



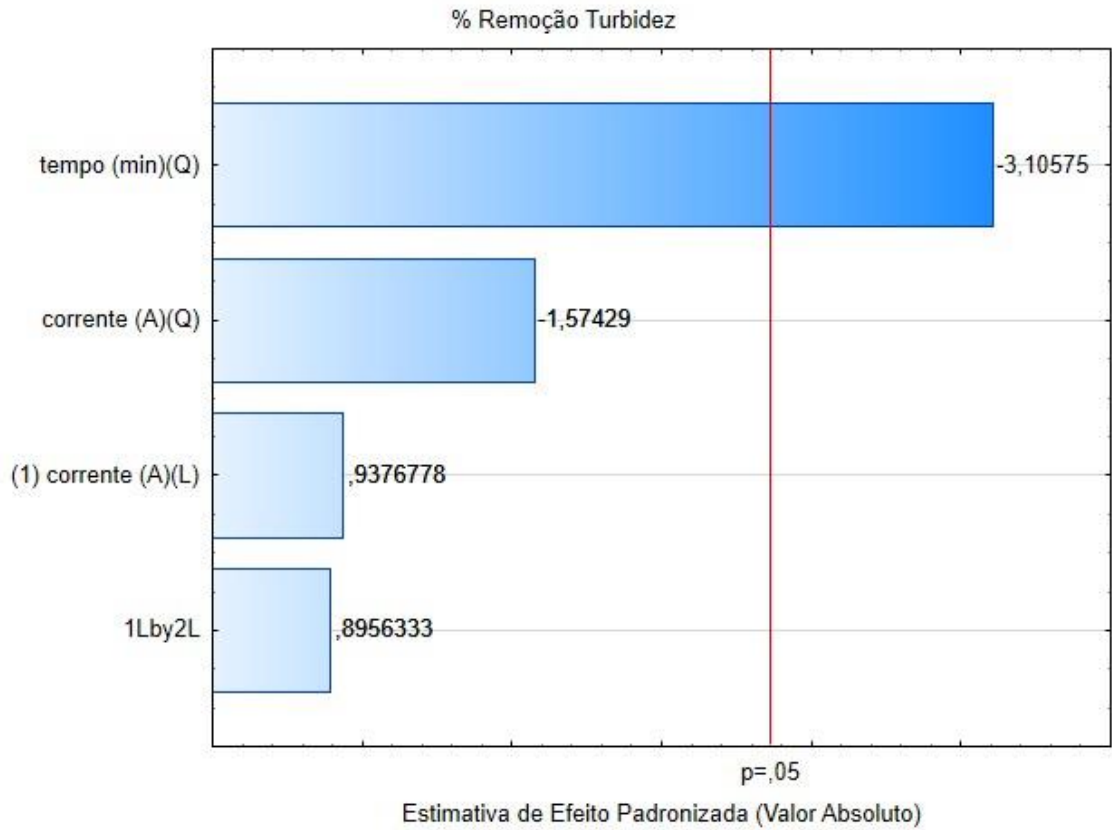
Fonte: Autora (2023).

A dispersão está diretamente relacionada com a correlação entre os resultados previstos e os resultados experimentais realizados. Para ambas variáveis analisadas, os valores observados nos experimentos mostram pouca dispersão em relação aos valores previstos pelo modelo matemático, ou seja, indícios de um bom ajuste do modelo para os dados experimentais avaliados.

Com o propósito de validar e otimizar o modelo proposto através dos resultados obtidos nos ensaios experimentais, realizou-se uma ANOVA a partir dos valores previstos para remoção de cor e turbidez.

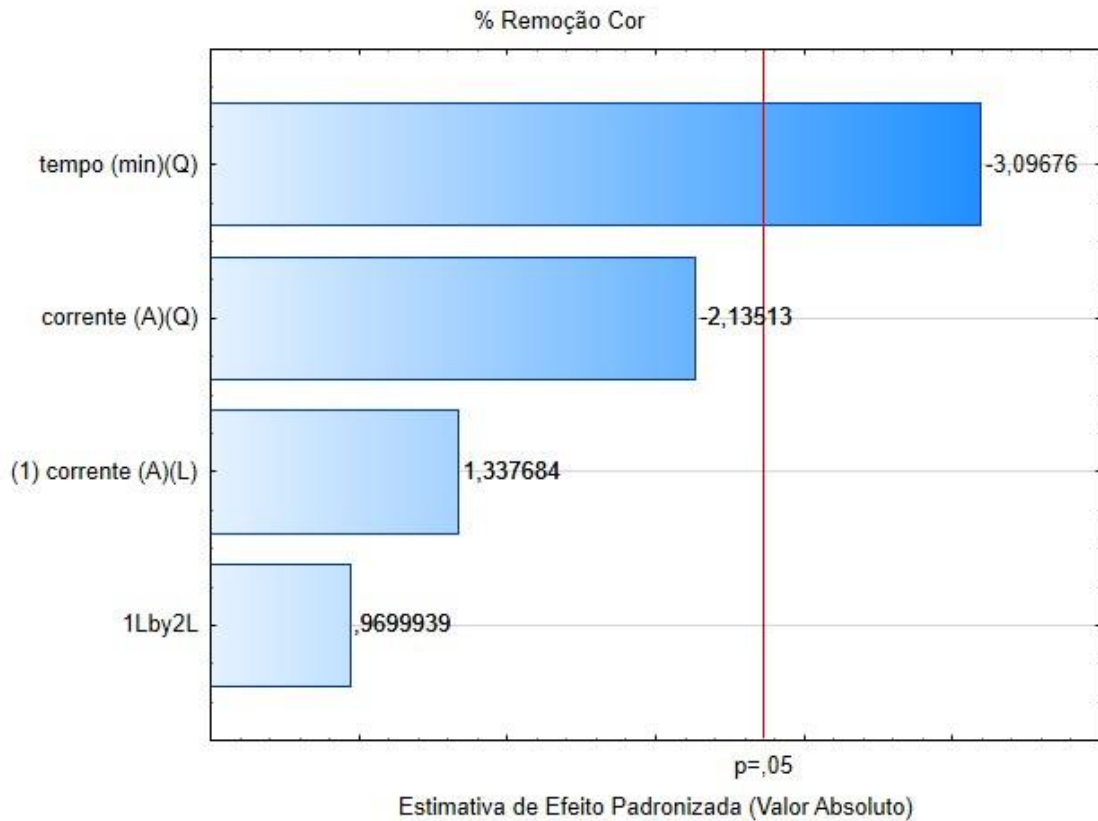
O efeito das variáveis independentes X1 (corrente elétrica) e X2 (tempo) podem ser observados através do gráfico de Pareto, ilustrados nos Gráficos 3 e 4, com as respectivas remoções de turbidez e cor. A análise do gráfico de Pareto permitiu identificar quais os parâmetros e suas interações tem influências significativas sobre as variáveis respostas, com 95 % de confiança ( $p > 0,05$ ), representado pela linha vermelha.

Gráfico 3- Efeito das variáveis independentes sobre a remoção de turbidez a 95% de confiança ( $p < 0,05$ )



Fonte: Autora (2023).

Gráfico 4 - Efeito das variáveis independentes sobre a remoção de cor a 95% de confiança ( $p < 0,05$ )



Os efeitos das variáveis lineares (L), quadráticas (Q) e da interação linear entre as variáveis independentes são observados nas barras horizontais, onde a grandeza indicada ao lado representa o efeito da variável sobre os efeitos de remoção do parâmetro avaliado, o sinal positivo aponta um aumento na remoção e os valores negativos demonstram redução na remoção.

Dessa forma, para ambos os parâmetros avaliados nos Gráficos 3 e 4, foi possível identificar uma significância em termos quadráticos do tempo no intervalo de 95% de confiança para remoção de cor e turbidez. Assim, os resultados indicam que a diminuição do tempo contribui para o aumento da remoção de turbidez e cor. Tal fato é evidenciado no comparativo entre os ensaios 11 e 12, onde ambos operavam com intensidade de corrente 1 A com variações de tempo de 17,05 minutos e 2,95 minutos, respectivamente.

Em ambos os ensaios supracitados as porcentagens de remoção foram baixas, entretanto, foi possível observar a tendência de remoção da cor e turbidez nos primeiros minutos de

tratamento. Para o ensaio 11 as taxas de remoção de turbidez e cor foram de 43,91% e 39,87%, respectivamente, já o ensaio 12 as taxas de remoção foram de 30,94% para turbidez e 23,44% para cor em apenas 2,95 minutos de tratamento, evidenciando que um tempo maior de tratamento não contribui para maiores taxas de remoção dos parâmetros. Os resultados obtidos na ANOVA, podem ser observados na Tabela 12.

Tabela 12 – Teste da análise de variância do modelo previsto para a remoção de turbidez e cor pelo tratamento de EC 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
Cor	Regressão	6.254,933	4	1563,733	5,427/4,120	0,026
	Resíduos	2.016,896	7	288,128		
	Total	8.271,829	11			
Turbidez	Regressão	4.492,448	4	1123,112	4,818/4,120	0,034
	Resíduos	1.631,895	7	233,128		
	Total	6.124,344	11			

Fonte: Autora (2023).

Conforme Tabela 12, observa-se que o p-valor de ambas as variáveis independentes se mostram estatisticamente significativas a 95% ( $p < 0,05$ ), para as duas variáveis respostas, turbidez e cor. O coeficiente de correlação (R) obtidos para os modelos foram R: 0,64 para turbidez e R: 0,67 para cor.

Os resultados da ANOVA podem ser considerados de maior significância quando as variáveis indicarem um valor de  $F_{calculado} > F_{tabelado}$  e um  $p\text{-valor} < 0,05$ , dessa forma para o modelo estudado as variáveis são significativas a um nível de confiança de 95%, visto que quanto mais próximo de 1 for o valor de R melhor a predição do modelo estudado (ALAM; BARI; KAWSARI, 2022).

Estudos mostram que uma regressão não deve ser apenas significativa, mas também útil para fins preditivos. Box, Hunter e Hunter (1978) exprimem que para que uma regressão atenda fins preditivos a relação de  $F_{calculado}/F_{tabelado}$  deve ser superior a três. Por outro lado, outros autores (ALAM; BARI; KAWSARI, 2022) (ADAMOVIĆ *et al.*, 2019) afirmam que o modelo de regressão já atende fins preditivos adequadamente se o valor de  $F_{calculado} > F_{tabelado}$  e o  $p\text{-valor} < 0,05$ , confirmando que o modelo encontrado neste estudo é significativo e preditivo.

Tais resultados podem ser observados nos Gráficos 5 e 7 de superfície de resposta e perfil de contorno para a desejabilidade global (Gráficos 6 e 8) dos ensaios experimentais. Os

gráficos expressam o comportamento da porcentagem de remoção para cada variável resposta de acordo com o comportamento das variáveis independentes.

Gráfico 5 – Superfície de resposta em relação à remoção da turbidez

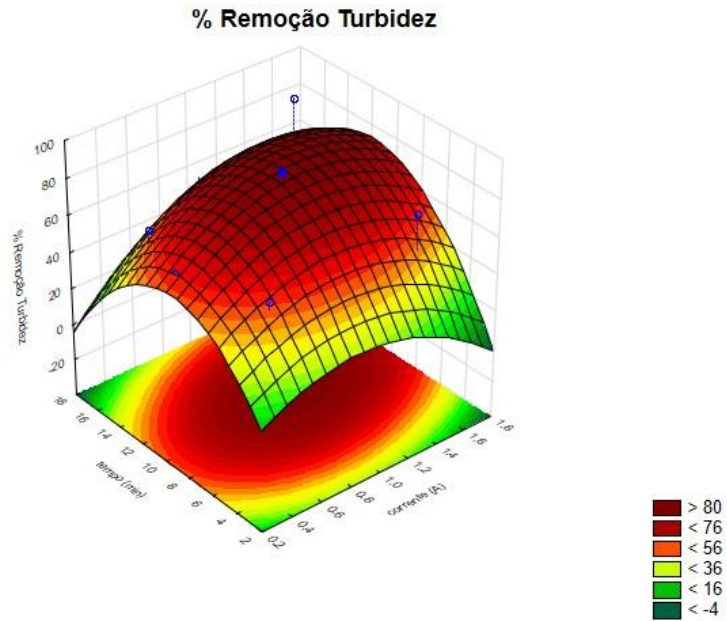


Gráfico 6 –Perfil de contorno em relação à remoção da turbidez

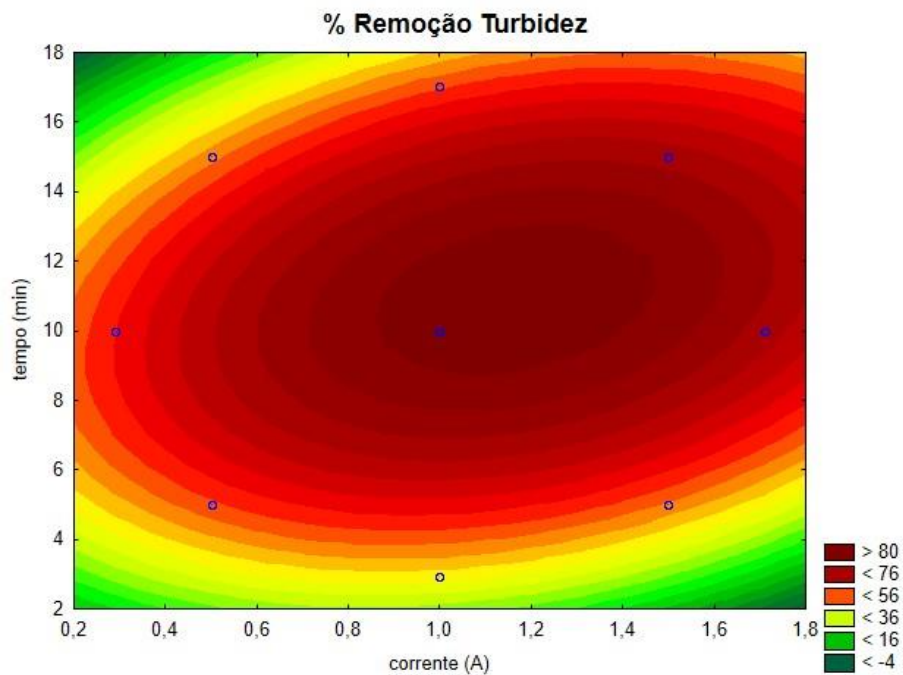


Gráfico 7– Superfície de resposta em relação à remoção da cor

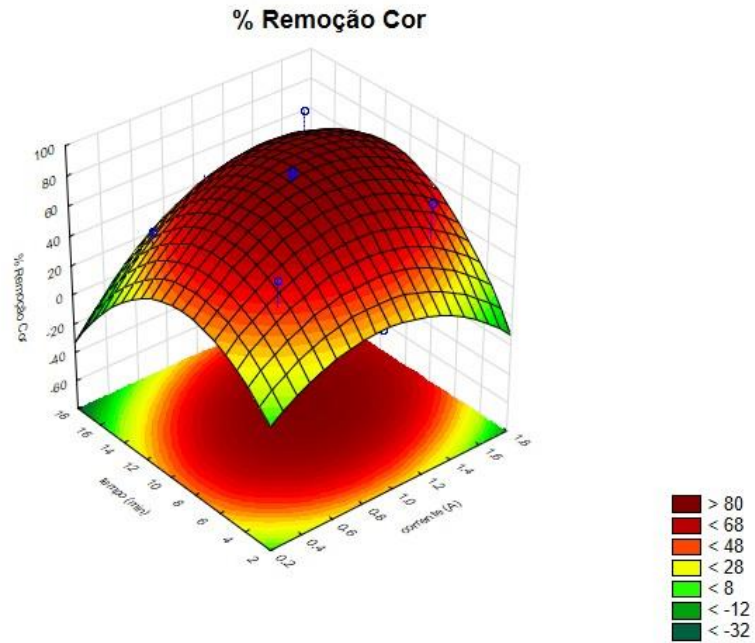
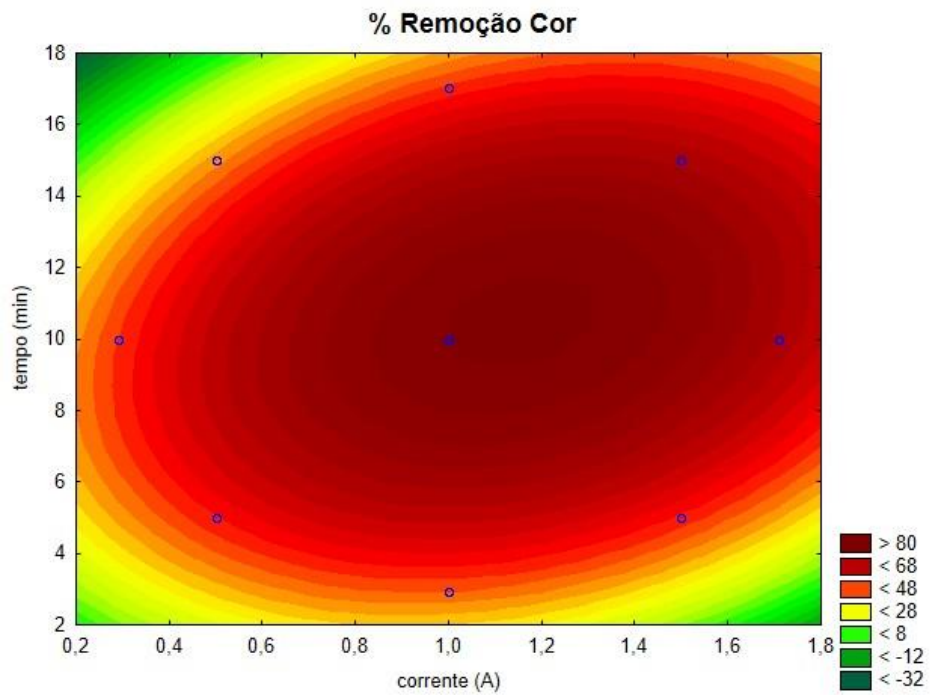


Gráfico 8 –Perfil de contorno em relação à remoção da cor



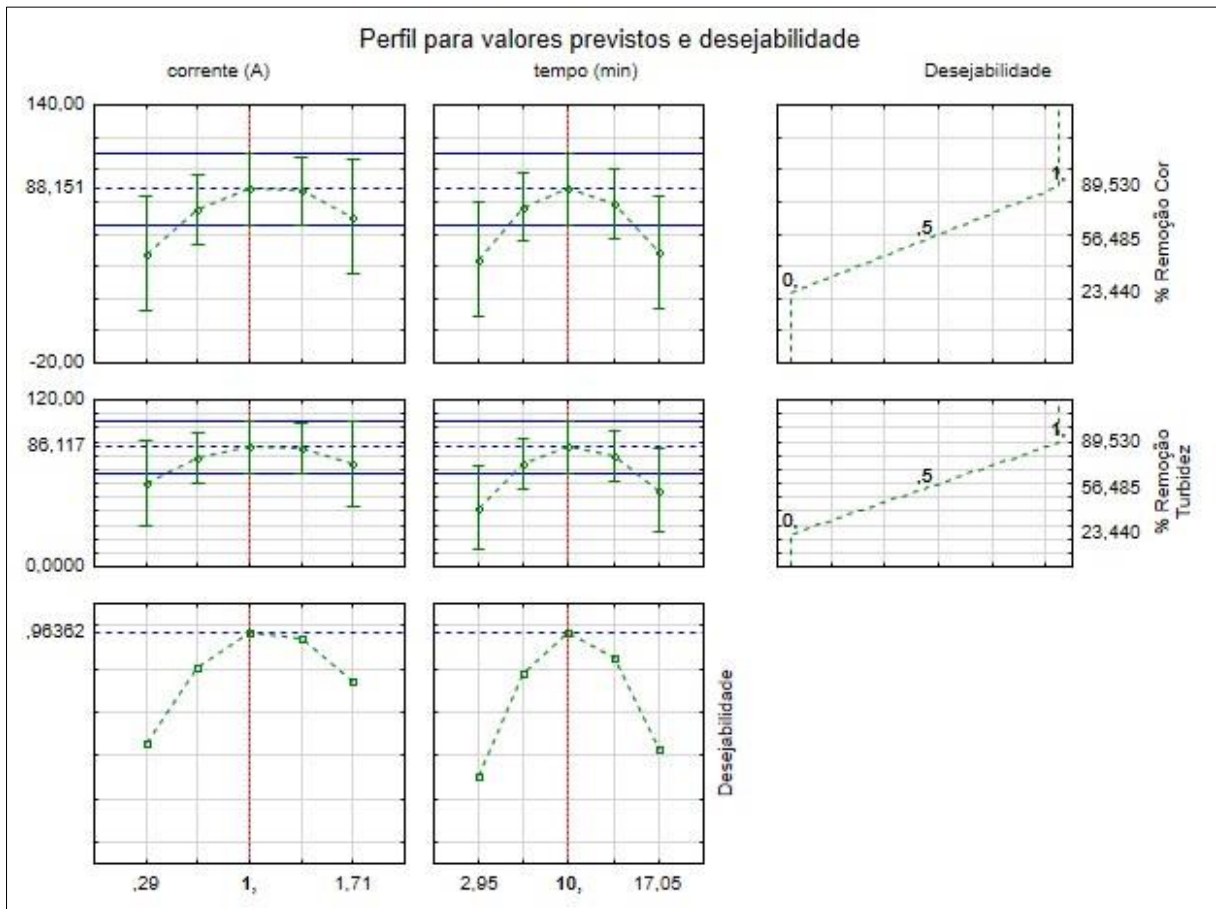


Conforme expresso nos Gráficos 5, 6 7 e 8, para ambas as variáveis respostas analisadas as maiores taxas de remoção podem ser observadas para condições operacionais ótimas de acordo com a desejabilidade global.

#### 4.3.1 Otimização da Desejabilidade Global

Aplicou-se a Desejabilidade Global para determinar o ajuste das melhores condições operacionais para o tratamento do efluente cosmético analisado via EC, com a finalidade de obter as condições operacionais ótimas de maneira global para as variáveis independentes (X1 e X2) e simultaneamente para as variáveis respostas (turbidez e cor), conforme Figura 4.

Figura 4 – Gráficos para a função de desejabilidade global



Fonte: Autora (2023).

Os resultados previstos por meio da desejabilidade global para remoção de turbidez e cor no sistema de EC proposto para o efluente estudado, validam os resultados experimentais e confirmam a faixa ótima de operação do sistema. Quanto mais próximo de 1 o valor da desejabilidade global mais próxima será a resposta obtida daquela prevista, nessas condições a função global alcançada foi de 0,96362, indicando uma excelente predição do modelo proposto.

O traço vermelho em cada um dos gráficos indica os valores ótimos das variáveis independentes, apontando uma corrente de 1,0 A e um tempo de tratamento de 10 minutos. Conforme a desejabilidade global, nessas condições operacionais supõe-se que as porcentagens de remoção após o tratamento por EC serão iguais a 88,15% para cor e 88,12% para turbidez.

#### 4.3.2 Validação do modelo proposto

Para confirmar o modelo proposto na análise estatística e na desejabilidade global foram realizados testes de validação, com uma corrente de 1,0 A para um tempo de 10 minutos. Os resultados obtidos nos testes para validação do modelo proposto estão expostos na Tabela 13, onde fica evidenciada a tendência de remoção conforme o modelo.

Tabela 13 – Resultados obtidos a partir das condições de tempo e corrente otimizadas

<b>Parâmetro</b>	<b>Efluente Bruto</b>	<b>Efluente Tratado</b>	<b>% Remoção Prevista</b>	<b>% Remoção Observada</b>
Turbidez (UNT)	11290,5 ± 9,67	748,67 ± 1,29	86,12	93,37
Cor (Pt-co)	825,45 ± 9,67	103,2 ± 1,29	88,15	87,50

Fonte: Autora (2023).

A remoção de turbidez e cor para o ensaio de validação atingiram valores próximos ao previsto, confirmando a predição do modelo proposto e sua confiabilidade. Em uma investigação da aplicação da EC no efluente da indústria cosmética com uso de eletrodos de Al e Fe, Reinehr *et al.* (2019) alcançaram condições otimizadas de operação de 1.672 A m<sup>-2</sup> com tempo de operação de 18,98 min para o eletrodo Al e 996 A m<sup>-2</sup> com tempo de operação de 29,54 min para o eletrodo Fe, nessas condições as porcentagens de remoção de cor e turbidez foram maximizadas, chegando a remoção de 90,96% Al e 92,31% Fe para turbidez e 97,07% Al e 93,69% para cor, tais resultados evidenciam que os obtidos neste estudo se encontram de acordo com valores médios encontrados na literatura.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A caracterização físico-química do efluente cosmético analisado mostrou que diversos parâmetros se encontram em discrepância com os valores máximos permitidos pelas legislações vigentes, CONAMA N° 357/2005 e N° 430/2011 e CONSEMA N°355/2017, para lançamento de efluente em corpo hídrico receptor, evidenciando a necessidade de um tratamento adequado.

Dessa forma, o tratamento do efluente cosmético foi realizado por EC em um sistema batelada, com eletrodos de Al. O planejamento experimental se deu por meio de um DCCR, onde buscou-se a otimização das variáveis independentes (corrente elétrica e tempo de tratamento) do modelo proposto, para remoção das variáveis respostas (cor, turbidez e DQO).

Verificou-se que o modelo proposto apresentou 95% de confiabilidade na significância das variáveis corrente elétrica e tempo de tratamento para remoção das variáveis respostas (cor e turbidez). A análise estatística ainda inferiu que uma diminuição no tempo de tratamento implica em maiores remoções de cor e turbidez.

Os valores ótimos de operação foram obtidos através da função de desejabilidade global, a qual forneceu de maneira simultânea a maximização das variáveis-respostas em uma corrente elétrica de 1,0 A com um tempo de tratamento de 10 minutos. A partir da condição otimizada realizou-se a validação do tratamento por EC atingindo uma remoção de 93,37% para turbidez e 87,50% para cor, demonstrando eficiência no tratamento.

Apesar de apresentar aspectos positivos em termos de tratabilidade das variáveis respostas, atingindo elevadas porcentagens na remoção das condições otimizadas, o efluente utilizado neste estudo não conseguiu atingir resultados satisfatórios para adequação às legislações vigentes. Tal efeito pode ser atribuído ao fato do efluente bruto apresentar valores extremamente acima dos valores máximos permitidos, os quais são decorrentes da falta de um tratamento preliminar na indústria geradora. O que reforça de fato a importância de tratamentos efetivos para a remoção de poluentes encontrados neste tipo do efluentes.

Desse modo, mesmo que o sistema aplicado não tenha atendido a legislação vigente, os resultados são promissores para aplicação da EC no tratamento do efluente cosmético em trabalhos futuros com variações dos principais interferentes (material dos eletrodos, disposição dos eletrodos, pH, densidade de corrente elétrica) na eficiência da EC, bem como o uso da EC acoplada a outras tecnologias.

## REFERÊNCIAS

- ABIDEMI, Bello Lukman *et al.* Treatment Technologies for Wastewater from Cosmetic Industry - A Review. **International Journal Of Chemical And Biomolecular Science**, [S.I.], v. 4, n. 4, p. 69-80, jan. 2019.
- ADAMOVIĆ, Savka *et al.* Measurement of copper deposition by electrocoagulation/flotation from waste printing developer. **Measurement**, [S.L.], v. 131, p. 288-299, jan. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2018.08.077>.
- AGUILAR-PÉREZ, K.M. *et al.* Nanoadsorbents in focus for the remediation of environmentally-related contaminants with rising toxicity concerns. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 779, p. 146465, jul. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146465>.
- AKARSU, Ceyhun *et al.* Treatment of personal care product wastewater for reuse by integrated electrocoagulation and membrane filtration processes. **Journal Of Water Process Engineering**, [S.L.], v. 48, p. 102879, ago. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.102879>.
- AKBAY, Habibe Elif Gulsen *et al.* Investigation of degradation potential of polyethylene microplastics in anaerobic digestion process using cosmetics industry wastewater. **Biochemical Engineering Journal**, [S.L.], v. 187, p. 108619, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.bej.2022.108619>.
- AKKAYA, Gülizar Kurtoğlu. Treatment of petroleum wastewater by electrocoagulation using scrap perforated (Fe-anode) and plate (Al and Fe-cathode) metals: optimization of operating parameters by rsm. **Chemical Engineering Research And Design**, [S.L.], v. 187, p. 261-275, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cherd.2022.08.048>.
- ALAM, Md Zahangir; BARI, Md. Niamul; KAWSARI, Sayera. Statistical optimization of Methylene Blue dye removal from a synthetic textile wastewater using indigenous adsorbents. **Environmental And Sustainability Indicators**, [S.L.], v. 14, p. 100176, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.indic.2022.100176>.
- ALJABERI, Forat Yasir. Desalination of groundwater by electrocoagulation using a novel design of electrodes. **Chemical Engineering And Processing - Process Intensification**, [S.L.], v. 174, p. 108864, abr. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2022.108864>.

ALVES, Sebastião Sampaio. **Conservação e Reuso de Água em Indústria de Cosméticos: estudo de caso da natura cosméticos**. 2009. 107 f. Dissertação (Doutorado) - Curso de Engenharia, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

ANDRADE, Pryscilla Martins de *et al.* The use of metallurgical waste for heterogeneous photo Fenton-Like treatment of cosmetic effluent. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, [S.L.], v. 8, n. 5, p. 104148, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2020.104148>.

ANDRADE, Pryscilla Martins de; DUFROYER, Carlos Rafael; BRITO, Núbia Natália de. Treatment of Real Cosmetic Effluent Resulting from the Manufacture of Hair Conditioners by Reduction Degradation, Adsorption and the Fenton Reaction. **Ozone: Science & Engineering**, [S.L.], v. 41, n. 3, p. 221-230, 21 set. 2018. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/01919512.2018.1518707>.

ANUF, A. Ronaldo *et al.* Optimization of electrocoagulation process for treatment of rice mill effluent using response surface methodology. **Journal Of Water Process Engineering**, [S.L.], v. 49, p. 103074, out. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103074>.

ANVISA. Dispõe sobre os requisitos técnicos para a regularização de produtos de higiene pessoal, cosméticos e perfumes e dá outras providências. **Resolução da Diretoria Colegiada - Rdc Nº 7**. [S.I]: Brasil.

APHA. American Public Health Association. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22<sup>a</sup> ed. Washington, USA. APHA-AWWA-WEF, 2012.

APOLINARIO, Mayara da Fonseca *et al.* ESTUDO DA REMOÇÃO DE ÍONS FERRO E MANGANÊS DA ÁGUA UTILIZANDO PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO COMO AGENTE OXIDANTE. **The Journal Of Engineering And Exact Sciences**, [S.L.], v. 4, n. 4, p. 0412-0419, 23 out. 2018. Universidade Federal de Vicosa. <http://dx.doi.org/10.18540/jcecvl4iss4pp0412-0419>.

ARAÚJO, Nathalia Santos *et al.* Treatment of cosmetic industry wastewater by flotation with *Moringa oleifera* Lam. and aluminum sulfate and toxicity assessment of the treated wastewater. **Environmental Science And Pollution Research**, [S.L.], v. 29, n. 1, p. 1199-1209, 4 ago. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-021-15722-4>.

ASAITHAMBI, Perumal *et al.* Investigation of direct and alternating current–electrocoagulation process for the treatment of distillery industrial effluent: studies on operating parameters. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, [S.L.], v. 9, n. 2, p. 104811, abr. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2020.104811>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE HIGIENE PESSOAL, PERFUMARIA E COSMÉTICOS. **Panorama do Setor Outubro 2022**. [S.I]: ABIHPEC, 2022. Disponível em: <https://abihpec.org.br/publicacao/panorama-do-setor/>. Acesso em: 23 out. 2022.

BAE, Yeunook *et al.* Impact of dissolved oxygen and pH on the removal of selenium from water by iron electrocoagulation. **Water Research**, [S.L.], v. 213, p. 118159, abr. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2022.118159>.

BAGASTYO, Arseto Yekti *et al.* Electrochemically-driven struvite recovery: prospect and challenges for the application of magnesium sacrificial anode. **Separation And Purification Technology**, [S.L.], v. 288, p. 120653, maio 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120653>.

BANERJEE, Priya *et al.* Treatment of cosmetic effluent in different configurations of ceramic UF membrane based bioreactor: toxicity evaluation of the untreated and treated wastewater using catfish (*heteropneustes fossilis*). **Chemosphere**, [S.L.], v. 146, p. 133-144, mar. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.12.004>.

BASSALA, Honoré Dieudonné *et al.* Investigation of the efficiency of a designed electrocoagulation reactor: application for dairy effluent treatment. **Process Safety And Environmental Protection**, [S.L.], v. 111, p. 122-127, out. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2017.07.002>.

BILAL, Muhammad; BARCELÓ, Damiá; IQBAL, Hafiz M.N.. Persistence, ecological risks, and oxidoreductases-assisted biocatalytic removal of triclosan from the aquatic environment. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 735, p. 139194, set. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139194>.

BILAL, Muhammad; MEHMOOD, Shahid; IQBAL, Hafiz M. N.. The Beast of Beauty: environmental and health concerns of toxic components in cosmetics. **Cosmetics**, [S.L.], v. 7, n. 1, p. 13, 28 fev. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/cosmetics7010013>.

BISWAS, Bishwatma; GOEL, Sudha. Electrocoagulation and electrooxidation technologies for pesticide removal from water or wastewater: a review. **Chemosphere**, [S.L.], v. 302, p. 134709, set. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134709>.

BOM, S. *et al.* A step forward on sustainability in the cosmetics industry: a review. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 225, p. 270-290, jul. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.03.255>.

BOX, George E.P.; HUNTER, J. Stuart; HUNTER, William G.. **Statistics for Experimenters**. New Jersey: John Wiley & Sons, 1978.

BRASIL. 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 Conama Nº 357**. Diário Oficial da União, 18 mar. 2005.

BRASIL. 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 Conama Nº 430**. Diário Oficial da União, 16 mai. 2011.

CARMO, Andreiva Lauren Vital do. **COMBINAÇÃO DE ELETROCOAGULAÇÃO E PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTES DA INDÚSTRIA DE PRODUTOS CAPILARES**. 2018. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civi, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2018.

CHANDRAKER, Neeraj *et al.* Removal of fluoride from water by electrocoagulation using Mild Steel electrode. **Journal Of The Indian Chemical Society**, [S.L.], v. 98, n. 2, p. 100026, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jics.2021.100026>.

CHANGMAI, M.; PASAWAN, M.; PURKAIT, M.K.. Treatment of oily wastewater from drilling site using electrocoagulation followed by microfiltration. **Separation And Purification Technology**, [S.L.], v. 210, p. 463-472, fev. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2018.08.007>.

CÜCE, Hüseyin; TEMEL, Fulya Aydın. Classical-Fenton and Photo-Fenton oxidation of wastewater arising from cosmetic automobile care products. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, [S.L.], v. 40, n. 6, p. 1-10, 24 jun. 2021. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/ep.13701>.

DAS, Pranjali P.; SHARMA, Mukesh; PURKAIT, Mihir K.. Recent progress on electrocoagulation process for wastewater treatment: a review. **Separation And Purification Technology**, [S.L.], v. 292, p. 121058, jul. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2022.121058>.

DEMICHELIS, Francesca; FIORE, Silvia; ONOFRIO, Maurizio. Pre-treatments aimed at increasing the biodegradability of cosmetic industrial waste. **Process Safety And Environmental Protection**, [S.L.], v. 118, p. 245-253, ago. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2018.07.001>.

DEMIRBAS, E.; KOBYA, M.. Operating cost and treatment of metalworking fluid wastewater by chemical coagulation and electrocoagulation processes. **Process Safety And Environmental Protection**, [S.L.], v. 105, p. 79-90, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2016.10.013>.

DERRINGER, G., SUICH, R. Simultaneous optimization of several response variables. **Journal of Quality Technology**, v.12:4, p. 214-219, 1980. Doi: <https://doi.org/10.1080/00224065.1980.11980968>.

DUIS, Karen; JUNKER, Thomas; COORS, Anja. Review of the environmental fate and effects of two UV filter substances used in cosmetic products. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 808, p. 151931, fev. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151931>.

DUKANG, *et al.* Removal of nutrients and pharmaceuticals and personal care products from wastewater using periphyton photobioreactors. **Bioresource Technology**, [S.L.], v. 248, p. 113-119, jan. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2017.06.153>.

FENG, Qian *et al.* An improved kinetic model for dephosphorization of laundry wastewater by electrocoagulation. **Journal Of Water Process Engineering**, [S.L.], v. 39, p. 101750, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101750>.

FIORE, Silvia; DEMICHELIS, Francesca; CHIAPPERO, Marco; ONOFRIO, Maurizio. Investigation of the anaerobic digestion of cosmetic industrial wastes: feasibility and perspectives. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 299, p. 113678, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113678>.

FRIHA, Inès *et al.* Treatment of cosmetic industry wastewater by submerged membrane bioreactor with consideration of microbial community dynamics. **International**



**Biodeterioration & Biodegradation**, [S.L.], v. 88, p. 125-133, mar. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.12.015>.

GALVÃO, Neanderson; SOUZA, Jeanette Beber de; VIDAL, Carlos Magno de Sousa. Landfill leachate treatment by electrocoagulation: effects of current density and electrolysis time. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, [S.L.], v. 8, n. 5, p. 104368, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2020.104368>.

GARCIA-SEGURA, Sergi *et al.* Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: a general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies. **Journal Of Electroanalytical Chemistry**, [S.L.], v. 801, p. 267-299, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jelechem.2017.07.047>.

GHAZOUANI, Mouna; BOUSSELMI, Latifa; AKROUT, Hanene. Combined electrocoagulation and electrochemical treatment on BDD electrodes for simultaneous removal of nitrates and phosphates. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, [S.L.], v. 8, n. 6, p. 104509, dez. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2020.104509>.

GONÇALVES, Amanda de Azevedo *et al.* Treatment of beauty salon effluents using advanced oxidative electrochemical processes with boron-doped diamond anode. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, [S.L.], v. 10, n. 5, p. 108376, out. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2022.108376>.

GOSWAMI, Lalit *et al.* Membrane bioreactor and integrated membrane bioreactor systems for micropollutant removal from wastewater: a review. **Journal Of Water Process Engineering**, [S.L.], v. 26, p. 314-328, dez. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.10.024>.

GRECCO, Luís; SOUZA, Bárbara; ZANONI, Maria Valnice. ELETROCOAGULAÇÃO/ELETROFLOCULAÇÃO PARA TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS: eletrodos não convencionais e acoplamento de técnicas. **Química Nova**, [S.L.], p. 410-423, 2021. Sociedade Brasileira de Química (SBQ). <http://dx.doi.org/10.21577/0100-4042.20170846>.

HAKIZIMANA, Jean Nepo *et al.* Electrocoagulation process in water treatment: a review of electrocoagulation modeling approaches. **Desalination**, [S.L.], v. 404, p. 1-21, fev. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2016.10.011>.

HENDAOU, Kamel; TRABELSI-AYADI, Malika; AYARI, Fadhila. Optimization of continuous electrocoagulation-adsorption combined process for the treatment of a textile

effluent. **Chinese Journal Of Chemical Engineering**, [S.L.], v. 44, p. 310-320, abr. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cjche.2020.10.047>.

HENTZ, Vanessa Simon. **Proposta de tratamento físico-químico de efluentes líquidos de uma indústria de cosmético**. 2018. 66 f. TCC (Graduação) - Curso de Química, Universidade do Sul de Santa Catarina, Tubarão, 2018.

K.L., Priya *et al.* Fate, transport and degradation pathway of microplastics in aquatic environment — A critical review. **Regional Studies In Marine Science**, [S.L.], v. 56, p. 102647, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rsma.2022.102647>.

KIM, Sehui; SEO, A Young; LEE, Tai Gyu. Functionalized cellulose to remove surfactants from cosmetic products in wastewater. **Carbohydrate Polymers**, [S.L.], v. 236, p. 116010, maio 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbpol.2020.116010>.

KLIMONDA, A.; KOWALSKA, I. Membrane technology for the treatment of industrial wastewater containing cationic surfactants. **Water Resources And Industry**, [S.L.], v. 26, p. 100157, dez. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wri.2021.100157>.

KOBYA, Mehmet *et al.* A review on decontamination of arsenic-contained water by electrocoagulation: reactor configurations and operating cost along with removal mechanisms. **Environmental Technology & Innovation**, [S.L.], v. 17, p. 100519, fev. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eti.2019.100519>.

KOLLING, Camila; RIBEIRO, José Luis Duarte; MEDEIROS, Janine Fleith de. Performance of the cosmetics industry from the perspective of Corporate Social Responsibility and Design for Sustainability. **Sustainable Production And Consumption**, [S.L.], v. 30, p. 171-185, mar. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.spc.2021.12.002>.

KUMAR, Dushyant; SHARMA, Chhaya. Paper industry wastewater treatment by electrocoagulation and aspect of sludge management. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 360, p. 131970, ago. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131970>.

LACH, Carlos Eduardo *et al.* Investigating the process of electrocoagulation in the removal of azo dye from synthetic textile effluents and the effects of acute toxicity on *Daphnia magna* test organisms. **Journal Of Water Process Engineering**, [S.L.], v. 45, p. 102485, fev. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102485>.

LEE, Sang-Hun *et al.* Toxicity of benzophenone-3 and its biodegradation in a freshwater microalga *Scenedesmus obliquus*. **Journal Of Hazardous Materials**, [S.L.], v. 389, p. 122149, maio 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122149>.

LI, Yitao *et al.* Environmental photochemistry of organic UV filter butyl methoxydibenzoylmethane: implications for photochemical fate in surface waters. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 839, p. 156145, set. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156145>.

LIMA, Juan Pablo Pereira; MELO, Elisa Dias; AGUIAR, André. Characteristics and ways of treating cosmetic wastewater generated by Brazilian industries: a review. **Process Safety And Environmental Protection**, [S.L.], v. 168, p. 601-612, dez. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2022.10.031>.

LU, Jianbo *et al.* Simultaneous removal of Cr(VI) and Cu(II) from acid wastewater by electrocoagulation using sacrificial metal anodes. **Journal Of Molecular Liquids**, [S.L.], v. 359, p. 119276, ago. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2022.119276>.

MATTOS, Julio Cesar Pinho *et al.* Processos eletroquímicos: alternativas para o tratamento dos efluentes da indústria do látex na Amazônia Legal Brasileira. **Scientia Naturalis**, Rio Branco, v. 3, n. 5, p. 1973-1984, nov. 2021.

MELO, Elisa Dias de. **Avaliação e Identificação da Toxicidade de Efluentes Líquidos de uma Indústria de Cosméticos**. 2012. 99 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012.

MELO, Elisa Dias de; MOUNTEER, Ann Honor. AVALIAÇÃO DA TRATABILIDADE DE EFLUENTES DE INDÚSTRIAS DE COSMÉTICOS CAPILARES POR PROCESSOS BIOLÓGICOS AERÓBIOS. **Revista Augustus**, [S.L.], v. 24, n. 49, p. 155-178, 17 dez. 2019. Sociedade Unificada de Ensino Augusto Motta -UNISUAM. <http://dx.doi.org/10.15202/1981896.2019v24n49p155>.

MIGUEL, Laís Mourão. **A biodiversidade na indústria de cosméticos: contexto internacional e mercado brasileiro**. 2012. 259 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Geografia Humana, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

MIRAJ, Shaima S.; PARVEEN, Naima; ZEDANA, Haya S.. Plastic microbeads: small yet mighty concerning. **International Journal Of Environmental Health Research**, [S.L.], v. 31, p. 788-804, set. 2019

MOHORA, Emilijan *et al.* Arsenic removal from groundwater by horizontal-flow continuous electrocoagulation (EC) as a standalone process. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, [S.L.], v. 6, n. 1, p. 512-519, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2017.12.042>.

MURARI, Gabriella Frade *et al.* Use of aqueous two-phase PEG-salt systems for the removal of anionic surfactant from effluents. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 198, p. 43-49, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.046>.

MUSZYŃSKI, Adam *et al.* Cosmetic wastewater treatment with combined light/Fe<sup>0</sup>/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> process coupled with activated sludge. **Journal Of Hazardous Materials**, [S.L.], v. 378, p. 120732, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.06.009>.

NASRULLAH, Mohd *et al.* Electrocoagulation treatment of raw palm oil mill effluent: optimization process using high current application. **Chemosphere**, [S.L.], v. 299, p. 134387, jul. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134387>.

NASRULLAH, Mohd *et al.* Electrode design for electrochemical cell to treat palm oil mill effluent by electrocoagulation process. **Environmental Technology & Innovation**, [S.L.], v. 9, p. 323-341, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eti.2017.10.001>.

NIDHEESH, P.V. *et al.* Emerging applications, reactor design and recent advances of electrocoagulation process. **Process Safety And Environmental Protection**, [S.L.], v. 166, p. 600-616, out. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2022.08.051>.

NIDHEESH, P.V. *et al.* Removal of nutrients and other emerging inorganic contaminants from water and wastewater by electrocoagulation process. **Chemosphere**, [S.L.], v. 307, p. 135756, nov. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.135756>.

NIDHEESH, P.V.; SINGH, T.s. Anantha. Arsenic removal by electrocoagulation process: recent trends and removal mechanism. **Chemosphere**, [S.L.], v. 181, p. 418-432, ago. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.04.082>.

NOWAK, Karolina; JABŁOŃSKA, Ewa; RATAJCZAK-WRONA, Wioletta. Controversy around parabens: alternative strategies for preservative use in cosmetics and personal care products. **Environmental Research**, [S.L.], v. 198, p. 110488, jul. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envres.2020.110488>.

NUNES, Roberta Frinhani; TEIXEIRA, Antonio Carlos Silva Costa. An overview on surfactants as pollutants of concern: occurrence, impacts and persulfate-based remediation technologies. **Chemosphere**, [S.L.], v. 300, p. 134507, ago. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134507>.

OMWENE, Philip Isaac; KOBAYA, Mehmet; CAN, Orhan Taner. Phosphorus removal from domestic wastewater in electrocoagulation reactor using aluminium and iron plate hybrid anodes. **Ecological Engineering**, [S.L.], v. 123, p. 65-73, nov. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.08.025>.

PADMAJA, K.; CHERUKURI, Jyotsna; REDDY, M. Anji. A comparative study of the efficiency of chemical coagulation and electrocoagulation methods in the treatment of pharmaceutical effluent. **Journal Of Water Process Engineering**, [S.L.], v. 34, p. 101153, abr. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101153>.

PATIDAR, Ritesh; SRIVASTAVA, Vimal Chandra. Ultrasound-assisted electrochemical treatment of cosmetic industry wastewater: mechanistic and detoxification analysis. **Journal Of Hazardous Materials**, [S.L.], v. 422, p. 126842, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126842>.

RAHMAN, Nazeri Abdul *et al.* Emerging Application of Electrocoagulation for Tropical Peat Water Treatment: a review. **Chemical Engineering And Processing - Process Intensification**, [S.L.], v. 165, p. 108449, ago. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2021.108449>.

REINEHR, Roselaine Cristina Rejei *et al.* Application of the statistical experimental design to optimize the electrocoagulation technology in the treatment of cosmetic industry wastewater. **Desalination And Water Treatment**, [S.L.], v. 138, p. 27-35, 2019. Desalination Publications. <http://dx.doi.org/10.5004/dwt.2019.23282>.

RIBEIRO, Mariany Rhaiany *et al.* Synthesis of value-added materials from the sewage sludge of cosmetics industry effluent treatment plant. **Journal Of Environmental Chemical Engineering**, [S.L.], v. 9, n. 4, p. 105367, ago. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jece.2021.105367>.

RIO GRANDE DO SUL. Dispõe sobre os critérios e padrões de emissão de efluentes líquidos para as fontes geradoras que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul. **Resolução CONSEMA Nº 355**. Diário Oficial do Estado.

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.

SASI, Subha *et al.* Alcohol ethoxysulfates (AES) in environmental matrices. **Environmental Science And Pollution Research**, [S.L.], p. 34167-34186, 10 maio 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-021-14003-4>.

SCHNEIDER, Jaíne. **AVALIAÇÃO DA ELETROCOAGULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE PROCESSO MICROBIOLÓGICO DE TRATAMENTO DE EFLUENTE DE UMA INDÚSTRIA DE COSMÉTICOS**. 2022. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Biotecnologia, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2022.

SHOKRI, Aref; FARD, Mahdi Sanavi. A critical review in electrocoagulation technology applied for oil removal in industrial wastewater. **Chemosphere**, [S.L.], v. 288, p. 132355, fev. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132355>.

SIYAL, Ahmer Ali *et al.* A review on recent developments in the adsorption of surfactants from wastewater. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 254, p. 109797, jan. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109797>.

SONG, Peipei *et al.* Electrocoagulation treatment of arsenic in wastewaters: a comprehensive review. **Chemical Engineering Journal**, [S.L.], v. 317, p. 707-725, jun. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2017.02.086>.

SUMAN, Harshika; SANGAL, Vikas K.; VASHISHTHA, Manish. Treatment of tannery industry effluent by electrochemical methods: a review. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 47, p. 1438-1444, 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.300>.

TAHREEN, Amina; JAMI, Mohammed Saedi; ALI, Fathilah. Role of electrocoagulation in wastewater treatment: a developmental review. **Journal Of Water Process Engineering**, [S.L.], v. 37, p. 101440, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101440>.

TEGLADZA, Isaac Delove *et al.* Electrocoagulation processes: a general review about role of electro-generated flocs in pollutant removal. **Process Safety And Environmental Protection**, [S.L.], v. 146, p. 169-189, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2020.08.048>.

TEIXEIRA, Alan José de Oliveira. Empreendedorismo: a assertividade do setor de cosméticos. **Administração de Empresas em Revista**, Curitiba, v. 16, n. 2, p. 1-19, fev. 2019.

TITCHOU, Fatima Ezzahra *et al.* Removal of Persistent Organic Pollutants (POPs) from water and wastewater by adsorption and electrocoagulation process. **Groundwater For Sustainable Development**, [S.L.], v. 13, p. 100575, maio 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100575>.

TONES, Aline Raquel Müller *et al.* Cylindrical electrochemical reactor in continuous upward flow: influence of operational parameters in the treatment of cosmetic effluent. **Chemical Engineering And Processing - Process Intensification**, [S.L.], v. 157, p. 108120, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2020.108120>.

VALE, Francisca *et al.* Parabens as emerging contaminants: environmental persistence, current practices and treatment processes. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 347, p. 131244, maio 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.131244>.

WATERTECTONICS. **WAVELONICS**. Disponível em: <https://www.watertectonics.com/technology/waveionics/>. Acesso em: 19 nov. 2022.

WILÍNSKI, Piotr Robert *et al.* Pretreatment of cosmetic wastewater by dissolved ozone flotation (DOF). **Desalination And Water Treatment**, [S.L.], v. 71, p. 95-106, 2017. Desalination Publications. <http://dx.doi.org/10.5004/dwt.2017.20552>.

YU, Yu *et al.* A novel electrocoagulation process with centrifugal electrodes for wastewater treatment: electrochemical behavior of anode and kinetics of heavy metal removal. **Chemosphere**, [S.L.], v. 310, p. 136862, jan. 2023. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136862>.

YUN, Hui *et al.* Fate, risk and removal of triclocarban: a critical review. **Journal Of Hazardous Materials**, [S.L.], v. 387, p. 121944, abr. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121944>.

ZAIED, B.K. *et al.* A comprehensive review on contaminants removal from pharmaceutical wastewater by electrocoagulation process. **Science Of The Total Environment**, [S.L.], v. 726, p. 138095, jul. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138095>.

ZINI, Lucas Pandolphi *et al.* Treatment of automotive industry wastewater by electrocoagulation using commercial aluminum electrodes. **Process Safety And**

**Environmental Protection**, [S.L.], v. 142, p. 272-284, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2020.06.029>.

ZORIĆ, Marina *et al.* Supercritical CO<sub>2</sub> extracts in cosmetic industry: current status and future perspectives. **Sustainable Chemistry And Pharmacy**, [S.L.], v. 27, p. 100688, jun. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scp.2022.100688>.