

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**LUCAS DE OLIVEIRA ALVES**

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DA ELETROCOAGULAÇÃO COMO PRÉ-  
TRATAMENTO DE UM EFLUENTE VINÍCOLA SIMULADO**

CURITIBA

2021

**LUCAS DE OLIVEIRA ALVES**

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DA ELETROCOAGULAÇÃO COMO PRÉ-  
TRATAMENTO DE UM EFLUENTE VINÍCOLA SIMULADO**

**Efficiency analysis of electrocoagulation as a pre-treatment of a simulated  
winery waste water**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil, do Departamento Acadêmico de Construção Civil, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador: Prof. Dr. Flavio Bentes Freire

**CURITIBA**

**2021**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**LUCAS DE OLIVEIRA ALVES**

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DA ELETROCOAGULAÇÃO COMO PRÉ-  
TRATAMENTO DE UM EFLUENTE VINÍCOLA SIMULADO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 10/Dezembro/2021

---

Flavio Bentes Freire  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Fernando Oliveira de Andrade  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Thomaz Aurélio Pagioro  
Doutorado  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CURITIBA**

**2021**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Tecnológica Federal do Paraná por proporcionar toda a infraestrutura e as ferramentas necessárias para que eu pudesse cumprir a missão de me tornar um engenheiro civil.

Agradeço a todos os professores com quem tive a honra de estudar, pelas incontáveis horas de esforço, dedicação e zelo para comigo e com todos os meus colegas de graduação.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Flávio Bentes Freire, pela paciência e por me guiar neste que será o último trabalho e que garantirá o sucesso de minha jornada pela graduação.

Um agradecimento especial à minha família, por despertar em mim a vontade de buscar conhecimento e aprender uma nova profissão, por cuidar de mim e fazer com que eu chegasse até os dias de hoje com saúde e muita alegria, por viabilizar este sonho. Sem o apoio incondicional de meus familiares, não seria possível nem mesmo iniciar esta trajetória.

Agradeço aos meus colegas por todo o apoio, aprendizado, horas de conversas e incentivos e pela amizade que pretendo manter mesmo depois que a graduação acabar.

Agradeço ao meu pai por me incentivar a estudar, não deixar faltar nada para que eu pudesse cursar a universidade tranquilamente, sem nenhuma preocupação, por ser o meu melhor amigo e me ensinar a trabalhar duro por aquilo em que você acredita, sendo sempre gentil com todas as pessoas a sua volta e levando a vida de maneira leve e alegre.

Por fim, gostaria de agradecer a mim mesmo por nunca desistir e persistir mesmo nos momentos mais difíceis e agradecer ao meu amor por jamais deixar que eu desistisse

## RESUMO

A crescente preocupação com a preservação dos recursos naturais faz com que se busque opções viáveis e eficientes de tratamentos de efluentes. Visto que a indústria vinícola possui sua posição, em escala global, como grande produtora de efluentes e potencialmente poluidora, tratamentos específicos para este tipo de efluente devem ser estudados. Deste modo, no presente estudo, buscou-se empregar a eletrocoagulação como um pré-tratamento, a fim de observar sua eficiência na redução do indicador demanda química de oxigênio e turbidez, também monitorando sua influência sobre o pH em um efluente vinícola simulado. Para isto, foram realizados experimentos em laboratório utilizando uma fonte de corrente contínua e eletrodos de alumínio, compondo uma célula eletrolítica que realizou o pré-tratamento de eletrocoagulação no efluente vinícola simulado. Os parâmetros monitorados foram o pH, a DQO e a turbidez e o planejamento dos experimentos e sua posterior análise utilizaram a metodologia do planejamento fatorial. Durante o experimento, foram controladas as variáveis tensão da fonte e tempo de experimento. Como resultados, foram obtidas remoções de até 45,3% de DQO e 80,4% de turbidez, além de determinar que a variável tensão foi determinante para o resultado positivo da remoção de DQO, enquanto que o tempo de experimento teve mais influência durante a remoção de turbidez. Portanto, conclui-se que o emprego da eletrocoagulação sobre um efluente vinícola simulado produz resultados positivos, podendo se caracterizar como um pré-tratamento para este tipo de efluente, visto a plena eficiência que a eletrocoagulação remove parâmetros neste tipo de efluente.

**Palavras-chave:** Eletroflotação. Planejamento Fatorial. Físico-químico. Eletroquímica. Célula Eletrolítica.

## ABSTRACT

The growing concern with the preservation of natural resources incites the search for viable and efficient options for effluent treatments. Since the wine industry has its position, on a global scale, as a producer of waste water and potentially polluting, specific treatments for this type of effluent should be studied. Thus, in the present study, we sought to use electrocoagulation as a pre-treatment, in order to observe its efficiency in reducing chemical oxygen demand and turbidity, also monitoring its influence on pH in a simulated winery effluent. For this, laboratory experiments were carried out using a direct current source and aluminum electrodes, composing an electrolytic cell. The monitored parameters were pH, COD and turbidity and the design of the experiments and their subsequent analysis used the factorial design methodology. During the experiment, the source voltage and experiment time variables were controlled. As a result, removals of up to 45.3% of COD and 80.4% of turbidity were obtained, in addition to determining that the tension variable was decisive for the positive result of COD removal, while the experiment time had more influence during removing turbidity. Therefore, it is concluded that the use of electrocoagulation on a simulated winery effluent produces positive results and can be characterized as a pre-treatment for this type of effluent, given the full efficiency that electrocoagulation removes parameters in this type of effluent.

**Keywords:** Electroflotation. Factorial Planning. Physiochemical. Electrochemistry. Electrolytic Cell.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxo de processos na produção de vinhos e rejeitos gerados .....	22
Figura 2 - Relação entre processos eletroquímicos .....	28
Figura 3 - Processos físico-químicos da eletrocoagulação .....	29
Figura 4 - Esquema de ligação monopolar em série .....	31
Figura 5 - Ligação monopolar em paralelo .....	32
Figura 6 - Ligação bipolar em paralelo .....	32
Figura 7 - Reator para a execução da eletrocoagulação .....	42
Figura 8 - Remoção de cor: antes (esquerda) e depois (direita) do tratamento com eletrocoagulação .....	50

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Fluxo de materiais no processo de vinificação .....	18
Quadro 2 - Potenciais impactos no ambiente decorrentes da atividade vinícola.....	24
Quadro 3 - Vantagens e desvantagens da EC .....	37
Quadro 4 - Parametrização dos fatores.....	43
Quadro 5 - Interação entre os fatores .....	44



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produção de subprodutos durante a vinificação (branco e tinto).....	23
Tabela 2 - Parâmetros iniciais do efluente .....	38
Tabela 3 - Resultados do tratamento com eletrocoagulação .....	39
Tabela 4 – Parâmetros de caracterização e métodos utilizados .....	41
Tabela 5 - Fatores para o planejamento fatorial.....	43
Tabela 6 - Parametrização da remoção de DQO .....	47
Tabela 7 - Parametrização de variáveis para remoção de turbidez .....	49
Tabela 8 - Resumo do aumento de pH da amostra.....	52

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Taxa de dissociação de alumínio segundo o pH .....	35
Gráfico 2 - Remoção de cor e consumo de energia .....	36
Gráfico 3 - Remoção de DQO: 20 minutos de experimento .....	46
Gráfico 4 – Remoção de DQO: 40 minutos de experimento. ....	47
Gráfico 5 - Remoção de turbidez: 20 minutos de experimento.....	48
Gráfico 6 - Remoção de turbidez: 40 minutos de tratamento .....	49
Gráfico 7 - pH da amostra ao longo de 20 minutos de tratamento por eletrocoagulação .....	51
Gráfico 8 - pH ao longo de 40 minutos de tratamento por eletrocoagulação.....	51

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

A	Ampére
A.C.	Antes de Cristo
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
cm	Centímetro
CONAMA	Conselho Nacional do Meio-ambiente
CR	<i>Color removal</i>
d	Dia
DBO	Demanda Biológica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EC	Eletrocoagulação
ECF	Eletrocoagulação/flotação
EF	Eletroflotação
EPA	<i>Environment Protect Authority</i>
g	grama
IBRAVIN	Instituto Brasileiro do Vinho
kg	Quilograma
kWh	Quilowatts hora
L	Litro
m <sup>2</sup>	Metro quadrado
m <sup>3</sup>	Metro cúbico
mg	Miligrama
min	minutos
mm	Milímetro
mS	MiliSiemens
NBR	Norma Brasileira
NTU	<i>Nephelometric Turbidity Unity</i>
ONU	Organização das Nações Unidas
pH	Potencial hidrogeniônico
POA	Processos de Oxidação Avançada
Pt/Co	Escala de Platica-Cobalto
rpm	Rotações por minuto

s	segundos
SEEC	<i>Specific Electric Energy Consumption</i>
UASB	<i>Up-flow Anaerobic Sludge Blanket</i>
UV	Ultravioleta
V	Volts

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>14</b>
1.1 OBJETIVO GERAL .....	16
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
1.3 JUSTIFICATIVA.....	16
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>18</b>
2.1 O PROCESSO DE VINIFICAÇÃO .....	18
2.1.1 Etapas do Processo.....	19
2.1.2 Impactos Ambientais.....	22
2.2 TRATAMENTOS DO EFLUENTE VINÍCOLA .....	25
2.2.1 Tratamento Biológico .....	25
2.2.2 Tratamento Físico-Químico.....	26
2.3 FUNDAMENTOS DA ELETROCOAGULAÇÃO .....	27
2.3.1 Reações Envolvidas .....	28
2.3.2 Esquemas de Ligação .....	30
2.3.3 Parâmetros que Influenciam o Processo de Eletrocoagulação.....	33
2.3.3.1 Material dos eletrodos .....	33
2.3.3.2 Densidade de corrente .....	33
2.3.3.3 pH .....	34
2.3.3.4 Temperatura.....	35
2.3.3.5 Distância dos eletrodos.....	35
2.3.4 Vantagens e Desvantagens da Eletrocoagulação .....	37
2.4 ESTUDOS SOBRE ELETROCOAGULAÇÃO APLICADA AO EFLUENTE VINÍCOLA.....	38
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>40</b>
3.1 SIMULAÇÃO DO EFLUENTE VINÍCOLA .....	40
3.2 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE .....	41
3.3 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO .....	41
3.3.1 Aparato Experimental .....	41
3.3.2 Planejamento Fatorial .....	42
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>45</b>
4.1 CARACTERÍSTICAS DO EFLUENTE .....	45
4.2 RESULTADOS DO TRATAMENTO DE ELETROCOAGULAÇÃO COM EFLUENTE SIMULADO .....	45
4.2.1 Remoção de DQO .....	46
4.2.2 Remoção de turbidez.....	48
4.2.3 pH .....	50
<b>5 CONCLUSÃO</b> .....	<b>53</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>54</b>



## 1 INTRODUÇÃO

Desde a revolução industrial, a transformação de matéria prima em bens de consumo tem se intensificado em escala mundial, década após década. A água tem protagonismo em grande parte destes processos, utilizada nas linhas de produção, como meio para reações químicas, incorporada ao produto final, usada para fins de resfriamento ou para higienização de maquinário e dos trabalhadores. Desde então, inúmeros estudos vêm sendo produzidos ao longo dos anos a fim de avaliar os impactos do uso e destinação de água por parte das indústrias, revelando sérias preocupações com questões ambientais.

Como resposta, a Organização das Nações unidas inicia, em 1972, uma série de conferências sobre clima e meio ambiente, sempre incluindo recursos hídricos como um dos pilares da vida e do desenvolvimento sustentável. Atualmente, a ONU tem seguido uma série de objetivos denominados “Agenda 2030”, na qual o objetivo de desenvolvimento sustentável número 6, intitulado “assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todas e todos” (ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS, 2018) demonstra a importância deste tema para toda a vida no planeta.

Em consonância com a preocupação global de assegurar os recursos hídricos para a posteridade e para a manutenção dos ecossistemas, diversos órgãos brasileiros trabalham para criar leis e normativas que resguardem tais recursos. Como destaque, a resolução número 430, do Conselho Nacional do Meio Ambiente, que identifica condições mínimas para o lançamento de efluentes (BRASIL, 2011), servindo como guia para indústrias que geram grandes quantidade de rejeitos em forma líquida, como é o caso da indústria vinícola, que será abordada neste estudo.

O processo de vinificação gera efluentes que são potencialmente prejudiciais para os cursos d’água e para os ecossistemas aquáticos, desde que não tratados de forma adequada. Segundo Monteiro (1996), alguns problemas que podemos destacar: Alteração do pH da água onde o efluente é destinado, causando desequilíbrio na comunidade aquática; modificação na turbidez da água, impedindo a penetração dos raios solares e dificultando a realização da fotossíntese; acúmulo de matéria orgânica, gerando o processo de eutrofização, dentre outros.

De uma forma geral, a indústria alimentícia gera efluentes com características que são facilmente atenuadas por tratamentos biológicos, como sistemas de lodos ativados, lagoas anaeróbias, reatores UASB, etc. Contudo, existe uma série de fatores não-biológicos potencialmente nocivos, fazendo com que as indústrias busquem por alternativas de pré-tratamento, aumentando ainda mais a eficiência do sistema de tratamento.

Uma das alternativas encontradas foi a utilização de eletricidade para tratamento de efluentes. O uso de corrente elétrica aplicada tanto para tratamento de água quanto para tratamento de rejeitos e efluentes é explorado desde 1889, no Reino Unido, e após anos de estudos e aprimoramento, mostrou-se eficiente comparando-se com outras tecnologias e, em alguns casos, indispensável (CHEN, 2004). Dentre as tecnologias que utilizam eletricidade para tratamento de água e efluentes, a eletrocoagulação possui grande destaque e será abordada no presente estudo.

A eletrocoagulação é uma tecnologia que combina os efeitos já conhecidos da coagulação, flotação e eletroquímica, atualmente empregados separadamente nos processos de tratamento. Através de uma célula eletrolítica, composta de polos metálicos (usualmente ferro ou alumínio), os ions metálicos gerados no ânodo atual como agentes desestabilisantes para as partículas coloidais presentes no fluido que se deseja tratar, ocasionando coagulação dos mesmos e consequente precipitação ou flotação devido as bolhas de hidrogênio geradas no cátodo (MOUSSA et al, 2016). Os mecanismos físicos e químicos deste processo serão melhor abordados ao longo dos capítulos deste trabalho.

A crescente preocupação com o uso de recursos naturais gerou em diversos setores enorme comoção, de forma que, cada vez mais, tem-se priorizado a busca por alternativas sustentáveis. De fato, a eletrocoagulação como forma de tratamento ganha destaque neste cenário, pois pode estar associada com a utilização de energias renováveis ou com baixa emissão de CO<sub>2</sub>, visto que uma placa fotovoltaica é suficiente para alimentar o sistema (MOLLAH *et al.*, 2001).



## 1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a eficiência da utilização da eletrocoagulação como pré-tratamento em um efluente simulado da indústria vinícola.

## 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos são:

- a) Elaborar um efluente sintético, simulando as condições de um efluente advindo de indústria vinícola, fazendo a sua caracterização quando a demanda química de oxigênio, pH inicial e turbidez.
- b) Avaliar a eficiência de remoção dos parâmetros de turbidez, demanda química de oxigênio e monitorar o pH durante o processo do tratamento por eletrocoagulação.
- c) Discutir a influência das variáveis tempo de experimento e tensão aplicada através da metodologia do planejamento fatorial.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

No ano de 2019 foram produzidos, somente no estado do Rio Grande do Sul, que possui grande representatividade no cenário nacional de vinhos, cerca de 403,61 milhões de litros da bebida e outros derivados da uva (IBRAVIN, 2020). São mais de 1,1 mil unidades produtoras espalhadas pelo Brasil, compostas em sua grande maioria por pequenas propriedades, possuindo em média 2 hectares por família (PROTAS; CAMARGO, 2011).

Entre a recepção das uvas, prensagem, fermentação e engarrafamento, são gerados cerca de 1 litro de efluente para cada litro de vinho produzido (PIRRA, 2005). Existe, portanto, uma séria preocupação quanto a geração de efluentes e ao tratamento destes antes de chegarem ao sistema de esgoto, pois se trata de centenas de milhões de litros de rejeitos na forma líquida.

Diante de toda a preocupação com o meio ambiente e com a qualidade da água deixada para as gerações futuras, é importante que se busque por alternativas criativas, autosustentáveis e que gerem o mínimo de dano aos ecossistemas e aos

recursos naturais de nosso planeta. Portanto, alternativas como a eletrocoagulação devem ser cuidadosamente estudadas e analisadas, para saber exatamente onde utilizar este método de tratamento.

Por se tratar de um processo onde os ions atuam naturalmente como agentes coagulantes, ou seja, sem a utilização de coagulantes químicos, a eletrocoagulação não gera poluição secundária e diminui muito a geração de lodo comparado com outros métodos de tratamento, sendo que este lodo é não tóxico (MOUSSA *et al.*, 2016). Com isso, diminuiria a necessidade de descarte deste lodo em aterros sanitários, que estão cada vez mais saturados e sobrecarregados devido a grande quantidade de indústrias instaladas, principalmente nas grandes cidades.

Ainda segundo Moussa *et al.* (2016), trata-se de um processo com baixa pegada ecológica, que gera flocos maiores e mais estáveis, facilmente separáveis por filtração comum e sua viabilidade se assegura pelo fato de que a eletrocoagulação pode ser automatizada e a área demandada pelo reator é menor. Até mesmo as menores partículas coloidais podem ser removidas do efluente através desta técnica.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os próximos capítulos descreverão os processos industriais do vinho, impactos ambientais relacionados com a vinificação e alguns fundamentos a respeito do processo de eletrocoagulação.

### 2.1 O PROCESSO DE VINIFICAÇÃO

O vinho, segundo Hashizume (1975 *apud* ORTIGARA, 2009), é uma bebida que provem da fermentação alcoólica de açúcares presentes no suco de uva, fermentação essa que ocorre graças a leveduras e, em alguns casos, por bactérias lácticas.

Pode-se dividir a uva em duas partes distintas: o engaço, parte lenhosa ou herbácea que sustenta os grãos, rico em minerais, resinas e taninos, e a baga ou grão, que contém de 85 a 92% de polpa, 6 a 12% de casca e 2 a 5% de semente, ricos em água, açúcares e ácidos orgânicos. (HASHIZUME, 1975 *apud* ORTIGARA, 2009).

O vinho branco é obtido através da fermentação de um mosto de aspecto mais claro, obtido após o processo de clarificação, ou seja, após a retirada das cascas e das sementes para posterior esmagamento dos grãos de uva, ao passo que o vinho tinto é preparado a partir de mostos não clarificados (RODRIGUES et. al., 2006).

As entradas e saídas do sistema de produção estão resumidas no quadro a seguir (quadro 1):

**Quadro 1 – Fluxo de materiais no processo de vinificação**

Vinícola	
Entradas	Saídas
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uvas</li> <li>• Água</li> <li>• Produtos enológicos (ácido tartárico, caseína, albumina, leveduras...)</li> <li>• Terras de filtração (bentonite, gel de sílica...)</li> <li>• Gases (Sulfuroso, Azoto, CO<sub>2</sub>...)</li> <li>• Garrafas, rótulos, embalagens, etc.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vinho</li> <li>• Efluentes</li> <li>• Águas “limpas” (de arrefecimento)</li> <li>• Subprodutos (bagaço, engaço, borras...)</li> <li>• Efluentes e resíduos de destartarização</li> <li>• Resíduos de filtração</li> <li>• Resíduos de embalagens.</li> </ul>

Fonte: Adaptado de Pirra (2005).

### 2.1.1 Etapas do Processo

O processo de produção de vinhos possui as seguintes etapas:

#### a) Recepção das uvas

Pode ocorrer de diversas formas, como em grandes tonéis ou em caixas, a depender da vinícola em questão. O ponto crítico é que deve se evitar que as uvas já venham maceradas ou danificadas, pois se houver contaminação bacteriana e temperaturas elevadas, pode desencadear o processo de fermentação (PIRRA, 2005). Os efluentes advindos desta etapa se originam através da lavagem do maquinário utilizado na colheita e na lavagem do piso onde ocorre o acondicionamento das uvas (VLYSSIDES et. al., 2005).

#### b) Esmagamento/Desengace

O esmagamento através de prensas hidráulicas ou, em uma produção mais tradicional, através de pisa-a-pés, rompe a película que envolve os bagos de uva, gerando uma massa heterogênea conhecida como mosto, provocando a aeração necessária para que esta massa entre em contato com as leveduras necessárias para a fermentação (PIRRA, 2005). Além dos efluentes gerados através da limpeza do maquinário utilizado para o esmagamento, limpeza de piso, perda de mosto durante a transferência de recipientes e pré-lavagem para o processo de fermentação, existe também uma grande produção de resíduos sólidos durante esta etapa, visto que a taxa de volume de vinho gerado é de aproximadamente 80 litros de vinho para 100 kg de uvas (VLYSSIDES et. al., 2005).

O desengace consiste na remoção da parte herbácea/lenhosa da fruta. Ainda que em algumas adegas o engaço seja tratado apenas como um resíduo sólido, ele é um importante componente durante o processo de co-compostagem, que dará origem a produção de corretivos orgânicos (PIRRA, 2005).

#### c) Fermentação

Após passar por uma desinfecção, correção de parâmetros e, em alguns casos, adição de leveduras ou enzimas, o mosto é transferido para as cubas de fermentação, preenchidas com cerca de 80% de seu volume total, onde ficarão sofrendo fermentação alcoólica por cerca de 15 dias ou mais, a depender das diretrizes de produção da vinícola (PIRRA, 2005). Durante este processo, nenhum tipo

de efluente é gerado a não ser que haja perdas durante a transferência entre cubas (VLYSSIDES et. al., 2005).

Em alguns tipos de vinho tinto, nesta etapa também ocorre o processo de maceração e montagem. A maceração consiste em promover o contato da película com o mosto, originando características visuais, olfativas e gustativas, enquanto o processo de montagem ocorre a homogeneização da cuba e mergulho na manta, visando facilitar o contato do mosto com as películas, para extração de cor e aromas (PIRRAS, 2005).

#### d) Decantação/Prensagem

O mosto fermentado segue agora para as cubas de decantação para a separação do vinho e de um novo componente no processo de fabricação conhecido como borra, composta por resíduos de uvas, leveduras, bactérias e substâncias estranhas que devem ser removidas do vinho (PIRRA, 2005). As águas residuais deste processo provém da lavagem das cubas, pré-lavagem dos tanques de estabilização, das bombas que separam a borra do vinho e das perdas durante a decantação (VLYSSIDES et. al., 2005).

Com o intuito de fazer com que o bagaço das uvas resultante do processo anterior seja completamente enxugado a fim de se obter aproveitamento máximo da produção, o processo de prensagem também é comum em algumas vinícolas, para a obtenção do mosto residual de uvas esmagadas (PIRRA, 2005).

#### e) Fermentação Malolática

É um processo utilizado principalmente em vinhos tintos, consistindo na fermentação do ácido málico para obtenção do ácido láctico, tendo como consequência o amaciamento do vinho e diminuição de sua acidez característica (PIRRA, 2005). Ainda segundo Pirra (2005), trata-se de um processo simples, mas que agrega grande qualidade aos vinhos produzidos.

#### f) Estabilização e acabamento

Com o objetivo de fazer os devidos ajustes de  $\text{SO}_2$  e do pH do vinho produzido, o produtor de vinho executa uma ou mais operações denominadas de estabilização, que podem ser sucedidas por processos de colagem e/ou refrigeração a fim de promover a precipitação de tartaratos residuais (PIRRA, 2005). Durante esta operação, não ocorre a geração de efluentes (VLYSSIDES et. al., 2005).

#### g) Filtração

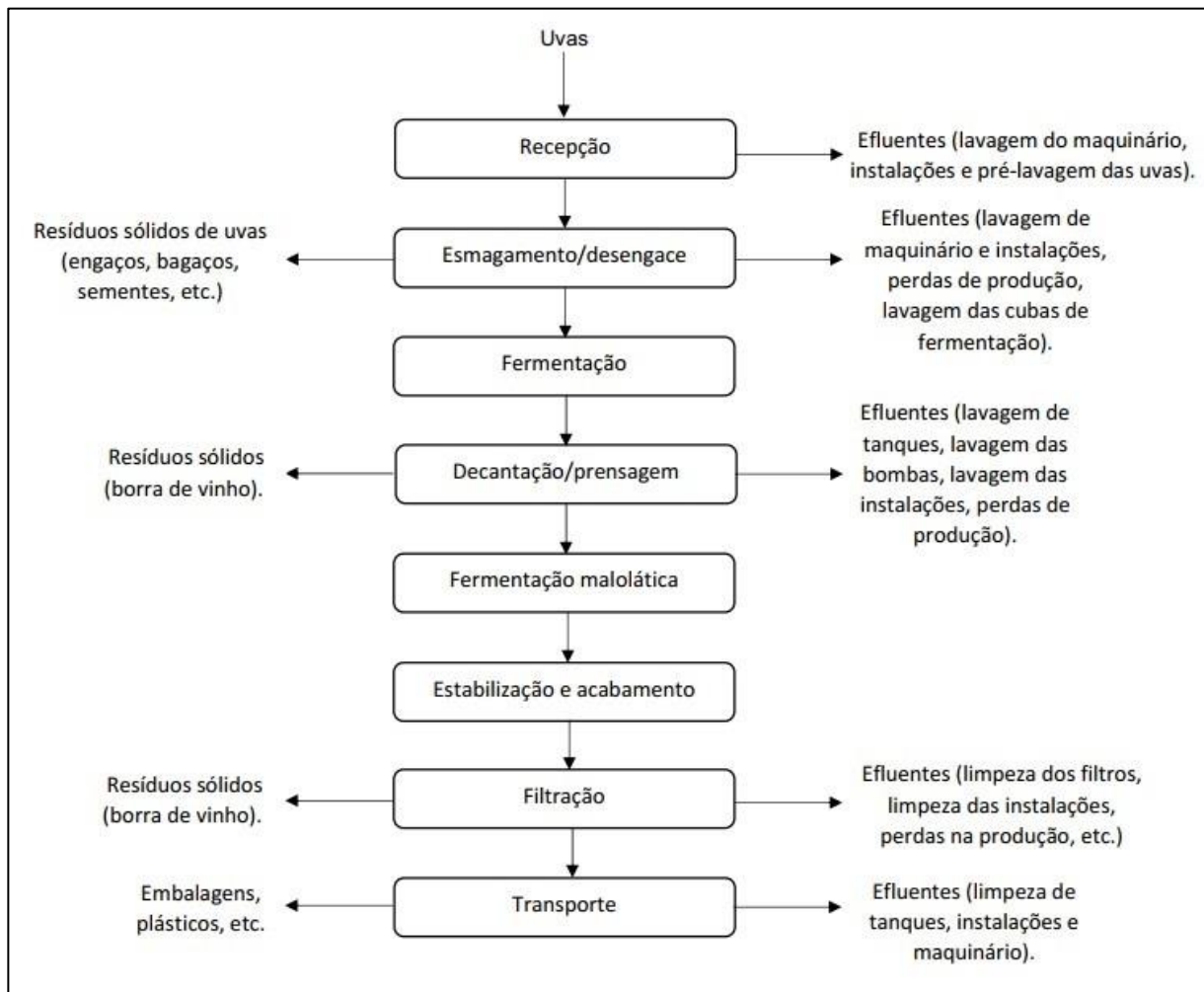
Agora, o vinho produzido, com o objetivo de aumentar a sua qualidade, sofre filtração através de filtros de terra diatomácea, decantado e transferido para tanques vazios, gerando águas residuais através da lavagem de tanques, limpeza de filtros, pré-lavagem dos tanques de estocagem, limpeza das bombas de sucção e perdas materiais durante transferências entre os locais de armazenamento (VLYSSIDES et. al., 2005).

#### h) Transporte

O vinho produzido é engarrafado, encaixotado e transferido para os caminhões de transporte, sendo levados para centros de distribuição e, posteriormente, entrando em contato com o público consumidor, gerando efluentes através das lavagens de tanques e bombas de sucção, além dos resíduos sólidos oriundos do processo de envase e empacotamento (VLYSSIDES et. al., 2005).

A seguir, a figura 1, que resume as etapas dos processos que constituem a produção de vinhos, comuns a vários tipos de vinícolas, e a geração de resíduos em cada um destes processos:

**Figura 1 - Fluxo de processos na produção de vinhos e rejeitos gerados**



Fonte: Adaptado de Vlyssides *et. al.* (2005).

### 2.1.2 Impactos Ambientais

Os resíduos gerados por diferentes vinícolas são, em essência, os mesmos, o que irá diferenciar as unidades produtoras é a escala de produção (ORTIGARA, 2009). Comumente, encontra-se, entre os resíduos gerados, sólidos orgânicos (bagaço, casca, sementes, engaço, etc.) proveniente das uvas, sólidos inorgânicos (terra de diatomácea, produtos de filtração, etc.), gases (CO<sub>2</sub>, compostos voláteis) e efluentes oriundos de lavagens durante os processos supracitados (MUSEE *et. al.*, 2005).

Impactos ambientais normalmente associados a produção de vinhos incluem a poluição de corpos hídricos, degradação do solo e danos à vegetação ocasionados

pela má gestão e destinação de efluentes e resíduos gerados no processo, além da geração de maus odores decorrentes da degradação dos resíduos sólidos e poluição sonora por conta do maquinário (EPA, 2017).

Segundo Silva (2003), os subprodutos vinícolas podem ser reaproveitados das mais diversas formas: A partir do bagaço podemos extrair álcool, corantes e utilizá-lo como fertilizante, o engaço pode ser aproveitado na indústria de papel e produção de combustível, a grainha pode ser usada na extração de óleos e ser incorporada em adubos e rações animais e as borras, de grande valor comercial, pode ser utilizada para recuperação do ácido tartárico, produção de corantes e incorporação ao solo como meio de fertilização orgânica, e as quantidades de subprodutos geradas estão resumidas na tabela a seguir (tabela 1):

**Tabela 1 – Produção de subprodutos durante a vinificação (branco e tinto)**

<b>Subprodutos</b>	<b>Vinificação em branco (kg/hl)</b>	<b>Vinificação em tinto (kg/hl)</b>	<b>Média (kg/hl)</b>
Engaços	4,00	3,00	3,50
Bagaço	17,00	13,50	14,50
Grainha	4,00	4,00	4,00
Borra (líquida)	6,00	4,40	4,60
Sarro	0,17	0,10	0,12

**Fonte: Costa e Belchior (1972 *apud* Silva, 2003)**

O quadro a seguir (quadro 2) resume os impactos ambientais e na saúde humana que a má gestão de resíduos pode ocasionar:



**Quadro 2 - Potenciais impactos no ambiente decorrentes da atividade vinícola**

<b>Constituinte do resíduo de vinícola</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Efeitos</b>
1. Matéria orgânica	DBO, DQO e carbono orgânico total	Causa esgotamento do oxigênio na água, levando a morte de peixes e outros organismos aquáticos.  Odores gerados através da decomposição anaeróbica causam incômodo, caso armazenados em lagoas abertas ou aplicados ao solo.
2. Alcalinidade/acidez	pH	Morte de organismos aquáticos sensíveis ao pH.  Afeta microorganismos em tratamentos biológicos de águas residuais.  Afeta a solubilidade de metais pesados no solo.  Prejudica a produtividade agrícola.
3. Nutrientes	N, P, K	Eutrofização de corpos hídricos.  Nitrogênio, na forma de nitratos e nitritos, na água bebida por bebês, pode ser prejudicial à saúde.  Tóxico para culturas agrícolas em larga escala.
4. Salinidade	Condutividade elétrica, Sais dissolvidos totais	Confere sabor indesejável à água.  Tóxico para organismos aquáticos.  Afeta a absorção de água pelas plantações.
5. Níveis de sódio	Taxa de adsorção de sódio, percentual de sódio trocável	Afeta a estrutura do solo, resultando em um endurecimento superficial, reduzindo a infiltração e a condutividade hidráulica, gerando um subsolo denso.
6. Metais pesados	Cádmio, cromo, cobalto, cobre, níquel, chumbo, zinco, mercúrio	Tóxico para plantas e animais.
7. Sólidos	Sólidos suspensos totais	Reduz a porosidade do solo, resultando em baixa incorporação de oxigênio.  Pode reduzir a penetração de luminosidade em rios e lagos, comprometendo ecossistemas aquáticos.  Sufoca habitats.  Maus odores gerados a partir da decomposição anaeróbia.

Fonte: EPA (2017).

## 2.2 TRATAMENTOS DO EFLUENTE VINÍCOLA

Vários tipos de tratamento que já vêm sendo empregados em tratamentos de efluentes industriais convencionais podem ser utilizados para o tratamento do efluente vinícola. Países referência mundial em produção de vinho, como França, Espanha e Itália, utilizam alta tecnologia para o tratamento, enquanto no Brasil, se observa constantemente o uso de sistemas como filtros e reatores biológicos, lagoas de estabilização, coagulação e decantação (LECHINHOSKI, 2015).

Observa-se bons resultados tanto em tratamentos físico-químicos, quanto biológicos, principalmente em relação a remoção de DQO, que pode chegar a 98% (LECHINHOSKI, 2015).

### 2.2.1 Tratamento Biológico

Ortigara (2009) cita como alguns exemplos de reatores com biomassa aderida os filtros biológicos, biodiscos ou reatores biológicos de contato rotativo, reatores de leito fluidizado e reatores de leito fixo granular ou estruturado, técnicas que usam meios de suporte sintéticos ou carvão ativado para microorganismos que degradam biologicamente a matéria orgânica do efluente. Nestes tipos de reatores, as bactérias formam uma camada densa chamada biofilme que adere ao meio suporte e as deixam protegidas (HENZE; HARREMOËS, 1996).

Amaiz *et al.*, (2004), empregando uma técnica tratamento de efluente vinícola através de reator de leito fluidizado com biofilme (de leito turbulento inverso), obteve de 70 a 92% de taxa de remoção de carbono para um efluente com cerca de DQO de 30,6 kg/m<sup>3</sup>.d e tempo de retenção hidráulica de 11,1 horas. Andreatolla *et al.* (2005) empregaram um reator de biofilme em leito fixo no efluente vinícola, obtendo 80% de remoção de DQO no primeiro estágio do experimento, com 2,4 kgDQO/m<sup>3</sup>.d e 51% de remoção de DQO para 1,3 kgDQO/m<sup>3</sup>.d.

Segundo a NBR 13.969/97, o biofiltro aerado submerso é um tipo de tratamento no qual um meio suporte é imerso em um reator para que microorganismos fiquem aderidos e causem a depuração do esgoto e equipamentos de aeração fornecem o oxigênio necessário para o processo (ABNT, 1997). Ortigara *et al.* (2010) fizeram tratamentos de efluentes vinícolas nos períodos de safra e entre-safra,

utilizando biofiltro aerado submerso de fluxo ascendente, obtendo uma remoção de DQO de 90% para o período de safra e 82% no período de entre-safra, além de um acréscimo de alcalinidade de, respectivamente, 180 mg.L<sup>-1</sup> e 318 mg.L<sup>-1</sup> para efluentes que apresentavam características ácidas.

No sistema de lodos ativados, o efluente passa por reações bioquímicas em um reator contendo biomassa, seguindo para um decantador secundário onde ocorrerá a sedimentação dos sólidos, fazendo com que o efluente saia clarificado e os sólidos passarão por um sistema de recirculação para o reator, garantindo uma elevada eficiência do sistema (VON SPERLING, 2016). Brucculeri *et al.* (2005), através de co-tratamento municipal e efluente de vinificação obteve uma redução de 90% de DQO para 9 kgDQO/m<sup>3</sup> no período de safra e 6,5 kgDQO/m<sup>3</sup> no período de entre-safra utilizando o sistema de lodos ativados.

### **2.2.2 Tratamento Físico-Químico**

Inúmeros métodos têm sido testados com o objetivo de remover a cor e a carga biológica residual de efluentes vinícolas após o emprego de tratamentos biológicos, tais como processos de adsorção, coagulação/floculação, oxidação e filtração por membrana (LUCAS; PERES, 2011).

Inanc *et al.* (1999), através de experimentos de coagulação/floculação, que consiste na utilização de sais metálicos para a desestabilização de partículas coloidais, formando flocos e precipitando no fundo do recipiente, chegaram a conclusão de que sulfatos de alumínio e ferro não são eficazes na remoção de cor do efluente, pois os compostos responsáveis por esta coloração são solúveis e resistentes à degradação. Ainda neste estudo, chegou-se a conclusão de que, após tratamento anaeróbio, o emprego de 10,0 g/L de cal aplicado ao efluente pode produzir uma remoção de DQO de 82,5% e 67,6% de redução de cor, após período de 30 minutos. Braz *et al.* (2010), empregando sulfato de alumínio ao efluente vinícola, atingiram uma redução de turbidez de 92,6% e remoção de 95,4% de sólidos suspensos totais utilizando cal. A próxima etapa deste estudo consistiu em combinar processos biológicos aeróbios (armazenamento arejado prolongado) e coagulação/floculação com cal, obtendo 84,5% de remoção de DQO, 96,5% de redução de turbidez e 99,1% de remoção de sólidos suspensos totais.

No processo de adsorção, o efluente passa por um meio adsorvente responsável por reter ou fixar substâncias indesejadas, onde a principal variável de eficiência é a área de contato (METCALF; EDDY, 1991). Porras (2002) relata uma eficiência de remoção de cor utilizando carvão ativado como meio adsorvente de quase 100%, através de uma granulometria abaixo de 0,150 mm, e elevada eficiência na remoção de DQO, a depender das características da substância que confere a cor ao efluente e de outros produtos químicos utilizados no processo. Existem ainda outros meios adsorventes que podem ser utilizados, como cerâmicas e resíduos sólidos reciclados advindos da construção civil (LECHINHOSKI, 2015).

Processos de oxidação avançada (POA) envolvem a geração de radicais reativos, como o  $\text{OH}^\cdot$ , que reagem com uma grande variedade de compostos orgânicos, sendo muito eficiente para o tratamento de águas residuais refratárias e removendo com sucesso as principais substâncias do efluente vinícola, como alcoóis, fenóis, ácidos e açúcares (LUCAS; PERES, 2011). Através da oxidação com reagente de Fenton, de Heredia *et al.* (2005) obtiveram uma remoção maior que 90% de compostos aromáticos e polifenóis presentes no efluente de vinificação, grande parte devido ao baixo pH (< 5,0) que este tipo de efluente possui, o que torna este processo bastante promissor para este tipo de efluente.

Lucas *et al.* (2010) avaliaram, através do processo de oxidação com ozônio combinado com radiação UV e peróxido de hidrogênio ( $\text{O}_3/\text{UV}/\text{H}_2\text{O}_2$ ) que é possível obter uma degradação de 90% de DQO em um efluente vinícola, com um consumo de ozônio de cerca de 70 a 95% ao final do processo e encontrando taxas de remoções ótimas com pH inicial de 7 a 10.

### 2.3 FUNDAMENTOS DA ELETROCOAGULAÇÃO

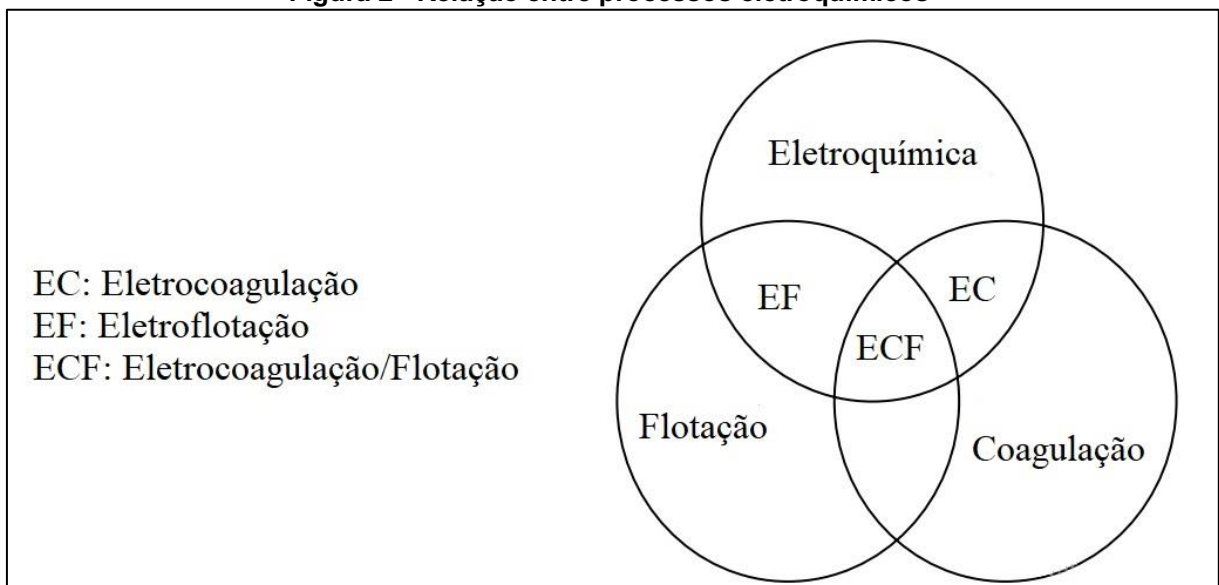
Segundo Bensadok *et al.* (2007), o processo de eletrocoagulação acontece quando há uma oxidação por parte do ânodo de sacrifício, fazendo com que ocorra liberação de íons metálicos na solução, ao mesmo tempo em que ocorre uma redução no cátodo, formando hidroxilas através da hidrólise da água. Então, íons metálicos unem-se aos íons hidroxila, originando hidróxidos metálicos que desestabilizam partículas suspensas, formando flocos, que serão separados do líquido por sedimentação ou flotação.

Mollah *et al.* (2001) define a eletrocoagulação como um processo responsável pela criação de hidróxidos metálicos em efluentes através da eletrodissolução de ânodos solúveis, usualmente, compostos de ferro ou alumínio.

Existem várias nomenclaturas para este processo presentes na literatura, como eletrofloculação ou eletroflotação (EF), eletrocoagulação (EC) ou eletrocoagulação e flotação (EMAMJOMEH; SIVAKUMAR, 2009).

A figura a seguir (figura 2) demonstra graficamente a interação entre os processos de coagulação, flotação e a eletroquímica, para isto utilizando-se da teoria dos conjuntos:

**Figura 2 - Relação entre processos eletroquímicos**



Fonte: Adaptado de Emamjomeh e Sivakumar, 2009.

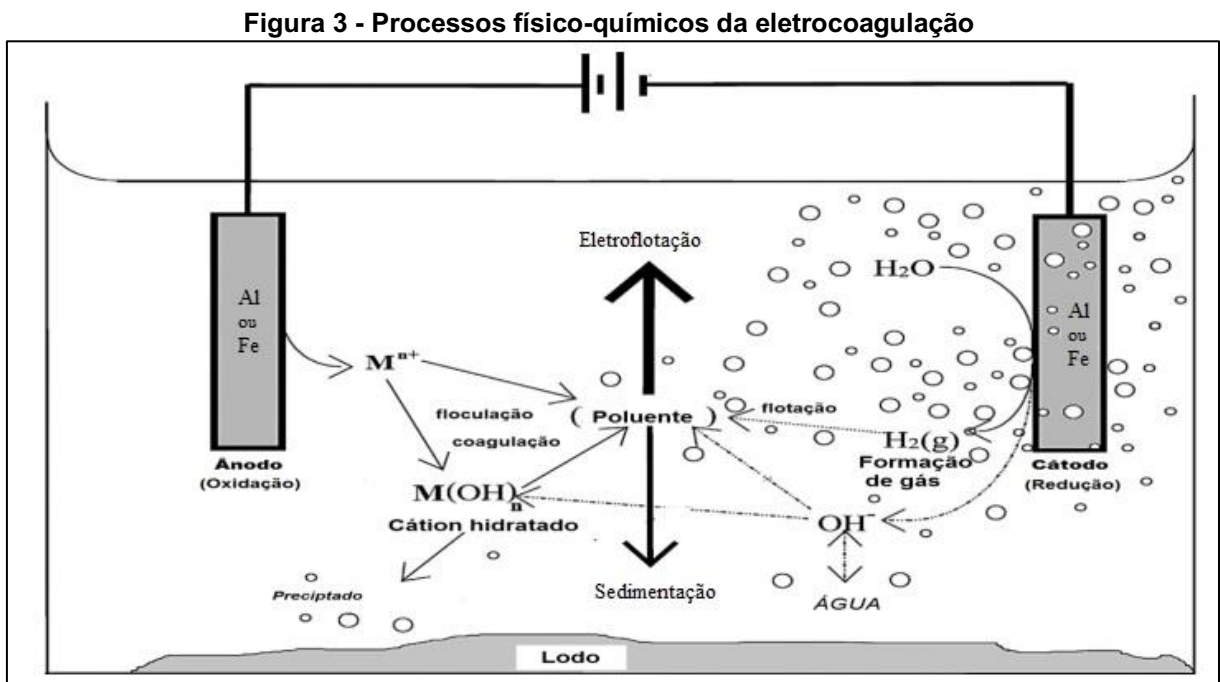
### 2.3.1 Reações Envolvidas

No efluente, serão inseridos eletrodos metálicos, que serão carregados com corrente elétrica, para que a corrente flua do cátodo para o ânodo utilizando-se dos íons existentes na água, sendo que a intensidade da corrente na área dos eletrodos (densidade de corrente) é um dos parâmetros a se observar a fim de obter melhores resultados neste processo (CHEN, 2004).

O processo de coagulação ocorre da mesma forma que aqueles utilizados em processos de coagulação convencionais, como cloretos de alumínio ou ferro, provocando a desestabilização de partículas coloidais e neutralização da carga das

mesmas, formando flocos maiores que podem ser removidos por sedimentação ou flotação (CHEN, 2004; EMAMJOUMEH; SIVAKUMAR, 2009).

A figura a seguir (figura 3) mostra esquematicamente o esquema de funcionamento de uma célula eletrolítica, onde através da introdução de uma fonte de corrente elétrica, o ânodo libera íons na solução responsáveis por originar os agentes floculantes e o cátodo, além de introduzir hidroxilas na solução, é responsável pela geração de bolhas através da formação do gás hidrogênio:



Fonte: Adaptado de Holt *et al.* (2002)

Os metais mais utilizados como eletrodos durante o processo de eletrocoagulação são de ferro, zinco ou alumínio, sendo o de ferro mais utilizado para tratar efluentes, devido ao seu custo baixo, e o eletrodo de alumínio o mais utilizado para tratamento de água, devido a sua elevada taxa de eficiência (VASUDEVAN; OTURAN, 2014).

Attour *et al.* (2014) descreve o processo de eletrocoagulação em 3 etapas: (1) A geração de íons através da oxidação do ânodo de sacrifício e redução do cátodo, comprimindo a dupla camada difusa de partículas carregadas, (2) as cargas dos íons presentes no efluente são neutralizadas, permitindo com que as forças de Van der Waals sejam maiores em relação às forças de repulsão entre as partículas do efluente, fazendo o somatório de cargas ser igual a zero, e (3) formação de flocos decorrentes

da coagulação, formando uma manta de lodo precipitado no fundo do recipiente ou na superfície, decorrente da flotação.

As possíveis reações químicas para eletrodos de alumínio e ferro (CHEN, 2004) são:

a) Para ânodo de alumínio:



b) Sob condições alcalinas:



c) Sob condições ácidas:



d) Para ânodo de ferro:



e) Sob condições alcalinas:



f) Sob condições ácidas:



g) Reação do oxigênio:



h) Reação no cátodo:



Segundo Chen (2004), os íons de  $\text{Al}^{3+}$  e  $\text{Fe}^{2+}$  possuem elevada eficiência como agentes coagulantes para partículas que podem formar flocos, devido a sua capacidade de formar longas cadeias no formato Al-O-Al-OH, ou similarmente para o íon de ferro, sendo capaz de absorver diversos tipos de poluentes, como o  $\text{F}^-$ .

O resultado é a aglomeração dos poluentes presentes no efluente, formando um precipitado no fundo do recipiente ou uma camada flutuante, que podem ser mais facilmente removidos da fase aquosa (MOLLAH *et al.*, 2001).

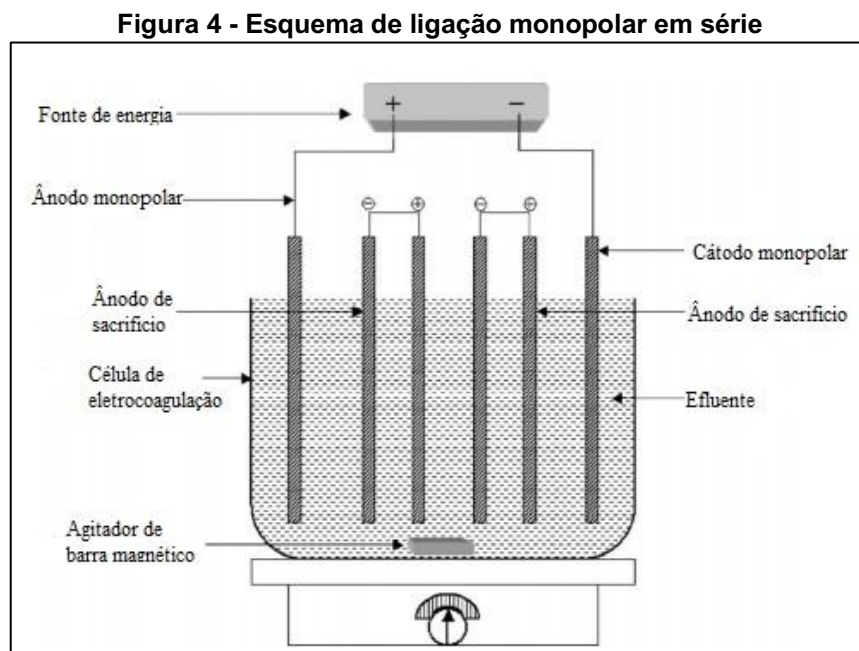
### 2.3.2 Esquemas de Ligação

De acordo com Mollah *et al.* (2004), o arranjo de dois eletrodos em uma cuba de eletrocoagulação, como o apresentado pela figura 3, não é viável em grande escala, pois para se manter uma boa relação entre a vida útil dos eletrodos e a

periodicidade de manutenção, maiores áreas de eletrodos são necessárias para compensar a perda por dissociação.

Em um esquema de ligação monopolar em série, para a célula de eletrocoagulação, ânodos de sacrifício são dispostos entre os dois eletrodos, cada um deles ligado a um polo da fonte de energia. Este tipo de ligação demanda uma maior diferença de potencial, pois eletrodos conectados em série apresentam maior resistência (MOLLAH *et al.*, 2004).

A figura 4 a seguir exemplifica, esquematicamente, um esquema de ligação do tipo monopolar em série:



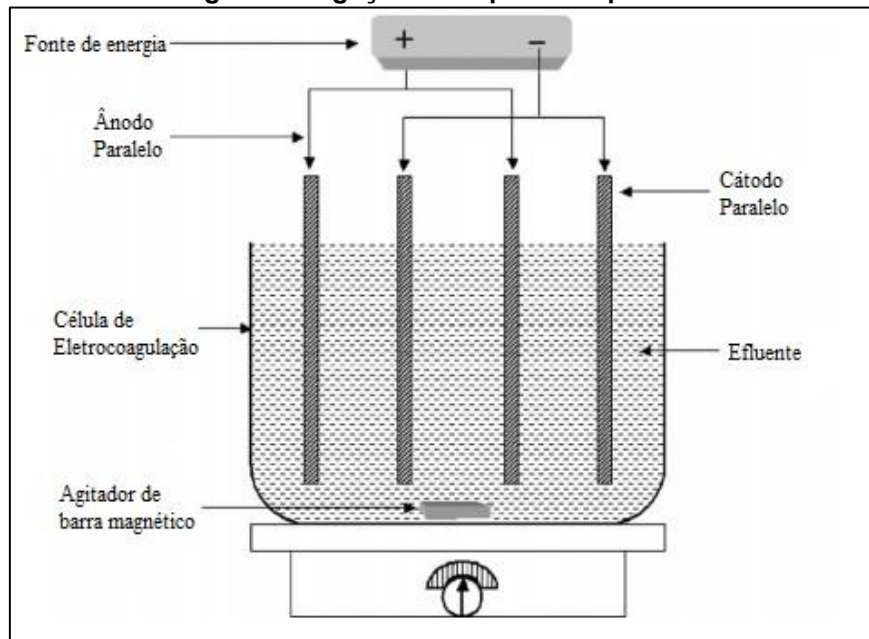
Fonte: Adaptado de Mollah *et al.* (2004).

Em um esquema de ligação em paralelo, pares de ânodos e cátodos são ligados aos polos da fonte de eletricidade. Enquanto que na ligação em série a corrente elétrica se distribui de forma igual nos eletrodos, na ligação em paralelo, por apresentar resistências diferentes, ela se distribui de forma desigual nos eletrodos (MOLLAH *et al.*, 2004).

O esquema de ligação monopolar em paralelo está esquematicamente representado através da figura a seguir (figura 5):



**Figura 5 - Ligação monopolar em paralelo**

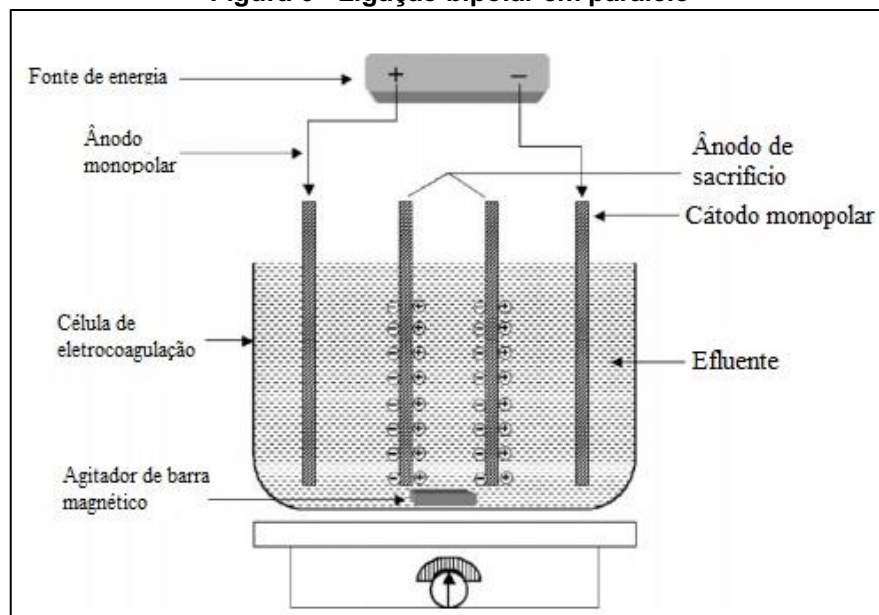


Fonte: Adaptado de Mollah *et al.* (2004).

Há também o esquema de ligação bipolar em paralelo, como mostrado na figura 6, onde os metais de sacrifício, posicionados entre os eletrodos, não possuem conexão com a rede elétrica, tornando mais fácil a execução de serviços de manutenção (MOLLAH *et al.*, 2004).

A figura 6 apresenta ao leitor o esquema de ligação bipolar em paralelo:

**Figura 6 - Ligação bipolar em paralelo**



Fonte: Adaptado de Mollah *et al.* (2004).

### 2.3.3 Parâmetros que Influenciam o Processo de Eletrocoagulação

Segundo Moussa *et al.* (2016), inúmeros fatores podem afetar a eficiência de remoção de poluentes através da eletrocoagulação. Os principais fatores são apresentados a seguir:

#### 2.3.3.1 Material dos eletrodos

Os materiais mais utilizados em eletrodos para o tratamento de água e efluentes são, respectivamente, alumínio e ferro, devido ao baixo custo e grande disponibilidade no mercado (MERMA, 2008).

Eletrodos de ferro apresentam a desvantagem de conferir ao efluente, após o tratamento, uma coloração residual verde ou amarela, proveniente dos íons  $\text{Fe}^{2+}$  e  $\text{Fe}^{3+}$ , respectivamente (MERMA, 2008). Em situações de alta alcalinidade, eletrodos de ferro tendem a formar a substância  $\text{Fe}(\text{OH})_4^-$ , que é um coagulante fraco e diminui a eficiência da eletrocoagulação (MOUSSA *et al.*, 2016).

Deve-se ter cuidado com a utilização de eletrodos de alumínio, pois resíduos deste tipo de eletrodo podem ser encontrados no lodo formado no processo de eletrocoagulação, sendo tóxicos para plantas e estando ligados ao mal de Alzheimer e certos tipos de carcinomas (STAHL *et al.*, 2017).

#### 2.3.3.2 Densidade de corrente

A densidade de corrente pode ser expressa através da equação 11 (MERMA, 2008):

$$\delta = \frac{I}{A_{\text{ânodo}}} \quad (9)$$

Onde  $\delta$  é a densidade de corrente ( $\text{A}/\text{m}^2$ ),  $I$  é a corrente elétrica (A) e  $A_{\text{ânodo}}$  é a área total dos ânodos ( $\text{m}^2$ ). Segundo Merma (2008), densidades de corrente muito altas resultam em diminuição da eficiência do sistema de eletrocoagulação, visto que aumenta as chances de que parte da corrente elétrica seja desperdiçada no

aquecimento da água. Moussa *et al.* (2016) explica que a densidade de corrente determina a taxa de dissociação de íons no meio aquoso e que existe um valor crítico a partir do qual o aumento da densidade de corrente não apresenta melhorias significantes no processo de tratamento de efluentes. No estudo de Merma (2008), este valor foi de 11,15 mA/cm<sup>2</sup>.

#### 2.3.3.3 pH

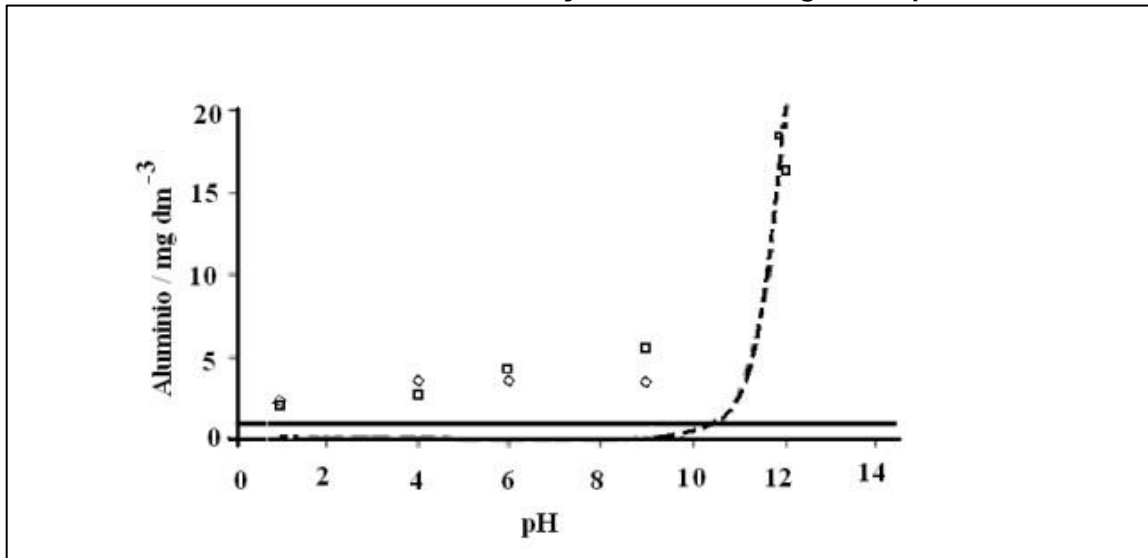
O efeito do pH, segundo Chen (2004) reflete-se, principalmente, na densidade de corrente e na solubilidade de hidróxidos metálicos, esperando-se maiores eficiências de corrente em eletrodos de alumínio, tanto em meios básicos quanto ácidos. Para Merma (2008), o tamanho das bolhas formadas, que interfere diretamente no processo de eletroflotação, depende diretamente do pH do efluente, sendo bolhas de hidrogênio menores em pH neutro e bolhas de oxigênio aumentando com o incremento do pH.

O consumo de energia também apresenta mudanças de acordo com a variação de pH, pois este determina a condutividade do efluente, sendo maior em pH neutro (CHEN, 2004).

Para Moussa *et al.* (2016), ainda que se saiba que o pH possui influência no processo de eletrocoagulação, é difícil estabelecer uma relação direta entre o pH do efluente e a eficiência do processo.

Para valores mínimos de pH, a taxa de dissolução química de eletrodos de alumínio é próxima de zero, e aumenta significativamente quando a solução se torna básica, como mostrado no gráfico (gráfico 1) a seguir (CAÑIZARES *et al.*, 2005 *apud* MERMA, 2008):

Gráfico 1 - Taxa de dissociação de alumínio segundo o pH



Fonte: adaptado de Cañizares *et al.* (2005, *apud* Merma, 2008).

Para Chen (2004), a máxima eficiência para remoção de poluentes encontrados em efluentes pode ser obtida através da combinação da utilização de eletrodos de alumínio e pH neutro, próximo de 7.

#### 2.3.3.4 Temperatura

Mesmo depois de um século de investigações sobre a eletrocoagulação, o efeito da temperatura foi pouco discutido em trabalhos científicos, ainda que se tenha noção de que maiores temperaturas signifiquem maior condutividade do efluente, e por consequência, menor consumo de energia (CHEN, 2004).

Para temperaturas muito altas, há uma diminuição nos poros do gel  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , resultando em flocos mais compactos que têm maior probabilidade de se depositarem sobre o eletrodo de alumínio (CHEN, 2004).

#### 2.3.3.5 Distância dos eletrodos

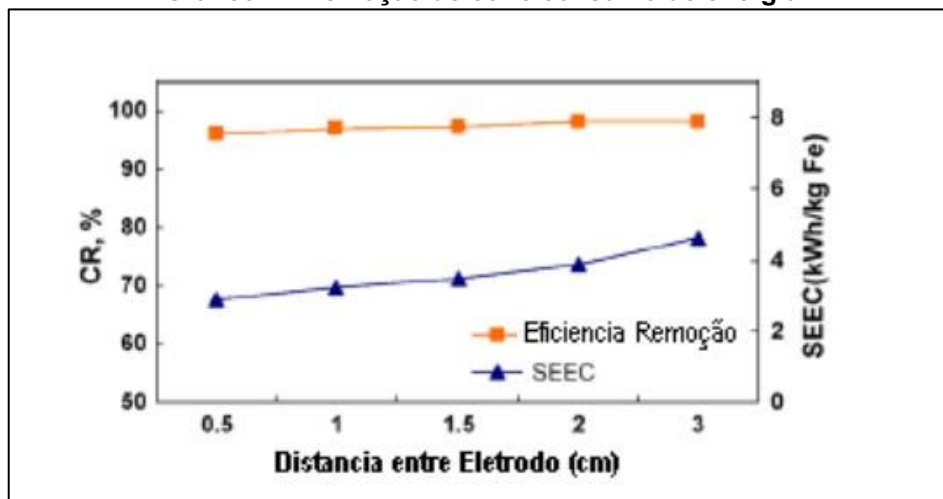
Segundo Crespilho *et al.* (2004, *apud* FERREIRA, 2006), a distância entre os eletrodos é um importante fator econômico no processo de eletrocoagulação, pois, na presença de uma alta condutividade de um efluente, se opta por um maior distanciamento entre eletrodos, enquanto que com valores mais baixos de

condutividade, diminui-se a distância entre eles, resultando em menor consumo de energia através da inalteração da quantidade de corrente elétrica empregada.

Para Ferreira (2006), a solução deve possuir um valor mínimo de condutividade elétrica para que a eficiência de remoção de resíduos não seja alterada em função do espaçamento dos eletrodos.

Um estudo dos autores Daneshvar *et al.*, (2007) avaliando os efeitos da remoção de cor e o consumo de energia em função do espaçamento de eletrodos no processo de eletrocoagulação concluiu que o incremento de distância entre eletrodos aumenta ligeiramente a remoção de cor da solução, contudo, aumenta significativamente o consumo de energia, segundo os autores, pois os íons se movem mais lentamente, causando um incremento na queda de potencial, aumentando a corrente elétrica, como apresentado no gráfico a seguir (gráfico 2):

Gráfico 2 - Remoção de cor e consumo de energia



Fonte: adaptado de Daneshvar *et al.* (2007, *apud* Merma, 2008).

### 2.3.4 Vantagens e Desvantagens da Eletrocoagulação

O quadro 3 apresenta as vantagens e desvantagens operacionais do processo de eletrocoagulação (MOLLAH *et al.*, 2001) :

**Quadro 3 - Vantagens e desvantagens da EC**

Vantagens	Desvantagens
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. EC requer equipamentos simples e é fácil de operar;</li> <li>2. Efluente tratado com EC resulta em água palatável e clara, sem cores ou odores;</li> <li>3. O lodo formado pelo processo de EC tende a decantar e é facilmente removido, por ser formado de óxido/hidróxidos metálicos, além de que a EC produz menos lodo;</li> <li>4. Flocos formados no processo de EC são iguais aos formados por coagulação química, exceto pelo fato de que são maiores, contém menos água aderida, são resistentes a ácidos e são mais estáveis, além de poderem ser removidos via filtração;</li> <li>5. EC produz efluente com menos sólidos totais dissolvidos (STD) comparado com tratamentos químicos, o que contribui para um baixo custo de recuperação de água para reuso;</li> <li>6. EC remove partículas coloidais pequenas pois o campo elétrico aplicado aumenta sua energia cinética;</li> <li>7. EC evita o uso de substâncias químicas, o que diminui problemas com neutralização de excesso de concentração dessas substâncias (poluição secundária);</li> <li>8. As bolhas de gás produzidas na EC carregam poluentes para a superfície do efluente, facilitando a sua remoção;</li> <li>9. A EC é controlada por sistemas elétricos, sem muitas partes móveis, facilitando a manutenção;</li> <li>10. A técnica de EC pode ser utilizada em zonas sem eletricidade, pois um painel solar tem energia suficiente para realizar o processo.</li> </ol>	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Os eletrodos de sacrifício se dissolvem na água tratada e precisam ser regularmente substituídos;</li> <li>2. O uso de energia elétrica pode ser caro em alguns locais;</li> <li>3. Uma camada impermeável composta de óxido tende a se formar no cátodo, levando a perda de eficiência na unidade de EC;</li> <li>4. O efluente precisa de uma alta eletrocondutividade;</li> <li>5. Alguns hidróxidos gelatinos formados no processo tendem a se solubilizar.</li> </ol>

Fonte: Adaptado de Mollah *et al.* (2001).

## 2.4 ESTUDOS SOBRE ELETROCOAGULAÇÃO APLICADA AO EFLUENTE VINÍCOLA

Apesar de haver inúmeros estudos sobre o efluente advindo de vinícolas e sobre eletrocoagulação, até o momento existe pouco material disponível na literatura juntando os dois tópicos, ainda que existam muitos trabalhos sobre a adoção de tratamentos de eletrocoagulação/flotação sobre efluentes industriais de uma maneira geral.

Kara *et al.* (2013) estudaram a eficiência da eletrocoagulação como tratamento para efluente de uma vinícola localizada na cidade de Tekirdağ, na Turquia, que produz cerca de 350 m<sup>3</sup> de efluentes diariamente. O objetivo do estudo foi medir a eficiência de remoção de DQO, cor e turbidez, além de analisar os fatores que influenciam o processo. Os parâmetros iniciais do efluente estudado estão dispostos na tabela a seguir (tabela 2):

<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>
pH	5,2
DQO solúvel (mg/l)	25.200 - 28.640
Sólidos suspensos (mg/l)	1.240
Condutividade (mS/cm)	3,5
Cor (Pt/Co)	6.500
Turbidez (NTU)	2.490

**Fonte: Adaptado de Kara *et al* (2013).**

O reator foi do tipo batelada, com dimensões de 130mm x 130mm x 120mm, com um volume de efluente de 1,5 litros, agitador magnético de barra (250 rpm), eletrodos de ferro e alumínio com área efetiva de 143 cm<sup>2</sup>, ligação do tipo monopolar paralelo, como na figura 5 (KARA *et al.*, 2013).

Os resultados deste estudo estão dispostos na tabela a seguir (tabela 3) para tratamento realizado com eletrodo de alumínio e de ferro:

**Tabela 3 - Resultados do tratamento com eletrocoagulação**

Parâmetro	Processo de EC	
	Fe	Al
Material do eletrodo	Fe	Al
Densidade de corrente (A/m <sup>2</sup> )	300	300
Tensão média (V)	28,4	28,45
pH inicial	7	5,2
pH final	11	7,65
Tempo de operação (min)	90	120
Concentração de DQO (mg/l)	15.200	13.810
Remoção de DQO (%)	46,6	48,5
Concentração de cor do efluente (Pt/Co)	1.280	180
Eficiência de remoção de cor (%)	80,3	97,2
Turbidez (NTU)	193	35,2
Eficiência de remoção de turbidez (%)	92,3	98,6
Consumo do eletrodo (kg/kgDQO removido)	0,51	0,22
Produção de lodo (kg/m <sup>3</sup> )	24,5	18,5
Consumo de energia (kWh/m <sup>3</sup> )	94,4	157,6
Eficiência energética (kWh/kgDQO removido)	10,7	18,2

Fonte: Kara *et al.* (2013).

Para eletrodo de ferro, a remoção de DQO, cor e turbidez encontram sua máxima eficiência com pH por volta de 7, enquanto que para eletrodo de alumínio, o valor ótimo de pH inicial encontra-se entre 5 e 6. Quanto a densidade de corrente, para o eletrodo de ferro, o valor máximo de eficiência, tanto para remoção de DQO quanto para remoção de cor e turbidez, encontrou-se sob uma densidade de corrente de 300 A/m<sup>2</sup>, diminuindo a partir deste valor, enquanto que para o eletrodo de alumínio, o aumento da densidade de corrente só aumenta a eficiência do processo, até atingir o limite de 400 A/m<sup>2</sup> (KARA *et al.*, 2013).



### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo será abordado o processo e os materiais utilizados para a execução do pré-tratamento do efluente pela eletrocoagulação, bem como a metodologia utilizada para realizar a simulação de um efluente advindo de indústria vinícola, sua caracterização e o passo a passo do tratamento, para avaliar a eficácia do sistema, comparando com os parâmetros iniciais ao final do processo.

#### 3.1 SIMULAÇÃO DO EFLUENTE VINÍCOLA

Visto que a realização dos experimentos visando tratar efluentes vinícolas através da utilização da eletrocoagulação iniciou-se em uma época onde toda a colheita e produção vinícola da região já havia sido realizada, optou-se então por simular um efluente sintético, visando características próximas aos efluentes reais, sobretudo no que diz respeito a matéria orgânica e pH.

As condições necessárias para a elaboração do efluente sintético foram norteadas através da obtenção de uma DQO inicial condizente com as condições de um efluente industrial bruto, bem como sua turbidez. Para isso, baseou-se nos trabalhos realizados por Lucas *et al.* (2009).

Para simular o efluente, foi misturado 1,5 L de suco de uva tinto em um recipiente, juntamente com 1,5 L de vinho tinto comercial. A condição inicial de DQO desta mistura ultrapassava em muito os limites estabelecidos para as condições iniciais através da literatura, portanto, esta mistura foi diluída 40 vezes em água destilada, a fim de se aproximar das condições reais de coleta.

O efluente sintético obtido, ainda que tivesse características marcantes de cor, não tinha uma turbidez inicial satisfatória, de modo que foi introduzido uma mistura obtida através da trituração de uvas em um liquidificador comum, simulando condições que normalmente ocorreriam em um tonel de fermentação comum. Devido a heterogeneidade desta mistura, a quantidade introduzida no efluente sintético variou muito, de modo que se optou não por estabelecer uma quantidade fixa desta mistura, mas sim, introduzir até o ponto em que a turbidez atingia os valores desejados.

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE

O monitoramento da eficiência do processo depende das condições iniciais do efluente coletado. Portanto, foram realizadas algumas análises a fim de caracterizar o efluente quanto a suas condições iniciais para alguns parâmetros: DQO, pH inicial e turbidez. As metodologias foram baseadas nos Métodos Padrões para Exame de Água e Esgoto (APHA, 2012), e estão dispostas na tabela a seguir (tabela 4):

**Tabela 4 – Parâmetros de caracterização e métodos utilizados**

Parâmetro	Método de análise
<b>pH inicial</b>	4500 H/B
<b>DQO</b>	SM 5220 D
<b>Turbidez</b>	2130 B

Fonte: do Autor (2021).

### 3.3 DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

Esta etapa do presente trabalho teve como objetivo descrever as etapas do tratamento em detalhes, bem como a metodologia utilizada para analisar os resultados obtidos. Os valores obtidos e a discussão acerca destes serão apresentados nas sessões seguintes.

#### 3.3.1 Aparato Experimental

Para realizar o tratamento de eletrocoagulação, foi utilizado um sistema composto de uma fonte de alimentação regulável DC Hikari HF 3203S, um agitador magnético Hanna Instruments Hf 190M, um reator de vidro de capacidade aproximada de 600ml e fios de cobre.

Foram utilizados eletrodos de alumínio, com diâmetro médio de 0,92cm e comprimento médio de 20,5cm. A distância aproximada entre os eletrodos foi de 2cm, enquanto a distância Ânodo-Cátodo foi de 4cm. Foram submersos no efluente de modo que mantivessem uma profundidade submersa igual entre todos os eletrodos.

A agitação magnética foi regulada para o modo com menos potência possível, fazendo com que houvesse uma homogeneização suave da mistura, porém sem que

os coágulos formados se rompessem ou fossem novamente introduzidos na parte tratada do efluente.

O esquema de ligação utilizado foi do tipo monopolar em série, onde 3 eletrodos estavam ligados em série com o polo positivo, enquanto outros 3 estavam ligados em série diretamente ao polo negativo da fonte.

A figura a seguir (figura 7) apresenta o aparato experimental utilizado durante o tratamento por eletrocoagulação:

**Figura 7 - Reator para a execução da eletrocoagulação**



Fonte: o Autor (2021).

### 3.3.2 Planejamento Fatorial

A metodologia de planejamento e análise escolhidas foi o planejamento fatorial, devido à familiaridade prévia com o assunto.

As análises de resultados foram conduzidas em réplicas para garantir uma análise estatística minimamente adequada e a possibilidade da eliminação de dados espúrios quando houvesse necessidade.

Foram definidas 2 variáveis para a pesquisa, subdividindo-se em 2 níveis, denominados alto e baixo. Estas variáveis e níveis foram utilizados para a execução do planejamento fatorial e estão dispostas na tabela a seguir (tabela 5):

Fatores	Nível	
	Baixo	Alto
Tempo (min.)	20	40
Voltagem (V)	7,5	15

**Fonte: Do autor (2021).**

O tratamento estatístico feito a partir desta análise indicou qual ou quais os fatores que possuíam maior influência no sistema. Para isto, foram atribuídas parametrizações para cada fator em seu nível alto ou baixo, sendo +1 para fatores do tipo alto e -1 para fatores do tipo baixo (PEREIRA FILHO, 2015). O resultado desta parametrização foi disposto no quadro a seguir (quadro 4):

Ensaio	Tempo	Voltagem
1	-1	-1
2	-1	+1
3	+1	-1
4	+1	+1

**Fonte: do Autor (2021).**

A influência desses fatores foi calculada através da diferença entre a média destes fatores quando estiverem no nível alto (Y+) e quando estiverem no nível baixo (Y-), podendo ter efeitos de primeira e segunda ordem, onde os efeitos de primeira ordem são calculados para cada um dos fatores separadamente, segunda ordem quando comparados dois a dois (PEREIRA FILHO, 2015).

Neste tipo de análise, é possível medir, numericamente, a influência de cada uma das variáveis envolvidas no processo. Para isto, deve-se ter em mente que,

diante de 2 variáveis que serão observadas neste experimento, ocorrerão interações de primeira e segunda ordem.

As interações de primeira ordem referem-se à influência de cada uma das variáveis, separadamente. Por exemplo, se o tratamento será mais eficaz quando apenas a variável pH estiver no nível alto ou baixo, ou apenas a variável tempo de reação estiver no nível alto ou baixo, etc. Interações de segunda ordem se referem a combinação das variáveis duas-a-duas, quando, em pares, ambas estiverem no nível alto ou baixo, mensurar a influência na eficiência do processo.

O quadro a seguir (quadro 5) apresenta todas as possíveis interações, sendo que o tempo foi nomeado como fator 1 e a tensão como fator 2:

**Quadro 5 - Interação entre os fatores**

<b>Interações</b>	<b>Fatores</b>
Primeira ordem	1; 2
Segunda ordem	1*2

Fonte: do Autor (2020).

Com os resultados em mãos, aplica-se a seguinte equação a fim de verificar qual ou quais foram as variáveis com efeitos mais relevantes sobre o experimento (equação 10):

$$\text{Efeito} = \bar{Y}_+ - \bar{Y}_- \quad (10)$$

Onde  $\bar{Y}_+$  é a média dos resultados quando estão na modalidade alta (+1) e  $\bar{Y}_-$  é a média dos resultados quando estão no nível baixo (-1).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao longo desta seção, serão discutidos os resultados obtidos através das experimentações acima mencionadas, comparação com resultados encontrados na literatura existente e discussão de fatores relevantes para o tratamento de efluentes através da eletrocoagulação.

### 4.1 CARACTERÍSTICAS DO EFLUENTE

Já era esperado para o pH inicial características ácidas, visto que o resultado da fermentação alcoólica produz ácidos e, como o efluente simulado advém de suco de uva e vinho, confirmando-se através do resultado de pH inicial igual a 3,67. Através do próprio paladar é possível distinguir as características ácidas da bebida, que muito se aproximam de uma situação real, onde o efluente provém de toneis de fermentação ou de outros processos industriais vinícolas.

A DQO inicial do efluente simulado foi propositalmente estabelecida com o valor de 4833,4 mg/l, pois dessa forma seria possível realizar ensaios de caracterização com o método mencionado na mesma tabela, uma vez que este método só funciona para valores de até 800 mg/l. Portanto, como mencionado nas seções anteriores, o efluente simulado foi devidamente diluído para chegar neste valor, que se encontra dentro dos valores encontrados na literatura, ainda que estes possuam uma amplitude bastante elevada, partindo de valores como 3112 mg/l (VLYSSIDES *et al.*, 2005) e chegando até 28640 mg/l (KARA *et al.*, 2013).

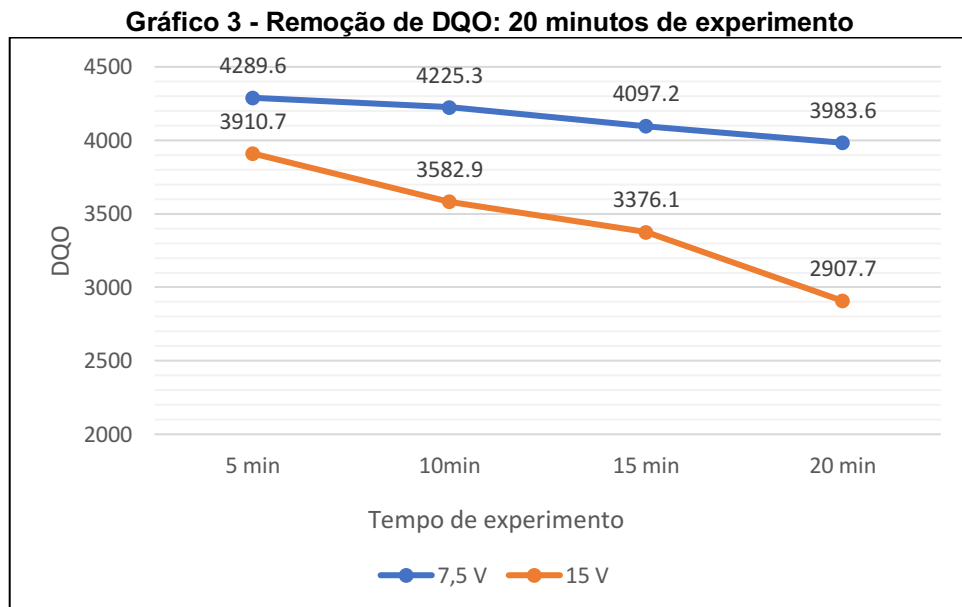
A turbidez de 5,75 NTU encontra-se também dentro do que foi encontrado na literatura, em uma faixa que varia de 2,49 NTU (KARA *et al.*, 2013) a 104,90 NTU (ORTIGARA, 2009). Foi escolhido um valor que fosse possível visualizar a olho nu as características de remoção deste tipo de tratamento que, de forma tradicionalmente estabelecida, é considerado eficiente na remoção de cor e turbidez de efluentes industriais.

### 4.2 RESULTADOS DO TRATAMENTO DE ELETROCOAGULAÇÃO

As próximas seções apresentam os dados de caracterização do efluente tratado com a eletrocoagulação, dentro dos parâmetros e metodologia citado nas seções anteriores.

#### 4.2.1 Remoção de DQO

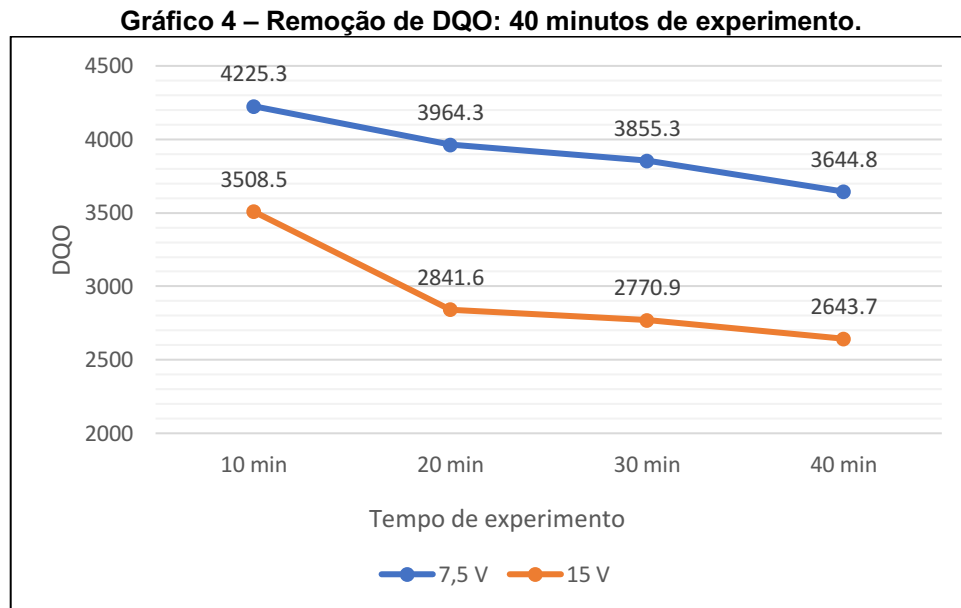
Para a variável de tempo igual a 20 minutos de execução de experimento, o efluente apresentou remoção mesmo sob condições de tempo e tensão baixas, representadas no gráfico a seguir (gráfico 3):



**Fonte: O autor (2021).**

Observa-se que, para uma tensão constante de 7,5V, os eletrodos de alumínio proporcionaram ao efluente uma eficiência de remoção de 17,6%, enquanto que para a tensão constante de 15V, a eficiência de remoção foi de 39,8%.

Para um tempo total de 40 minutos de experimento, o resultado foi obtido e compilado no gráfico a seguir (gráfico 4):



**Fonte: O autor (2021).**

Para os mesmos eletrodos de alumínio e esquema de ligação, a eficiência de remoção sob tensão constante de 7,5V foi de 24,6%, enquanto que a eficiência de remoção sob tensão constante de 15V foi de 45,3%.

Com densidade de corrente de 253,38 A/m<sup>2</sup>, a remoção de 45,3% obtida no presente experimento se aproxima da bibliografia pesquisada, onde Kara *et al.* (2013) obtiveram, para o mesmo material de composição do eletrodo, uma eficiência de remoção de DQO de 48,5%, com condições semelhantes de densidade de corrente.

Aplicando a metodologia do planejamento fatorial, os resultados e as suas respectivas parametrizações ficam de maneira que podem ser observados na tabela a seguir:

**Tabela 6 - Parametrização da remoção de DQO**

Experimento	Tensão (V)	Tempo de experimento (min)	Parametrização da tensão	Parametrização do tempo	Eficiência de remoção (%)
1	7,5	20	-1	-1	17,6
2	15	20	1	-1	39,8
3	7,5	40	-1	1	24,6
4	15	40	1	1	45,3

**Fonte: O autor (2021).**

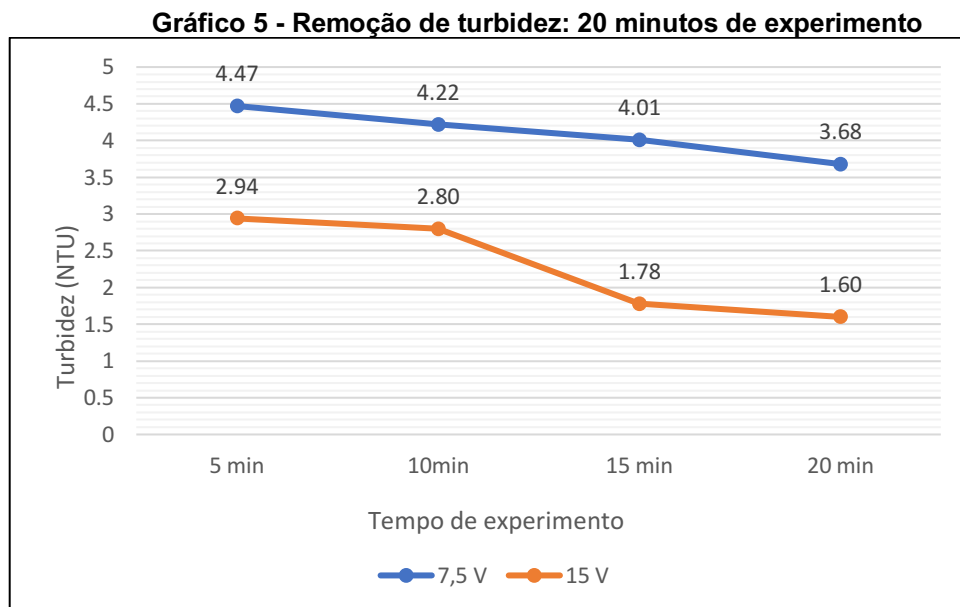
Utilizando a equação 10, obtém-se que o efeito da variável tempo na eficiência de remoção de DQO é de 6,235. Já o efeito da variável tensão é de 21,485. Deste



modo, conclui-se que o efeito da tensão foi determinante para a remoção de DQO, de modo que o tempo de execução de experimento possui papel secundário para este tipo de tratamento.

#### 4.2.2 Remoção de turbidez

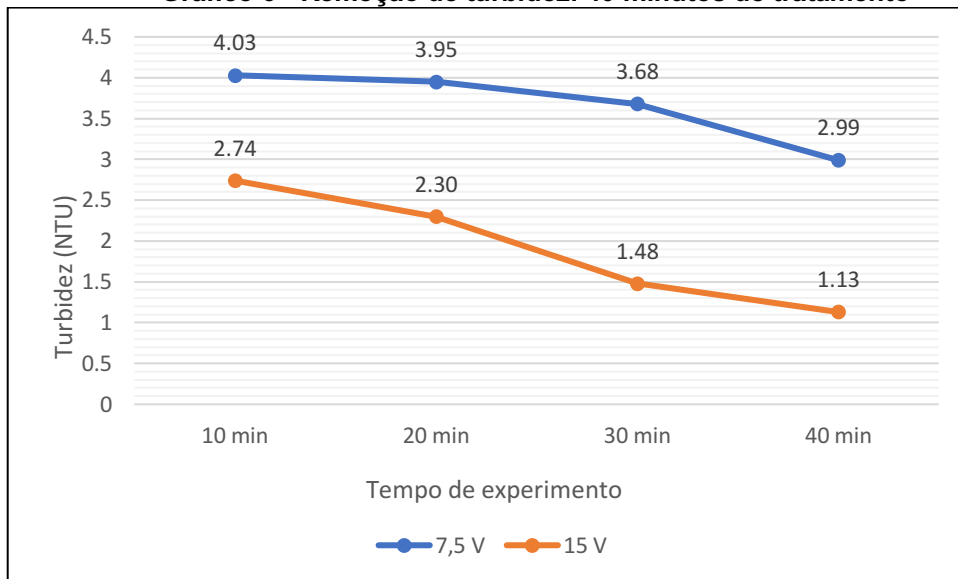
Os resultados obtidos na remoção de turbidez empregando-se o tratamento de eletrocoagulação com eletrodos de alumínio, tempo de execução de experimento de 20 minutos, foram compilados no gráfico a seguir (gráfico 5):



Fonte: O autor (2021).

Empregando-se o eletrodo de alumínio e submetendo o efluente ao tratamento de eletrocoagulação, à tensão constante de 7,5V foi capaz de obter uma taxa de remoção de 36% de turbidez, enquanto que, com 15V de tensão, foi possível uma remoção de 72,2%.

O próximo gráfico (gráfico 6) apresenta os resultados de remoção para um tempo total de tratamento de 40 minutos:

**Gráfico 6 - Remoção de turbidez: 40 minutos de tratamento**

Fonte: O autor (2021).

Sob as condições de tratamento de 40 minutos e tensão constante de 7,5V, os eletrodos de alumínio foram capazes de obter uma remoção de 48%, enquanto que, sob tensão constante de 15V, a remoção foi de 80,4%.

Esperava-se uma alta taxa de remoção de turbidez, visto que este tipo de tratamento possui alta eficiência de remoção neste sentido, chegando a 98,6% de remoção sob condições iguais de tempo de tratamento e densidade de corrente para o tratamento de efluentes vinícolas (KARA *et al.*, 2013).

A tabela a seguir (tabela 8) resume os gráficos acima apresentados e parametriza os dados de modo que se possa realizar uma análise de qual foi a variável predominante no tratamento:

**Tabela 7 - Parametrização de variáveis para remoção de turbidez**

Experimentos	Tensão (V)	Tempo de experimento (min)	Parametrização da tensão	Parametrização do tempo	Eficiência de remoção (%)
1	7,5	20	-1	-1	36,0
2	15	20	1	-1	48,0
3	7,5	40	-1	1	72,2
4	15	40	1	1	80,4

Fonte: O autor (2021).

Através da equação 10, conclui-se que o efeito da variável tempo de tratamento foi determinante para uma alta taxa de remoção, visto que,

numericamente, o efeito foi de 34,26, enquanto que a variável tensão representou um efeito de 10,09 para este tratamento.

Apesar de não fazer parte do escopo de investigação do presente trabalho, nota-se também que houve uma boa taxa de remoção de cor do efluente, que pode ser observado na figura a seguir (figura 8), ainda que não foram feitas métricas de determinação de remoção de cor.

**Figura 8 - Remoção de cor: antes (esquerda) e depois (direita) do tratamento com eletrocoagulação.**

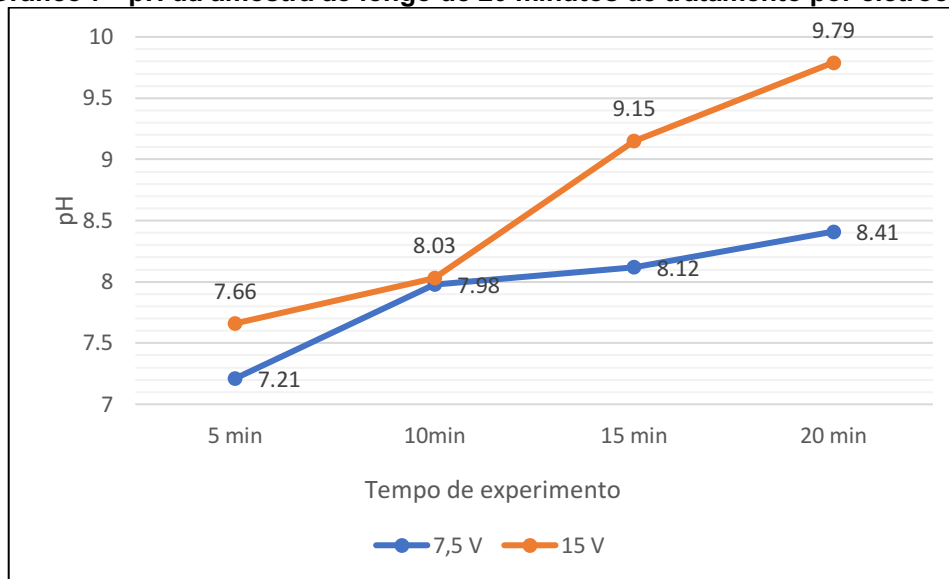


Fonte: O autor (2021).

#### 4.2.3 pH

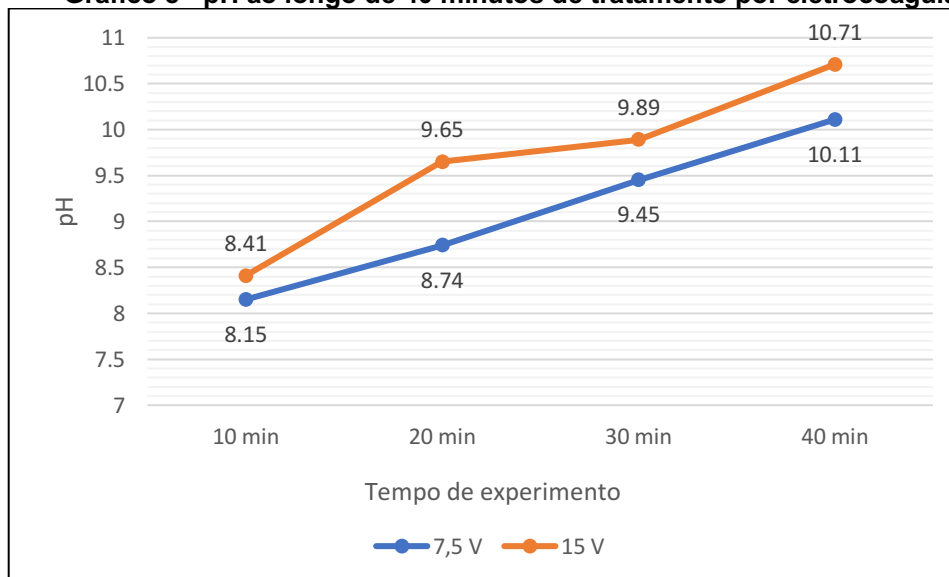
O pH inicial do efluente, apesar de originalmente ser de 3,67, foi elevado utilizando-se cal virgem, até atingir valores próximos a 7, faixa de pH onde o tratamento por eletrocoagulação possui maior eficiência.

O gráfico a seguir apresenta a evolução do pH do efluente ao longo do tratamento por eletrocoagulação, com 20 minutos de tratamento (gráfico 7):

**Gráfico 7 - pH da amostra ao longo de 20 minutos de tratamento por eletrocoagulação**

Fonte: O autor (2021).

O próximo gráfico refere-se ao tratamento de 40 minutos de duração, com pH inicial de 7, artificialmente introduzido ao efluente simulado:

**Gráfico 8 - pH ao longo de 40 minutos de tratamento por eletrocoagulação**

Fonte: O autor (2021).

O pH final da amostra teve aumento considerável, fazendo com que o efluente tratado adquirisse características básicas. Contudo, Segundo Kara *et al.* (2013), já esperava-se que o pH final fosse maior do que o pH inicial, devido a inserção de hidróxidos no efluente, característica natural da célula eletrolítica.

Através da análise utilizando a metodologia do planejamento fatorial, a tabela a seguir ( ) apresenta o aumento percentual de pH, bem como a parametrização dos dados de modo que foram feitas as análises para determinar qual a variável que mais interferiu nos resultados:

**Tabela 8 - Resumo do aumento de pH da amostra**

Experimentos	Tensão (V)	Tempo de experimento (min)	Parametrização da tensão	Parametrização do tempo	Aumento de pH (%)
1	7,5	20	-1	-1	20,1
2	15	20	1	-1	39,9
3	7,5	40	-1	1	44,4
4	15	40	1	1	53,0

Fonte: O autor (2021).

Com a equação 10, obteve-se os resultados de 14,14 como efeito da tensão e 18,72 como efeito do tempo. Como os valores são muito próximos, não é possível determinar com precisão qual foi a variável mais importante no processo, ou seja, necessitaria de mais testes para um resultado mais confiável.

A resolução 430 do CONAMA não menciona padrões de lançamento para DQO e turbidez, ainda que o pH obtido no tratamento ultrapasse o limite de 9 estabelecido (BRASIL, 2011). Contudo, o resultado da remoção de DQO se mostrou satisfatório, ressaltando a ideia de utilizar a eletrocoagulação como pré-tratamento. Ainda que houve uma diminuição satisfatória nos níveis de turbidez, o mais adequado seria aliar o tratamento por eletrocoagulação a outro tipo de tratamento.

## 5 CONCLUSÃO

Após os experimentos executados em laboratório e conseguinte análise dos dados obtidos através do emprego do tratamento de eletrocoagulação em um efluente de indústria vinícola simulado, conclui-se que, utilizando-se eletrodos de alumínio, é possível obter remoção de turbidez e DQO, conseguindo ainda um aumento do pH, removendo as características ácidas deste tipo de efluente. As análises mostraram uma taxa satisfatória de diminuição das características acima citadas, implicando invariavelmente que a aplicação do pré-tratamento por eletrocoagulação do efluente simulado bruto e obtenção de um efluente tratado possuem clara relação de causa e efeito.

Quanto a DQO do efluente simulado após o tratamento, houve uma remoção que variou entre 17,6% a 45,3%, enquanto que a turbidez apresentou uma taxa de remoção que variou entre 36% e 80,4%. O pH mostrou um aumento percentual que variou entre 20,1% e 53%, além de se observar nitidamente uma remoção de coloração do efluente simulado tratado.

Uma ressalva que deve ser feita é quanto a origem do efluente. Por se tratar de um efluente simulado em laboratório, algumas características como sólidos suspensos, condutividade elétrica e etc. não puderam ser adequadamente simuladas, ressaltando a importância de se fazer um planejamento adequado para obtenção de um efluente bruto advindo diretamente da indústria, levando em consideração o caráter sazonal da produção deste.

Sugestões para trabalhos futuros na mesma linha de investigação incluem refazer os mesmos testes, utilizando efluente bruto autêntico ao invés do sintético, além de mais condições de tempo de tratamento, outras tensões e esquemas de ligação do reator. Além disso, investigar outras variáveis, como o pH inicial, a utilização de eletrodos de ferro, e medir outras características do efluente, como sólidos suspensos, fósforo, nitrogênio, etc.

## REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1997). **Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – projeto, construção e operação**. NBR 13969. Rio de Janeiro: ABNT. 60p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9898**: preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores. 1987.

AMAIZ, C.; ELMALEH, S.; LEBRATO, J.; MOLETTA, R. **Start up of an anaerobic inverse turbulent bed reactor fed with wine distillery wastewater using pre-colonised bioparticles**. Water Science and Technology: a journal of the International Association on Water Pollution Research. v. 51, n. 1. p. 153-158. 31 dez. 2004.

ANDREOTTOLA, G.; FOLADORI, P.; NARDELLI, P.; DENICOLO, A. **Treatment of winery wastewater in a full-scale fixed bed biofilm reactor**. Water Science and Technology, v. 51, n. 1, p. 71-79. 2005.

APHA, A. W. W. A. WEF. (2012). **Standard methods for the examination of water and wastewater**, v. 22, 2012.

ATTOUR, A. et al. **Influence of operating parameters on phosphate removal from water by electrocoagulation using aluminum electrodes**. Separation and Purification Technology, v. 123, p. 124-129, 2014.

BENSADOK, K.; BENAMMAR, S.; LAPICQUE, F.; NEZZAL, G. **Electrocoagulation of cutting oil emulsions using aluminum plate electrodes**. Journal of Hazardous Materials, v. 152, n. 1, p. 423-430, Jun. 2007.

BRASIL. **Resolução nº 430 que Dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução n. 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA**. Publicação DOU, n. 92, p. 89. 16 mai. 2011.

BRAZ, R.; PIRRA, A.; LUCAS, M. S.; PERES, J. A. **Combination of long term aerated storage and chemical coagulation/flocculation to winery wastewater treatment**. Desalination. v. 263, p. 226-232. 2010.

BRUCCULERI, M.; BOLZONELLA, D.; BATTISTONI, P.; CECCHI, F. **Treatment of a mixed municipal and winery wastewaters in a conventional activated sludge process: A case study.** Water Science and technology. v. 51, n. 1, p. 89-98. 2005.

CAÑIZARES, P.; CARMONA, M.; LOBATO, J.; MARTINEZ, F.; RODRIGO, M. A. **Electrodissolution of aluminum electrodes in electrocoagulation processes.** Ind. Eng. Chem. Res. 2005, 44, 4178 – 4185.

CHEN, G. Electrochemical technologies in wastewater treatment. **Separation and purification Technology**, v. 38, n. 1, p. 11-41, 2004.

COSTA, J. E.; BELCHIOR, A. P. **Laboração e utilização dos produtos secundários da vinificação.** Relatório nacional, Lisboa. 1972.

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

DANESHVAR, N.; KHATAEE, A. R.; AMANI GHADIM, A. R.; RASOULIFARD, M. H. **Decolorization of C.I. Acid Yellow 23 solution by electrocoagulation process: Investigation of operational parameters and evaluation of specific electrical energy consumption (SEEC).** Journal of hazardous materials. n. 148. p. 566-572. 2007.

EPA - South Australian Environment Protection Authority. **EPA Guidelines for Wineries and Distilleries.** EPA, Adelaide, 2004. Issued January, 2017. Disponível em: < [https://www.epa.sa.gov.au/files/4771373\\_guide\\_wineries.pdf](https://www.epa.sa.gov.au/files/4771373_guide_wineries.pdf)>. Acesso em: 14 set. 2020.

EYVAZ, M.; GÜRBULAK, E.; KARA, S.; YUKSEL, E. **A case study on winery wastewater with electrocoagulation, Modern electrochemical methods in nano, surface and corrosion.** Modern Electrochemical Methods in Nano, Surface and Corrosion Science. v. 1, p. 201-238. Jun, 2014.

FERREIRA, L. H. **Remoção de sólidos em suspensão de efluente da indústria de papel por eletroflotação.** 2006. 99f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Química, Campinas, SP. Disponível em: <<http://www.repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/266170>>. Acesso em: 22 set. 2020.



HASHIZUME, T. **Tecnologias do Vinho**. In: LIMA, U. de A.; AQUARONE, E.; BORZANI, W. AQUARONE, et al. *Biotechnologia industrial - volume 4: Tecnologia das fermentações* Editora Edgard Blüncher, 1975. 248 p. p. 21- 68.

HENZE, M.; HARREMOËS, P. **Biofilters**. In: HENZE, M., HARREMOËS, P., ARVIN, E. **Wastewater treatment: biological and chemical process**. Denmark: Springer, p. 143-191.1996.

HEREDIA, J. B.; DOMINGUEZ, J. R.; PARTIDO, E. **Physico-chemical treatment for the depuration of wine distillery wastewaters (vinasses)**. *Water Science and Technology*, v. 51, n. 1, p. 159-166. 2005.

HOLT, P. K.; BARTON, G. W.; MITCHELL, C. A. **A Quantitative Comparison Between Chemical Dosing and Electrocoagulation**. *Colloids and Surfaces: Physico Chemicals Engineering Aspects*. n. 211, p. 233-248. 2002. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927775702002856>>. Acesso em: 17 set. 2020.

IBRAVIN. **Cadastro Vinícola**. SEAPA-RS. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Disponível em <<http://ibravin.org.br/downloads/1426615141.pdf>> Acesso em: 14 set. 2020.

INANC, B.; CINER, F.; OZTURK, I. **Colour removal from fermentation industry effluents**. *Water Science and Technology*, v. 40, n. 1, p. 331-338. 1999.

KARA, S.; GÜRBULAK, E.; EYVAZ, M.; YUKSEL, E. **Treatment of winery wastewater by electrocoagulation process**. *Desalination and Water Treatment*. v. 51, p. 5421-5429. 2013.

KOBYA, M.; HIZ, H.; SENTURK, E.; AYDINER, C.; DEMIRBAS, E. **Treatment of potato chips manufacturing wastewater by electrocoagulation**. *Desalination*, v. 190, n. 1-3, p. 201-211, Abr. 2006

LECHINHOSKI, M. **Tratamento físico-químico em efluente de vinícola de pequeno porte**. 2015. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

LUCAS, M. S.; PERES, J. A. **Processos de tratamento de efluentes vinícolas: Breve perspectiva**. *Revista Química no ensino médio*, V. 122, p. 41-47. 2011.

LUCAS, M. S.; PERES, J. A.; PUMA, G. L. **Treatment of winery wastewater by ozone-based advanced oxidation processes ( $O_3$ ,  $O_3/UV$  and  $O_3/UV/H_2O_2$ ) in a pilot-scale bubble column reactor and process economics.** Separation and Purification Technology. v. 72, n. 3, p. 235-241. 11 mai. 2010.

LUCAS, M. S.; MOSTEO, R.; MALDONADO, M. I.; MALATO, S.; PERES, J. A. **Solar Photochemical Treatment of Winery Wastewater in a CPC Reactor.** Journal of Agricultural and Food Chemistry. n. 57, p. 11242-11248. 2009.

MERMA, A. G. **Eletrocoagulação aplicada a meios aquosos contendo óleo.** 2008. 128 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Departamento de Ciência dos materiais e Metalúrgica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2008.

METCALF & EDDY. **Wastewater Engineering – Treatment, Disposal and Reuse.** Revised by George Tchobanoglous and Franklin L. Burton. Third Edition. McGrawHill, Inc.1991.

MOLLAH, M. Y. A.; MORKOVSKY, P.; GOMES, J. A. G.; KESMES, M.; PARGA, J.; COCKE, D. L. **Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation.** Journal of Hazardous Materials, v. 144, n. 1-3, p. 199-21, Out. 2004.

MOLLAH, M. Y. A.; SCHENNACH, R.; PARGA, J. R.; COCKE, D. L. **Electrocoagulation (EC) – science and applications.** Journal of Hazardous Materials, v. 114, n. 1-3, p. 199-210, Out. 2001.

MONTEIRO, A. L. da S. **Caracterização das Águas e Otimização do Funcionamento de ETARs Vitivinícolas.** 1996. 129 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Engenharia Química da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, 1996.

MOUSSA, D. T. et al. A comprehensive review of electrocoagulation for water treatment: Potentials and challenges. **Journal of environmental management**, v. 186, p. 24-41, 2016

MUSEE, N.; LORENZEN, L.; ALDRICH, C. **Cellar waste minimization in the wine industry: a systems approach.** Journal of Cleaner Production, v. 15, p. 417 – 431. 2005.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **A ONU e o meio ambiente**. 2018. Disponível em <<https://nacoesunidas.org/acao/meio-ambiente/>>. Acesso em: 19 jun. 2020.

ORTIGARA, A. R. C. **Caracterização do efluente de uma vinícola na região do Vale do Rio do Peixe/SC e avaliação do seu tratamento por biofiltro aerado submerso**. 2009. 140 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 2009.

ORTIGARA, A. R. C.; SANT'ANNA, F. S. P.; BENTO, A. P. B.; SEZERINO, P. H. **Tratamento de efluente vinícola empregando biofiltro aerado submerso em escala laboratorial**. Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia, Brasília, DF, 23 jun. 2010.

PEREIRA FILHO, E. R. **Planejamento fatorial em química: maximizando a obtenção de resultados**. Edufscar: São Carlos, 2015.

PIRRA. Antonio Jose Duque. **Caracterização e tratamento de efluentes vinícolas da região demarcada do douro**. Dissertação para obtenção do grau de Doutor. Departamento de Fitotecnia e Engenharia Rural. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Vila Real, 2005. Portugal.

PORRAS, A. C. **Tratamento de efluente têxtil e lodo gerado em um sistema de lodos ativados por batelada com adição de carvão ativado em pó**. Dissertação para título de mestre em Engenharia Civil na área de concentração de Meio Ambiente. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP. 2002.

PROTAS, J. F. da S.; CAMARGO, U. A. **Viticultura brasileira : panorama setorial de 2010**. Brasília: SEBRAE; Bento Gonçalves: IBRAVIN; Embrapa Uva e Vinho. 110 p. 2011.

RODRIGUES, A.C., et al. **Tratamento de efluentes vitivinícolas: um caso de estudo na região dos vinhos verdes**. Indústria e Ambiente, n 40, p. 20-25, 2006.

SILVA, L. M. L. R. **Caracterização dos subprodutos da vinificação**. Revista Millenium, n. 28, p. 123, 2003. Disponível em: <<https://repositorio.ipv.pt/handle/10400.19/594>>. Acesso em: 13 set. 2020.

STAHL, T. et al. **Migration of aluminum from food contact materials to food — a health risk for consumers? Part I of III: Exposure to aluminum, release of aluminum,**

tolerable weekly intake (TWI), toxicological effects of aluminum, study design, and methods. *Environmental Sciences Europe*, v. 29, n. 1, p. 19, 2017.

THEODORO, P. S. **Utilização da eletrocoagulação no tratamento de efluentes da indústria galvânica**. 2010. 112 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de pós-graduação em engenharia química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2010.

VASUDEVAN, S.; OTURAN, M. A. **Electrochemistry: as cause and cure in water pollution** – an overview. *Environmental Chemistry Letters*, v. 12, n. 1, p. 97-108, 2014.

VLYSSIDES A. G; BARAMPOUTI, E. M.; MAI, S. **Wastewater characteristics from Greek wineries and distilleries**. *Water Science & Technology*, v. 51, n.1, p. 53-60, 2005.

VON SPERLING, M. **Lodos ativados**. 4 ed. revisada e ampliada. Belo Horizonte. Editora UFMG, 2016. 461 p.

WIENDL, W. G. **Processos eletrolíticos no tratamento de esgotos sanitários**. Rio de Janeiro: ABRES, 1998, 367 p.