



**ANA CRISTINA DOS SANTOS DOMINGUES**

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO TRATAMENTO DA  
VINHAÇA POR ELETROFLOCULAÇÃO**

**LAVRAS – MG**

**2021**

**ANA CRISTINA DOS SANTOS DOMINGUES**

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO TRATAMENTO DA  
VINHAÇA POR ELETRFLOCULAÇÃO**

Monografia apresentada à  
Universidade Federal de Lavras, como  
parte das exigências do Curso de  
Engenharia Ambiental e Sanitária,  
para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dr. Adriano Viana Ensinas

Orientador

**LAVRAS – MG**

**2021**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço à minha mãe Daniela por todas as palavras de conforto, confiança, e por sempre me incentivar e me fazer continuar. Ao meu pai Cesar, por ser minha maior inspiração e por ter me ensinado a persistir e me reerguer diante de todas as adversidades da vida.

A força e apoio incondicional dos meus pais foram essenciais para o meu avanço e trajetória acadêmica. Este trabalho é dedicado a eles.

Aos meus irmãos Ana Carolina e Cesar por terem me incentivado nos momentos difíceis e compreenderam a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização dessa conquista.

A minha vó Maria Aparecida (in memoriam), que apesar de não estar entre nós nesse momento, continua sendo minha maior força na vida. A sua lembrança e o apoio que me deu em vida me inspiram e me fazem crescer mais a cada dia.

Aos meus familiares por todo o apoio e ajuda na realização deste sonho.

Agradeço à professora Paula Assemany e Luciene Siniscalchi por terem me ajudado e compartilhado tantos conhecimentos durante a minha trajetória. E em especial ao meu orientador Adriano Viana Ensinas, por ter me guiado e incentivado para a conclusão deste projeto com tanta sabedoria.

Agradeço aos meus amigos, companheiros de curso e UFLA. Em especial à Laryssa, Marcus Vinícius, Wesley, Samantha, Thiago e João, pelo grande apoio, experiência e suporte, enriquecendo o meu processo de aprendizado ao longo deste percurso.

Muito obrigada!

## RESUMO

O presente estudo teve como objetivo avaliar a utilização da eletrofloculação como tratamento da vinhaça quando comparado à decantação desse mesmo efluente. A eletrofloculação foi executada em um recipiente de acrílico com eletrodos de alumínio, onde os parâmetros analisados foram corrente (1 e 2 A) e tempo (45 e 90 minutos). Foram realizadas análises físico e químicas em triplicata para Sólidos Suspensos Totais, Demanda Química de Oxigênio solúvel e Turbidez, para comparações primárias. As amostras eletrofloculadas alcançaram valores máximos de 16 NTU para turbidez, 152 mg/L para Sólidos Suspensos Totais e 10230 mg/L para Demanda Química de Oxigênio, enquanto a vinhaça decantada alcançou valores de 4,2 NTU, 149 mg/L para Sólidos Suspensos Totais e 9638 mg/L para Demanda Química de Oxigênio. Notou-se que a densidade de corrente e o tipo de efluente são fatores decisivos para tornar o pré-tratamento por eletrofloculação eficaz, sendo necessários novos testes e adequações de acordo com o objetivo do projeto pretendido.

**Palavras-chave:** Tratamento Eletroquímico. Efluente. Remoção de poluentes. Tempo. Corrente.

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>6</b>
<b>2.</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>8</b>
<b>2.1</b>	<b>Características físico e químicas da vinhaça</b> .....	<b>8</b>
<b>2.2</b>	<b>Eletrofloculação</b> .....	<b>10</b>
<b>2.2.1</b>	<b>Mecanismos de remoção de poluentes</b> .....	<b>11</b>
<b>2.2.3</b>	<b>Reator de Eletrofloculação</b> .....	<b>13</b>
<b>2.2.3.1</b>	<b>Distância entre os eletrodos</b> .....	<b>14</b>
<b>2.2.3.2</b>	<b>Densidade de corrente</b> .....	<b>15</b>
<b>2.2.3.3</b>	<b>Agitação</b> .....	<b>16</b>
<b>2.2.3.4</b>	<b>Tempo</b> .....	<b>16</b>
<b>2.2.3.5</b>	<b>pH</b> .....	<b>16</b>
<b>2.2.3.6</b>	<b>Temperatura</b> .....	<b>17</b>
<b>2.2.3.7</b>	<b>Concentração inicial do poluente</b> .....	<b>18</b>
<b>2.2.3.8</b>	<b>Condutividade elétrica</b> .....	<b>18</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Vantagens e desvantagens da Eletrofloculação</b> .....	<b>18</b>
<b>2.2.5</b>	<b>Tratamento de vinhaça por Eletrofloculação</b> .....	<b>19</b>
<b>3.</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>21</b>
<b>4.</b>	<b>SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS</b> .....	<b>21</b>
<b>5.</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>22</b>
	<b>ARTIGO - AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO TRATAMENTO DA VINHAÇA POR ELETRFLOCULAÇÃO</b> .....	<b>26</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, o setor sucroalcooleiro vem sendo considerado um dos mais dinâmicos e promissores para a agricultura brasileira, devido à valorização do etanol para a produção de combustíveis limpos e renováveis, e por minimizar conseqüentemente mudanças climáticas. Outro fator que vem contribuindo para a ascensão dessa indústria é a destinação adequada e a estima pelos resíduos gerados no processo industrial, como a vinhaça, bagaço, torta de filtro, entre outros (GOES, MARRA e SOUZA, 2008).

A vinhaça é um efluente provindo da destilação fracionada do caldo de cana-de-açúcar, sendo usado por muitas vezes na fertirrigação do próprio plantio por ser considerada uma importante fonte de potássio e nutrientes, e um bom substituto completo ou parcial de adubação mineral (GOES, MARRA e SOUZA, 2008). Por apresentar altas concentrações de matéria orgânica, Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO), esse tipo de efluente apresenta um alto índice poluidor, e quando usado diretamente em solo sem seguir as legislações, pode causar danos ao meio ambiente, sendo o lençol freático o principal afetado. Uma das maneiras de evitar esses danos ambientais é através do tratamento desse efluente (ARAUJO e OLIVEIRA, 2016; CANDIDO, LOMBARDI e LIMA, 2015).

A Eletrofloculação é uma tecnologia eletroquímica que vem sendo utilizada como pré-tratamento de efluentes por ter como capacidade reduzir de fato, desde metais pesados a poluentes orgânicos (GARCIA-SEGURA et al., 2017). Essa tecnologia vem sendo bastante estudada devido ao seu grande potencial e vantagens como um sistema compacto e a não utilização de substâncias químicas, tornando esse processo ainda mais favorável (ZENOUZI et al., 2013; POELMAN et al., 1997).

O processo de Eletrofloculação consiste na agregação de coloides através da coagulação por agentes coagulantes de ligação formados pelo ânodo. Os poluentes são separados do meio aquoso por precipitação e flotação dos coágulos através dos gases formados no cátodo para que sejam removidos da efluente tratado por mecanismos como sedimentação, filtração, centrifugação, entre outros. (GARCIA-SEGURO et al., 2017)

Considerando a alta quantidade de vinhaça produzida anualmente nas indústrias, e a necessidade de uma alternativa sustentável para o seu uso, o estudo em questão tem a

finalidade de avaliar a tratabilidade da vinhaça por processo de eletrofloculação com eletrodo de alumínio, variando parâmetros operacionais de tempo e corrente.

## 2. REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Características físico e químicas da vinhaça

A vinhaça é um efluente que pode variar a sua composição de acordo com o processo de produção utilizado. Na fermentação de cana-de-açúcar para a produção de álcool, esse resíduo é composto por água, matéria orgânica, açúcar, minerais como o potássio, e outros elementos. Quando produzida no processo de fermentação do melaço (sobra gerada na produção de açúcar), o efluente apresenta uma composição muito mais concentrada. Para cada litro de álcool produzido, é gerado em torno de 10 a 12 litros de vinhaça (GOES, MARRA e SOUZA, 2008).

Atualmente, esse efluente vem sendo fortemente utilizada como fertilizante nas próprias plantações de cana-de-açúcar devido à alta concentração de potássio na sua composição, sendo esse, um mineral fundamental para o processo de fotossíntese, absorção de nutrientes e reações enzimáticas das plantas. Apesar das vantagens encontradas no uso da vinhaça como fertilizante, o seu uso no solo em altas concentrações pode afetar o ecossistema local (MARQUES, 2015)

Os impactos da aplicação desse efluente no solo em grandes quantidades podem variar de acordo com a sua composição, acarretando altas concentrações de matéria orgânica, saturação do solo por potássio, produção de metano, e a contaminação do lençol freático através de canais, se tornando nocivo ao meio ambiente, fauna e flora (SILVA, GRIEBELER e BORGES, 2006).

Esse efluente possui uma grande carga contaminante por apresentar um potencial poluidor cem vezes maior que o do esgoto doméstico, decorrente do elevado teor de Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), pH ácido, cor, turbidez, além da alta carga de nutrientes (ARAUJO e OLIVEIRA, 2016). As suas análises podem ser obtidas através da sua caracterização físico e química *in natura* (Tabela 1).



Tabela 1: Caracterização físico e química da vinhaça *in natura* segundo valores encontrados na literatura.

<b>Parâmetros</b>	<b>Brito et al. (2007)</b>	<b>Rolim et al. (2013)</b>
pH	4,4	4,4
CE (dS/m)	11,5	13,75
DQO (mg/L)	26.771	21.500
DBO (mg/L)	5.000	12.000
Potássio (mg/L)	1.123	3.000
Cálcio (mg/L)	352	560
Magnésio (mg/L)	16	280
Sódio (mg/L)	113	300

Fonte: Adaptado de Brito et al. (2007) e Rolim et al. (2013).

Com base na tabela, é possível analisar que as características da vinhaça podem variar de acordo com o produto fabricado e o método de produção. Brito et al. (2007) caracterizaram a vinhaça proveniente da Usina de Petribu em Lagoa de Itaenga – PE, enquanto Rolim et al. (2013) caracterizaram o efluente da Usina Salgado, localizada no município de Ipojuca – PE. Os resultados obtidos para ambos os estudos demonstram o elevado potencial poluidor e o alto teor de nutrientes presentes nesse resíduo.

A sua composição é influenciada por adições de nutrientes, ácido fosfórico e proteínas, durante a fermentação, influenciando nas características qualitativas do efluente. A vinhaça é constituída em maior parte de matéria orgânica na forma de ácidos orgânicos, o que torna o seu pH ácido, em menor parte é composta por cátions de elementos como o potássio e outros minerais, e tem como a sua principal característica, valores altos para DBO e DQO. O despejo desse efluente em solos para fertirrigação pode causar problemas à vida do solo, tanto pela sua composição quanto pela sua alta temperatura de despejo em torno de 85 a 90 graus Celsius (SEIXAS, GIMENES e FERNANDES-MACHADO, 2016).

O descarte ideal desse tipo de efluente seria a partir de um tratamento físico e químico garantindo a melhoria qualitativa da água de forma a mitigar riscos e impactos ambientais, evitando assim, a degradação do solo e de cursos d'água e cumprindo com as regulamentações e normas especificadas pela Norma Técnica P 4.231/2005 para o Estado de São Paulo e pela Deliberação Normativa COPAM n° 164, de 30 de março de 2011 para o Estado de Minas Gerais, o qual estabelecem critérios e procedimentos para a aplicação

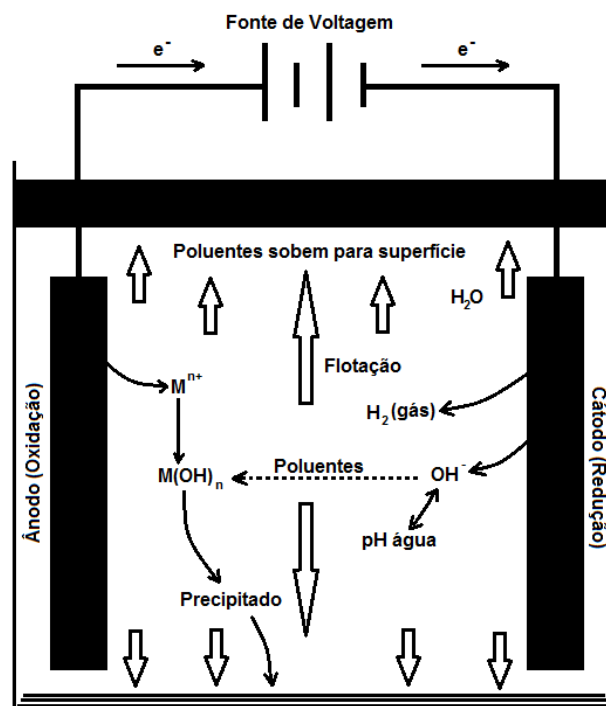
adequada da vinhaça no solo (ARAUJO e OLIVEIRA, 2016; CANDIDO, LOMBARDI e LIMA, 2015).

## 2.2 Eletrofloculação

A Eletrofloculação é uma tecnologia eletroquímica de tratamento para diferentes tipos de efluente com capacidade de reduzir simultaneamente metais pesados, sólidos suspensos, poluentes orgânicos e outros contaminantes através do uso de eletricidade. Essa tecnologia vem sendo bastante estudada devido ao seu grande potencial e vantagens econômicas (GARCIA-SEGURO et al., 2017; FAYAD, 2017).

Esse processo combina coagulação, flotação e eletroquímica para desestabilizar contaminantes suspensos ou dissolvidos em um meio aquoso. O reator de eletrofloculação é composto basicamente por uma célula eletrolítica contendo um ânodo e cátodo conectados a uma fonte de alimentação de corrente contínua, e imersos na solução a ser tratada, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1 – Reações eletrolíticas presentes no reator de eletrofloculação.

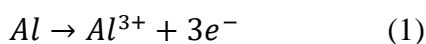


Fonte: Adaptado Mollah et al. (2004).

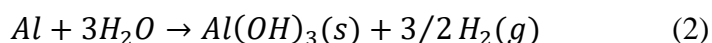
Durante o processo de eletrofloculação, os íons de coagulação são gerados continuamente pela dissolução eletroquímica do ânodo de sacrifício. Esses íons sofrem hidrólise na água formando diversas espécies coagulantes incluindo hidróxido metálico (responsável pela eliminação do contaminante por adsorção/sedimentação) e outros íons metálicos (FAYAD, 2017), ocasionando a redução da repulsão eletrostática dos poluentes para a formação de agregados. Os cátodos por sua vez, formam bolhas de  $H_2$ , que em alguns casos induz a flotação dos coloides formados, especialmente para tempos e correntes mais elevados (GARCIA-SEGURO et al., 2017; CHELLAM e SARI, 2015).

Geralmente, os eletrodos são feitos de alumínio ou ferro devido a vantagens como disponibilidade e baixo preço. Porém, a geração de íons ferrosos solúveis e o acúmulo de coloides nos eletrodos se mostram como uma desvantagem para a eletrofloculação por eletrodos de ferro. Sendo assim, é esperado um melhor desempenho no processo usando íons de alumínio, tendo a sua faixa mínima de solubilidade para a liberação de bolhas menores de hidrogênio próximas ao pH neutro, aumentando a eficiência e uma melhor separação dos poluentes do efluente (MOLLAH et al., 2004).

Quando eletrodos de alumínio são utilizados como sacrifício, a reação anódica forma  $Al^{3+}$ , enquanto a reação catódica produz íons hidróxidos e gás  $H_2$ , através da reação:



Os íons de alumínio apresentam um equilíbrio complexo em meio aquoso com diferentes espécies monoméricas, e em maior número espécies polinucleadas a depender das condições de pH. Contudo, o principal responsável pela formação dos agregados é o  $Al(OH)_3$ , pela reação:



Íons de alumínio apresentam uma importante carga de valência quando comparados a íons formados por diferentes espécies, favorecendo o processo de coagulação com menor concentração de coagulante (GARCIA-SEGURO et al., 2017).

### **2.2.1 Mecanismos de remoção de poluentes**

Diferentes mecanismos estão envolvidos na remoção dos poluentes existente nas águas residuárias, que incluem oxidação, redução, coagulação, adsorção, precipitação, flotação e

outros. Os efluentes industriais são compostos principalmente por partículas coloidais, e os mecanismos de remoção dessas partículas estão associadas a concentração de coagulante e ao pH do meio (FAYAD, 2017).

A estabilidade das partículas coloidais pode ser explicada pela presença de cargas repulsivas, com isso, a estabilidade das mesmas é estimada considerando as forças de atração. Enquanto as forças repulsivas forem dominantes, o sistema permanece disperso, e quando as forças de atração passam a dominar, as partículas se agregam através da desestabilização eletrostática pela coagulação, para posterior remoção por sedimentação ou flotação. A suspensão e estabilidade das partículas coloidais são atribuídas ao fato de carregarem cargas semelhantes, normalmente negativas, o que as mantém repelidas (FAYAD, 2017).

A estabilidade das partículas coloidais pode ser explicada pelos efeitos combinados das forças atrativas de Van der Waals e as forças eletrostáticas repulsivas, considerando ainda o movimento Browniano. A energia repulsiva impede a união das superfícies, e a partir do momento que as superfícies passam a se colidir com força suficiente para superar essa energia, as mesmas passam a se aderir devido à força de Van der Waals, tornando o sistema coloidal estável (FAYAD, 2017).

A neutralização do meio é feita com a inserção de partículas contra-carregadas que auxiliam no tratamento do efluente, onde essas partículas se anexam à superfície dos coloides formando uma camada dupla, que é composta por uma camada interna onde íons com carga opostas são fortemente ligadas à superfície das partículas, e uma camada externa onde os íons se movem de forma livre devido à difusão (FAYAD, 2017).

A desestabilização coloidal é o processo capaz de fazer a remoção de partículas em suspensão e hidróxidos precipitados, não só pelo ânodo de sacrifício, mas também por metais juntos a compostos solúveis adsorvidos nesses precipitados, ocasionando o assentamento de partículas assim como na coagulação química, ou ainda a flotação pelas microbolhas liberadas pelo cátodo (FAYAD, 2017).

A adsorção é um mecanismo capaz de remover poluentes orgânicos e inorgânicos, sendo o segundo processo de remoção da eletrofloculação. Quando o soluto da solução entra em contato com um sólido ocorrem forças de atração intermoleculares sólido-líquido, onde o processo de adsorção ocorre pelo adsorbato e o sólido retido é o adsorvente. A natureza exata da ligação depende das espécies envolvidas, mas o processo pode ser classificado como

fisiossorção característica da força de Van der Waals, por quimissorção por ligação covalente, ou por atração eletrostática. Conforme os hidróxidos de metal vão sendo continuamente produzidos durante o processo de eletrofloculação, os contaminantes vão sendo adsorvidos na superfície desses hidróxidos, fazendo com que ocorra a remoção desses poluentes (FAYAD, 2017).

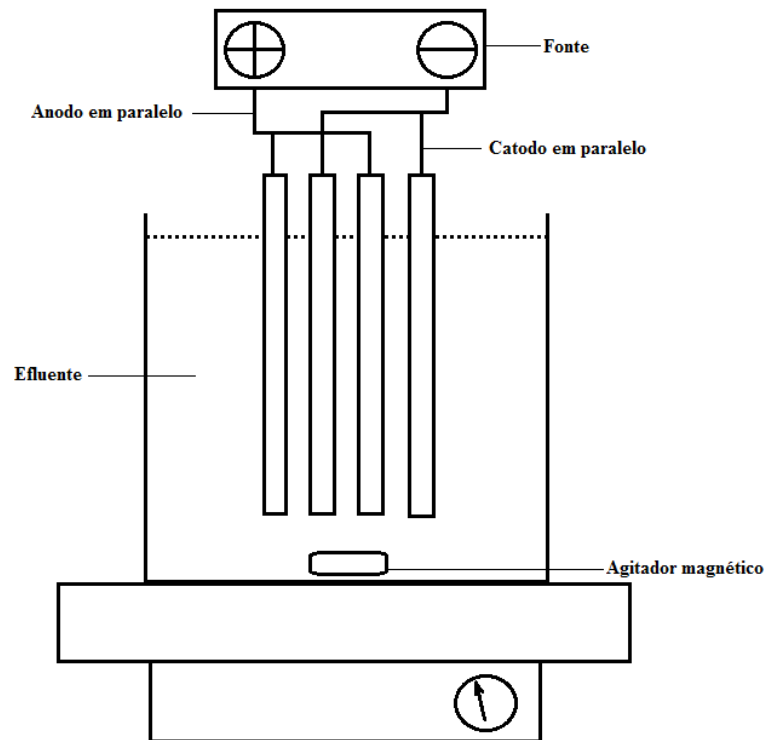
A predominância dos mecanismos vai depender principalmente da natureza dos poluentes e do pH do meio. Dependendo das condições da solução, a eletrofloculação pode reduzir a concentração de moléculas hidrofóbicas na água, fazendo com que maiores concentrações de alumínio contribuam para incrustações irreversíveis no pré-tratamento, ocasionando o aumento de poluentes ou apenas um efeito limitado no sistema, evidenciado pela duplicação da turbidez (FAYAD, 2017). Moreno-Cassilas et al. (2007), afirmam que a carga orgânica do efluente pode aumentar quando compostos reagem para formar produtos solúveis e permanecem no meio.

Sendo assim, a eficiência do processo de remoção de poluentes por eletrofloculação está ligada diretamente ao meio, às dosagens de coagulantes durante o processo, além da corrente e tempo de contato, acontecendo simultaneamente (GARCIA-SEGURO et al., 2017).

### **2.2.3 Reator de Eletrofloculação**

O reator de eletrofloculação constitui-se essencialmente por pares de placas metálicas condutoras formando um eletrodo com uma fonte de energia externa. As placas denominadas como ânodo de sacrifício, são separadas entre ânodo e cátodo, onde o ânodo sofre corrosão por oxidação, e o cátodo sofre reações de redução. Quando usados para tratamento de águas residuais, é necessário o uso de eletrodos com grande área de superfície para uma taxa de dissolução de metal viável. O arranjo das placas podem ser monopolares com conexões em paralelo ou em série. O reator mais utilizado em tratamento de efluentes industriais é no formato de células de lote aberto (Figura 2) com eletrodos parcialmente imersos em solução, e agitados para garantir a homogeneização constante do efluente durante todo o processo, permitindo um melhor contato entre os íons formados e os poluentes (MOLLAH et al., 2004).

Figura 2 – Reator de eletrofloculação com eletrodos em paralelo.



Fonte: Adaptado Mollah et al. (2004).

A maioria dos eletrodos destinados a sistemas de tratamento funcionam melhor quando são do mesmo material (GOBBI, 2013), pois irão ter o mesmo potencial, desgaste uniforme, além de diminuir o custo.

Os sistemas de tratamento por eletrofloculação buscam além de remover os poluentes do efluente, um baixo custo operacional, e para isso variáveis devem ser levadas em consideração, como a distância entre os eletrodos, densidade de corrente, pH do meio, temperatura e tempo de detenção hidráulica.

### 2.2.3.1 Distância entre os eletrodos

A distância entre os eletrodos desempenha um papel significativo no processo de Eletrofloculação afetando a eficiência da remoção de poluentes, uma vez que o campo eletrostático depende da distância entre o ânodo e cátodo (FAYAD, 2017). As distâncias dos eletrodos estão também relacionadas às características dos efluentes, uma vez que para efluentes com elevada condutividade são requeridas distâncias maiores, e distâncias menores são mais eficientes para efluentes com baixa condutividade (NAJE et al., 2016).

O ideal é ter uma distância que forneça o tempo necessário para formar hidróxidos de metal para a aglomeração e formação de flocos, resultando em uma maior remoção de poluentes da solução, e conseqüentemente, uma maior eficiência (NAJE et al., 2016). Além de influenciar na remoção de poluentes, a distância entre os eletrodos também pode ocasionar maior consumo de energia, uma vez que maiores distâncias entre os eletrodos requerem uma maior diferença de potencial aplicada, pois a solução passará a apresentar mais resistividade à passagem elétrica (GOBBI, 2013).

### **2.2.3.2 Densidade de corrente**

A densidade de corrente é considerada um importante fator para a taxa de dosagem do coagulante, formação de bolhas, e tamanho e desenvolvimento dos flocos, sendo essencial para determinar a eficiência do processo de eletrofloculação, e influenciando fortemente a remoção e separação dos poluentes no sistema (FAYAD, 2017; MOLLAH et al., 2001).

A taxa de dissolução do ânodo será proporcional à densidade de corrente imposta para o experimento (FAYAD, 2017), levando ao aumento de flocos de hidróxido de metal e conseqüentemente, tornando o processo de tratamento mais eficaz. A quantidade de coagulante produzido pode ser calculada através da lei de Faraday (NAJE et al., 2016).

Aquino Neto et al. (2011) estudaram o tratamento de resíduos de corante através da eletrofloculação em diferentes densidades de corrente, e constataram que através de eletrodos de alumínio a descoloração total do efluente foi alcançada em uma densidade de corrente de  $2,4 \text{ m.A.cm}^{-2}$ , demonstrando que uma maior eficiência de descoloração é obtida quando há um aumento na densidade de corrente aplicada, devido a formação de mais espécies coagulantes.

Enquanto Borba et al. (2010) através do tratamento do efluente de uma indústria avícola por eletrofloculação com eletrodos de alumínio, obtiveram uma remoção de mais de 90% de cor, DQO e turbidez com uma densidade de corrente de  $43,9 \text{ A.m}^{-2}$  por 20 minutos, e observaram que ao aumentar o tempo de eletrólise para 60 minutos e a densidade de corrente para  $87,9 \text{ A.m}^{-2}$  houve um decréscimo na remoção dos poluentes e um aumento proporcional da condutividade.

### **2.2.3.3 Agitação**

A agitação ajuda a manter condições uniformes durante o processo de eletrofloculação, além de potencializar o contato entre os poluentes e os íons gerados (FAYAD, 2017). A homogeneização do efluente aumenta o desempenho da eletrofloculação por facilitar a floculação dos sólidos suspensos e reduzir a passivação e acúmulos nos eletrodos (DEMIRCI, PEKEL e ALPBAZ, 2015).

### **2.2.3.4 Tempo**

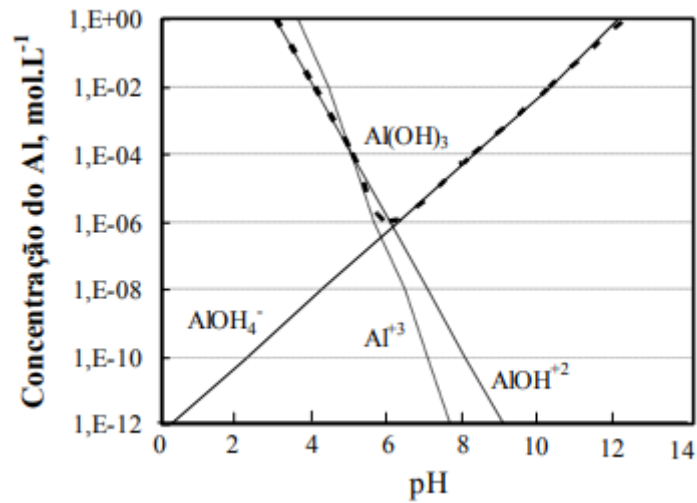
A taxa de remoção dos poluentes também irá depender do tempo de processo de tratamento. Com um tempo maior, a concentração de íons produzidos e flocos de hidrogênio tende a aumentar, auxiliando na eficiência de remoção de poluentes. Com isso, o tempo e a densidade de corrente são importantes fatores para a eletrofloculação. Porém, ao exceder o tempo ideal, a remoção se torna constante e não aumenta, podendo ocasionar uma redução de eficiência, uma vez que em tempos maiores, há o aumento da geração de flocos que em estado solúvel pode permanecer no meio e ocasionar o aumento do poluente (NAJE et al., 2016).

### **2.2.3.5 pH**

O pH é um importante influenciador no processo de eletrofloculação (MOLLAH et al., 2004), afetando significativamente na dissolução dos eletrodos (NAJE et al., 2016). Entre os seus efeitos, está à formação de diferentes espécies de equilíbrio relacionadas ao coagulante. O tipo e a quantidade de espécies formadas podem gerar diferentes interações entre os poluentes, variando o desempenho e eficiência do processo. As diferentes condições de pH irão variar propriedades físico-químicas de coagulantes como a solubilidade de hidróxido de metal, a condutividade elétrica dos hidróxidos metálicos e o tamanho dos coloides formados. Preferencialmente para a coagulação, são preferíveis condições neutras, por apresentar íons mais eficientes (GARCIA-SEGURO et al., 2017).



Figura 3 – Diagrama de solubilidade das espécies de alumínio em função do pH do meio.



Fonte: SILVA, R. D. R. (2011).

É possível observar pela Figura 3 que o melhor pH para a formação de hidróxidos de alumínio para a coagulação ocorre entre o pH 6 e 7. A neutralização das cargas irá ocorrer em uma faixa estreita de pH 5-6, para pequenas doses de coagulantes e concentração de poluentes.

Outro efeito relacionado ao pH é quanto às mudanças nas estruturas dos poluentes, modificando a camada dupla e conseqüentemente afetando a formação dos agregados. Outras espécies presentes no meio aquoso também podem estar relacionadas ao pH, afetando diferentes ânions e a camada dupla blindagem dos coagulantes, bem como seu caráter oxidativo (GARCIA-SEGURO et al., 2017; EWERLING e DOMINGUÊS, 2014).

### 2.2.3.6 Temperatura

O efeito da temperatura na remoção de poluentes através da eletrofloculação têm sido pouco investigado, e alguns estudos demonstram que o seu aumento pode trazer benefícios ou malefícios ao processo. A alta temperatura aumenta a solubilidade do eletrodo de alumínio e forma flocos mais densos. A eficiência da remoção para eletrodos de alumínio tem um aumento até 60°C, e após isso a eficiência volta a diminuir. Por outro lado, com o aumento de temperatura há um aumento na condutividade da solução, diminuindo o consumo de energia elétrica. (NAJE et al., 2016; CHEN, 2004)

### **2.2.3.7 Concentração inicial do poluente**

Efluentes que possuem uma concentração inicial de poluentes menor tendem a alcançar maior eficiência no processo de tratamento, caso contrário, essa eficiência diminui. Isso pode ocorrer, pois a quantidade de hidróxido de metal gerado no tratamento pode não ser suficiente para coagular uma grande quantidade de poluentes, tornando o efeito da densidade de corrente irrelevante, principalmente na fase inicial onde a concentração desses poluentes é ainda maior (NAJE et al., 2016).

### **2.2.3.8 Condutividade elétrica**

A condutividade do efluente contribui para o transporte das cargas elétricas e mobilidade da corrente elétrica. Com isso, quanto maior for a condutividade do efluente, maior serão as reações que irão facilitar a remoção de poluentes por possibilitar uma maior condução de corrente elétrica, contribuindo dessa forma com a eficiência da eletrofloculação e processo de pré-tratamento do meio (KHALED et al., 2019; CERQUEIRA, 2006).

### **2.2.4 Vantagens e desvantagens da Eletrofloculação**

Os processos eletrolíticos vem sendo comparados com outras tecnologias de tratamento de efluente devido ao seu baixo custo, eficiência e por ser um sistema compacto, sendo considerados indispensáveis para efluentes que contenham poluentes mais resistentes (CHEN, 2004).

As principais vantagens segundo Mollah et al. (2004) são a versatilidade, eficiência energética, segurança, receptividade para automação, relação custo-benefício.

Garcia-Seguro et al. (2017) também citam outras vantagens como a rápida e eficaz separação da matéria orgânica, geração de coagulantes altamente puros para uma melhor remoção sem o uso de produtos químicos, e baixos custos operacionais quando comparados com tecnologias primárias de tratamento como decantadores convencionais, de alta taxa ou sedimentação melhorada (com coagulantes).

Além dessas, Crespilho e Rezende (2004) apresentaram vantagens como a simplicidade do equipamento e operação, com corrente e potencial sendo controlados de forma automatizada, os flocos formados são maiores podendo ser removidos por filtração.

Contudo, esse método acaba apresentando algumas desvantagens como o desgaste dos eletrodos ao longo do tratamento podendo inibir a eficiência do processo e fazendo necessária a substituição dos mesmos após o processo ter sido realizado algumas vezes a depender da densidade de corrente utilizada (correntes maiores tendem a aumentar o desgaste dos eletrodos), quando utilizado eletrodos de ferro o efluente pode apresentar altas concentrações de íons após o processo sendo necessário um pós-tratamento, o uso de energia elétrica em determinados lugares pode ser cara, e pode haver formação de uma película de óxido impermeável no cátodo reduzindo a eficiência da célula eletrolítica (GARCIA-SEGURO et al., 2017; CRESPILHO e REZENDE, 2004).

### 2.2.5 Tratamento de vinhaça por Eletrofloculação

Considerando que a vinhaça é um efluente com alta concentração de matéria orgânica e com altas concentrações de DQO, a eletrofloculação se mostra como uma alternativa viável e inovadora para o seu tratamento.

Tabela 2: Eficiências relatadas em literatura para eletrofloculação da vinhaça.

<b>Autores</b>	<b>Remoção ST (%)</b>	<b>Remoção Turbidez (%)</b>	<b>Remoção DQO (%)</b>
<b>Karchiyappan et al. (2019)</b>	-	86	59
<b>Rincón et al. (2008)</b>	37	-	-
<b>Davila, Machuca e Marrianga (2011)</b>	50	89	25

Fonte: Adaptado de Karchiyappan et al. (2019), Rincón et al. (2008) e Davila et al. (2011).

Karchiyappan et al. (2019), fizeram o pré-tratamento de 0,2L de vinhaça a uma agitação de 50 rpm, variando o tempo de detenção hidráulica, distância de eletrodo e dose de

eletrólito (solução que facilita a passagem de corrente elétrica na solução), e confirmaram que a eletrofloculação apresenta ótimas condições de operação com uma máxima remoção em um tempo de eletrólise de até 50 minutos. Constataram que com distâncias entre os eletrodos maiores que 1,5 cm e com doses de eletrólito maiores que 1 g/L, ocorre uma diminuição drástica para a eficiência de remoção dos poluentes. Com essas condições foi possível alcançar os resultados para turbidez e DQO citados na Tabela 2.

Analisando a remoção de sólidos totais de vinhaça, Rincón, Cabrales e Marinez (2008) construíram uma célula eletrolítica com 0,25 L de efluente com uma agitação a 80 rpm durante 15 minutos, e verificaram a influência de variáveis como densidade de corrente, pH inicial e concentração de NaCl como suporte eletrolítico. Observaram então, que a densidade de corrente influenciou diretamente na quantidade de alumínio liberado no meio como coagulante. As condições alcalinas foram mais favoráveis para remoção dos sólidos totais e dissolução total de sólidos de alumínio na solução, além disso, constataram que devido à alta condutividade elétrica da vinhaça, não é necessário o uso de eletrólito suporte.

Davila, Machuca e Marrianga (2011), construíram um eletrofloculador para tratar 0,5 L de vinhaça com uma agitação de 110 rpm e eletrodos separados por 1 cm. Obtiveram remoções apresentadas na Tabela 2 indicando que o tratamento por eletrofloculação funciona de forma vantajosa, e chegaram a conclusão que em um pH ácido favorece a remoção de sólidos totais e turbidez, enquanto condições básicas melhoram a remoção de DQO. Além disso, concluíram que a agitação pode influenciar de maneira positiva ou negativa a eletrofloculação, pois em altas rotações pode quebrar as ligações formadas entre os coloides.

É nítido que os valores alcançados para remoção variam bastante de acordo com cada experimento, e podem ser explicados pelas características e condições da vinhaça inicial, bem como a montagem da célula eletrolítica, que variam desde a composição do efluente utilizado para tratamento, até a agitação durante o processo.

### **3. CONCLUSÃO**

Nas condições do experimento realizado, a vinhaça bruta decantada apresentou resultados melhores e mais eficientes para turbidez, sólidos suspensos totais, e DQO solúvel, sendo então a prática mais adequada de acordo com a viabilidade e facilidade quando comparadas com o pré-tratamento por eletrofloculação nas condições (corrente, tempo e densidade de corrente) sugeridas no presente estudo.

A densidade de corrente e tipo de efluente podem ter minimizado a eficiência do tratamento por eletrofloculação, já que quanto mais alta a densidade de corrente mais eficiente e melhor será a remoção de poluentes do meio, e pelo fato da vinhaça ser um efluente com uma carga de poluentes muito alta, o coagulante produzido em corrente baixa e constante pode não ter sido o suficiente para o tratamento.

A literatura não fornece um modelo ideal de Eletrofloculação para desempenhar um tratamento amplo aceitável e confiável para efluentes, sendo necessários novos testes e adequações de acordo com água residual escolhida.

### **4. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS**

A partir das conclusões para este trabalho, sugere-se então o teste de novas condições, variando o tempo e aumentando a densidade de corrente para que seja possível analisar a possível melhora de remoção desses poluentes.

É necessário também o teste de diferentes condições de pH, visto que a literatura demonstra melhor funcionamento do reator para pH neutro, enquanto diferentes autores demonstram uma melhor eficiência para a remoção de poluentes em pH ácido e básico.

Considerando que a vinhaça é um efluente com alta concentração de poluentes, seria interessante testar o aumento do número de cátodos e ânodos no eletrodo, para testar o favorecimento do processo.

## 5. REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, G. J. F.; OLIVEIRA, S. V. W. B. Vinhaça - Conceitos, desafios e oportunidades: Uma revisão Bibliográfica. **XXIII Simpósio de Engenharia de Produção**, Bauru - SP, 2016.
- AQUINO NETO, S. de et al. Tratamento de resíduos de corante por eletrofloculação: um experimento para cursos de graduação em química. **Química Nova**, São Paulo, n. 8, v. 34, p. 1468-1471, 2011.
- BRAUNBECK, O.; BAUEN, A.; ROSILLO-CALLE, F.; CORTEZ, L. Prospects for green cane harvesting and cane residue use in Brazil. **Biomass And Bioenergy**, [S.I.], n.17, p.495-506, 16 jul. 1999.
- BORBA, F. H. et al. Avaliação da eficiência técnica de eletro-floculação no tratamento de efluentes de indústrias de subprodutos avícolas. **Estudos Tecnológicos**, [S.I.], n.1, v. 6, p. 36-47, 2010.
- BRITO, F. L. et al. Qualidade do percolado de solos que receberam vinhaça em diferentes doses e tempo de incubação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [S.I.], n. 3, v. 11, p. 318-323, jun. 2007.
- CANDIDO, C. **Cultivo de *Chlorella Vulgaris* em vinhaça convencional e biodigerida tratada**: uma abordagem ecofisiológica. 2015. 70 p. Dissertação (Pós-Graduação em Ecologia e Recursos Naturais) - UFSCAR, São Carlos, 2015.
- CANDIDO, C.; LOMBARDI, A. T.; LIMA, M. I. S. Cultivo de *Chlorella Vulgaris* em vinhaça filtrada. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, [S.I.], n. 35, p. 55-62, mar. 2015.
- CERQUEIRA, A. A. **Aplicação da técnica de eletrofloculação no tratamento de efluentes têxteis**. Dissertação (Mestrado em Química) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio Janeiro, 2006.
- CHELLAM, S.; SARI, M. A. Aluminum electrocoagulation as pretreatment during microfiltration of surface water containing: A review of fouling NOM, DBP, and virus control. **Journal of Hazardous Materials**, Colorado, v. 304, p. 490-501, set. 2015.

CHEN, Guohua. Electrochemical technologies in wastewater treatment. **Separation and Purification Technology**, [S.I.], v.38, p.11–41, jul. 2004.

DALLAGO, R. M. et. al. Eletrofloculação aplicada ao tratamento de efluente de laticínio. **Perspectiva**, [S.I.], n. 135, v. 36, p. 101-111, set. 2012.

DAVILA, J. A.; MACHUCA, F.; MARRIANGA N. Treatment of vinasses by electrocoagulation–electroflotation using the Taguchi method. **Electrochimica Acta**, [S.I.], n.56, p.7433-7436, 2011.

DEMIRCI Y.; PEKEL, L. C.; ALPBAZ M. Investigation of different electrode connections in electrocoagulation of textile wastewater treatment. **International Journal of Electrochemical Science**, [S.I.], v. 10, p. 2685-2693, 2015.

EWERLING, A.; DOMINGUÊS, M. D. A. **Eficiência do processo de eletrofloculação no tratamento do efluente de uma lavanderia industrial**. 2014. TCC (Curso Superior de Tecnologia em Gestão Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, 2014.

FAYAD, N. The application of electrocoagulation process for wastewater treatment and for the separation and purification of biological media. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Université Clermont Auvergne, França, 2017.

FORNARI, M. M. T. **Aplicação da técnica de eletro-floculação no tratamento de efluentes de curtume**. 2007. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2007.

GARCIA-SEGURA, S. 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.I.], n. 801, p. 1107-1126, 15 set. 2017.

GOBBI, L. C. A. **Tratamento de Água Oleosa por Eletrofloculação**. 2013. Dissertação (Pós-Graduação em Energia) – Universidade Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2013.

GOES, T.; MARRA, R.; SOUZA, G. S. Setor sucroalcooleiro no Brasil: situação atual e perspectivas. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, ano 17, n. 2, pag. 39-51, abr./maio/jun. 2008.

GUPTA, S. *et al.* Current practices and challenges in using microalgae for treatment of nutrient rich wastewater from agro-based industries. **Science of the Total Environment**, [S.I.], n. 687, p. 1107-1126, 2019.

KANNAN, N.; KARTHIKEYAN, G.; TAMILSELVAN, N. Comparison of treatment potential of electrocoagulation of distillery effluent with and without activated *Areca catechu* nut carbon. **Journal of Hazardous Materials**, [S.I.], v. B137, p. 1803–1809, 2006.

KARCHIYAPPAN, T. *et al.* Treatment of vinasse liquid from sugarcane industry using electrocoagulation/flocculation followed by ultra filtration. **Polish Journal of Chemical Technology**, [S.I.], n. 4, v. 21, p. 40-44, 2019.

KHALED, B. *et al.* Investigation of electrocoagulation reactor design parameters effect on the removal of cadmium from synthetic and phosphate industrial wastewater. **Arabian Journal of Chemistry**, [S.I.], v. 12, p. 1848-1859, dez. 2019.

LIRA, R. A. *et al.* As microalgas como alternativa à produção de biocombustíveis. **Engenharia na agricultura**, Viçosa - MG, v. 20, ed. 5, p. 389-403, 2012.

MARQUES, G. M. Vinhaça: O futuro da fertilização. **Meio Ambiente**, São Paulo, n. 66, ano: 48, ed. 66, 8 jul. 2015.

MOLLAH, M. Y. A. *et al.* Electrocoagulation (EC) — science and applications. **Journal of Hazardous Materials**, [S.I.], n. 1, v. 84, p. 29–41, jun. 2001.

MOLLAH, M. Y. *et al.* Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. **Journal of Hazardous Materials**, [S.I.], n. 1, v. 114, p. 199- 210, 2004.

MORENO-CASILLAS, H. A. *et al.* Electrocoagulation mechanism for COD removal. **Separation and Purification Technology**, [S.I.], v. 56, p. 204–211, 2007.

NAJE, A. S. *et al.* A review of electrocoagulation technology for the treatment of textile wastewater. **Reviews in Chemical Engineering**, [S.I.], n. 33, p. 263-292, 2016.

NIDAL, F. The application of electrocoagulation process for wastewater treatment and for the separation and purification of biological media. **Chemical and Process Engineering**. Université Clermont Auvergne, 2017.



POELMAN, E. et al. Potential of electrolytic flocculation for recovery of micro-algae. **Resources, Conservation and Recyclin**, [S.I.], n. 19, p. 1-10, 1997.

RINCÓN, J. D.; CABRALES A. M.; MARTINEZ, F. M. Remoción de sólidos totales de vinazas por electrocoagulación – electroflotación. **Dyna**, Medellín, n. 158, v. 76, p. 41-47, Jun. 2009.

ROLIM, M. M. et al. Influência de uma lagoa de distribuição de vinhaça na qualidade de água freática. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, n. 1, v. 8, p. 155-171, abr. 2013.

SEIXAS, F. L.; GIMENES, M. L.; FERNANDES-MACHADO, N. R. C. Tratamento da vinhaça por adsorção em carvão de bagaço de cana-de-açúcar. **Química Nova**, São Paulo, n. 2, v.39, p. 172-179, 2016.

SILVA, M. A. S. da; GRIEBELER, N. P.; BORGES, L. C. Uso de vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, n. 1, v. 11, p. 108-114, fev. 2007.

SILVA, R.D.R. **Interações de íons sulfatos com sais de alumínio em soluções ácidas, estudos básicos e aplicações ambientais**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ZENOZI, A. et al. Harvesting of microalgae *Dunaliella salina* Using Electroflocculation. **Journal of Agricultural Science and Technology**, [S.I.], v. 15, p. 879-888, 2013.

## **ARTIGO - AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO TRATAMENTO DA VINHAÇA POR ELETROFLOCULAÇÃO**

**Resumo:** O presente estudo teve como objetivo avaliar a utilização da eletrofloculação como tratamento da vinhaça quando comparado à decantação desse mesmo efluente. A eletrofloculação foi executada em um recipiente de acrílico com eletrodos de alumínio, onde os parâmetros analisados foram corrente (1 e 2 A) e tempo (45 e 90 minutos). Foram realizadas análises físico e químicas em triplicata para Sólidos Suspensos Totais, Demanda Química de Oxigênio solúvel e Turbidez, para comparações primárias. As amostras eletrofloculadas alcançaram valores máximos de 16 NTU para turbidez, 152 mg/L para Sólidos Suspensos Totais e 10230 mg/L para Demanda Química de Oxigênio, enquanto a vinhaça decantada alcançou valores de 4,2 NTU, 149 mg/L para Sólidos Suspensos Totais e 9638 mg/L para Demanda Química de Oxigênio. Notou-se que a densidade de corrente e o tipo de efluente são fatores decisivos para tornar o pré-tratamento por eletrofloculação eficaz, sendo necessários novos testes e adequações de acordo com o objetivo do projeto pretendido.

**Palavras-chave:** Tratamento Eletroquímico. Efluente. Remoção de poluentes. Tempo. Corrente.

### **1. INTRODUÇÃO**

Atualmente, o setor sucroalcooleiro vem sendo considerado um dos mais dinâmicos e promissores para a agricultura brasileira, devido à valorização do etanol para a produção de combustíveis limpos e renováveis, e por minimizar conseqüentemente mudanças climáticas. Outro fator que vem contribuindo para a ascensão dessa indústria é a destinação adequada e a estima pelos resíduos gerados no processo industrial, como a vinhaça, bagaço, torta de filtro, entre outros (GOES, MARRA e SOUZA, 2008).

A vinhaça é um efluente provindo da destilação fracionada do caldo de cana-de-açúcar, sendo usado por muitas vezes na fertirrigação do próprio plantio por ser considerada uma importante fonte de potássio e nutrientes, e um bom substituto completo ou parcial de adubação mineral (GOES, MARRA e SOUZA, 2008). Por apresentar altas concentrações de matéria orgânica, Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO), esse tipo de efluente apresenta um alto índice poluidor, e quando usado diretamente em solo sem seguir as legislações, pode causar danos ao meio ambiente, sendo o lençol freático o principal afetado. Uma das maneiras de evitar esses danos ambientais é através do

tratamento desse efluente (ARAÚJO e OLIVEIRA, 2016; CANDIDO, LOMBARDI e LIMA, 2015).

A Eletrofloculação é uma tecnologia eletroquímica que vem sendo utilizada como pré-tratamento de efluentes por ter como capacidade reduzir de fato, desde metais pesados a poluentes orgânicos (GARCIA-SEGURA et al., 2017). Essa tecnologia vem sendo bastante estudada devido ao seu grande potencial e vantagens como um sistema compacto e a não utilização de substâncias químicas, tornando esse processo ainda mais favorável (ZENOUZI et al., 2013; POELMAN et al., 1997).

O processo de Eletrofloculação consiste na agregação de coloides através da coagulação por agentes coagulantes de ligação formados pelo ânodo. Os poluentes são separados do meio aquoso por precipitação e flotação dos coágulos através dos gases formados no cátodo para que sejam removidos da efluente tratado por mecanismos como sedimentação, filtração, centrifugação, entre outros. (GARCIA-SEGURO et al., 2017)

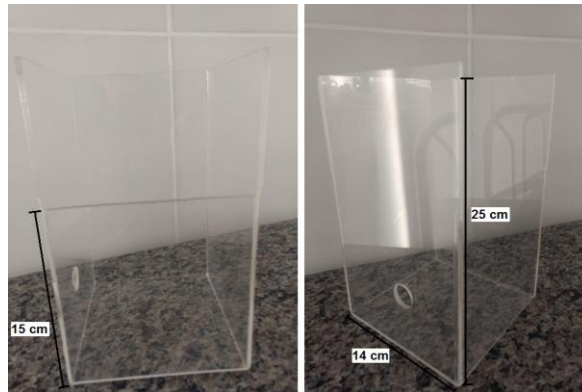
Considerando a alta quantidade de vinhaça produzida anualmente nas indústrias, e a necessidade de uma alternativa sustentável para o seu uso, o estudo em questão tem a finalidade de avaliar a tratabilidade da vinhaça por processo de eletrofloculação com eletrodo de alumínio, variando parâmetros operacionais de tempo e corrente.

## **2. METODOLOGIA**

Neste trabalho o efluente de vinhaça utilizado foi coletado na saída de um destilador da Cachaçaria Bocaina localizada no município de Lavras, Sul de Minas Gerais. Todo o efluente gerado nessa unidade é posteriormente utilizado na fertirrigação da lavoura plantada no local.

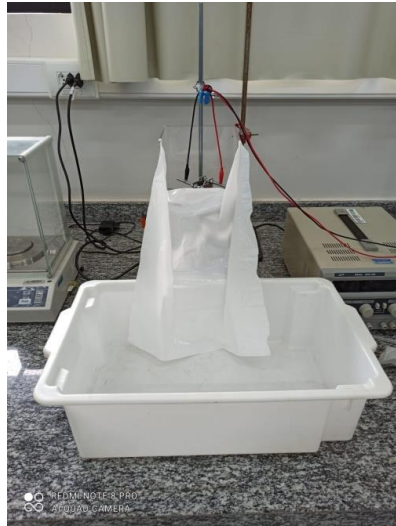
A eletrofloculação foi realizada no Laboratório de Bioenergia no Departamento de Engenharias da Universidade Federal de Lavras - UFLA. O experimento foi realizado em um recipiente de acrílico (Figura 3) com espessura de 4 mm, e dimensões de 25 cm para a altura de três chapas, 15 cm para a altura de uma chapa – para facilitar a retirada da espuma formada ao longo do experimento –, e 14 cm de largura e comprimento, com uma torneira acoplada na parte inferior com a finalidade de coletar amostras para análises (Figura 4).

Figura 3 – Dimensões do recipiente utilizado como reator.



Fonte: Do autor (2021).

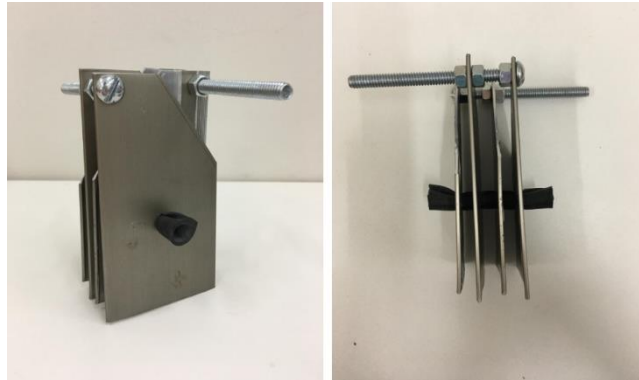
Figura 4 – Plástico ligado à placa de 15 cm do reator para remoção de espuma.



Fonte: Do autor (2021).

O eletrodo foi montado com 2 cátodos e 2 ânodos, ambos de alumínio com 0,1 cm de espessura e dimensões de 8 cm de comprimento e 5,5 cm de altura (Figura 5). As placas de alumínio foram intercaladas em seu interior com distâncias de 1 cm, utilizando parafusos para unir os cátodos e ânodos, e um pedaço de câmara de pneu no centro das placas para garantir a fixação e imobilidade das placas de forma isolada.

Figura 5 – Eletrodo montado.



Fonte: Do autor (2021).

Com o intuito de facilitar os ensaios experimentais para obter melhores resultados e aprimorar o desenvolvimento do processo, foi elaborada uma matriz de planejamento, com 4 ensaios realizados uma vez, onde os parâmetros analisados foram, corrente (1 e 2 A) e tempo (45 e 90 minutos). As densidades de corrente foram de 5,7 mA/cm<sup>2</sup> para os casos com corrente de 1 A e 11,3 mA/cm<sup>2</sup> para a corrente de 2 A.

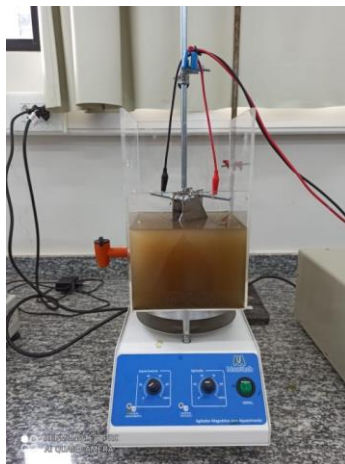
Tabela 3: Matriz de planejamento do pré-tratamento da vinhaça por eletrofloculação.

<b>Ensaio</b>	<b>Corrente (A)</b>	<b>Tempo (min)</b>
<b>1</b>	1	45
<b>2</b>	1	90
<b>3</b>	2	45
<b>4</b>	2	90

Fonte: Do autor (2021).

Os ensaios de eletrofloculação foram realizados com 2,5 litros de vinhaça com o pH do efluente foi corrigido para 7 através da solução de NaOH 50% para garantir de acordo com a literatura, maior eficiência, mantendo a temperatura ambiente e agitação constante de 20% através do agitador magnético para homogeneização da amostra durante o experimento (Figura 6). O eletrodo foi ligado a uma fonte de alimentação de modelo SKFA-05D (Figura 7), e foi sustentado por um suporte de alumínio possibilitando o processo de eletrofloculação.

Figura 6 – Reator preenchido com vinhaça, junto ao eletrodo e agitador magnético.



Fonte: Do autor (2021).

Figura 7 – Fonte de alimentação utilizada no experimento.



Fonte: Do autor (2021).

Após cada experimento, as amostras foram decantadas em provetas por 24 horas e tiveram o sobrenadante coletado e armazenado na geladeira até que fossem realizadas as análises para garantir que as características da vinhaça pré-tratada fossem mantidas.

Para que as condições fossem as mesmas para todas as amostras, a vinhaça bruta foi coletada da mesma maneira que as amostras pré-tratadas por eletrofloculação, ou seja, pela torneira do recipiente e sendo homogeneizada pelo agitador magnético, e após isso, a mesma foi decantada para posterior comparação de eficiências.

Foram realizadas análises físico e químicas em triplicata para sólidos suspensos totais (APHA (2012), método 2540), DQO solúvel (APHA (2012), método 5220D), e turbidez (APHA (2012), método 2130B) através do Turbidímetro Ap 2000 Policontrol, ao final do experimento depois que todas as amostras estivessem decantadas. Para amostra bruta foram

feitas as análises para Sólidos Suspensos Totais e turbidez. Através dos resultados obtidos nas análises para as amostras foi possível fazer uma comparação primária.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 2 apresenta as características para pH, Turbidez e Sólidos Suspensos Totais (SST) para a vinhaça *in natura*.

Tabela 2 – Caracterização da vinhaça bruta.

Amostra	pH	Turbidez (NTU)	SST (mg/L)
<b>Vinhaça Bruta</b>	3,6	857	1764

Fonte: Do autor (2021).

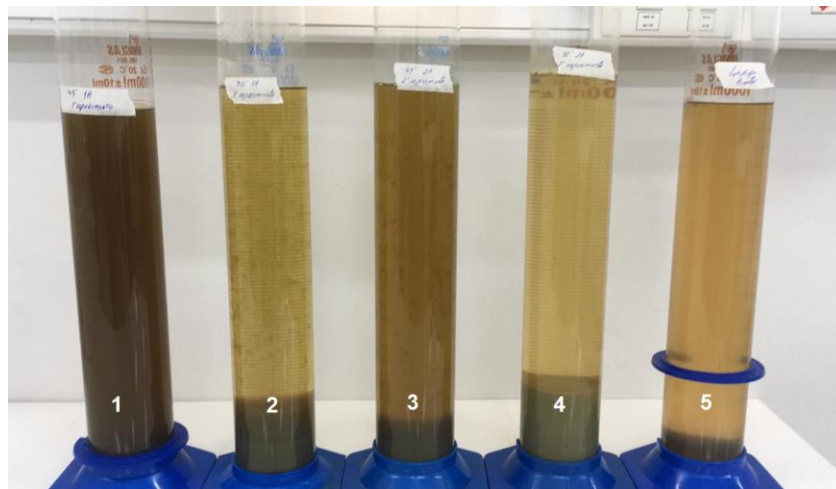
A vinhaça apresentou um pH de 3,6, indicando elevada acidez. Segundo Seixas, Gimenes e Fernandes-Machado (2016), a acidez característica da vinhaça é causada pela adição de ácido sulfúrico durante a fermentação e pela grande quantidade de matéria orgânica na forma de ácidos orgânicos.

O efluente apresentou uma turbidez alta de 857 NTU, sendo uma das principais preocupações do descarte inadequado em cursos d'água, uma vez que sua coloração escura dificulta a penetração de luz solar, podendo prejudicar a fotossíntese e o ecossistema aquático (KANNAN, KARTHIKEYAN e TAMILSELVAN, 2006).

Os Sólidos Suspensos Totais da vinhaça ficaram em torno de 1764 mg/L. Braunbeck et al. (1999) notaram que esse efluente possui baixa concentração de sólidos (entre 2 à 4%), sendo a sua maior quantidade em matéria orgânica.

Após a eletrofloculação as amostras decantaram por 24 horas (Figura 6). Porém, percebeu-se que com 24 horas de decantação o efluente passou a apresentar partículas suspensas novamente para as amostras eletrofloculadas, o que pode ter prejudicado as análises e resultados finais para os parâmetros estudados.

Figura 6 – Amostras após 24 horas de decantação. Sendo da esquerda para a direita os experimentos 1, 2, 3, 4 e a vinhaça decantada 5.



Fonte: Do autor (2021).

Uma possível explicação para esse fenômeno seria através das forças de atração de Van der Waals pela polarização induzida, onde a energia de ligação entre os colóides é muito fraca, fazendo com que após certo tempo as forças repulsivas voltem a dominar desfazendo as ligações, e conseqüentemente retornando o estado de dispersão do sistema (RODRIGUES, SILVA e QUADROS, 2011).

Isso pode ter acontecido pela densidade de corrente ser considerada baixa. Segundo Fayad et al. (2017), a densidade de corrente determina a taxa de dosagem de coagulante, taxa de produção de bolhas, tamanho e crescimento dos flocos, a qual aumentam o efeito e eficácia do processo eletroquímico.

Gardiman et al. (2019) diz que, a súbita elevação de turbidez pode ser relacionada com a liberação de  $Al^{3+}$  no ânodo e a variação do pH. A precipitação com formação do  $Al(OH)_3$  só ocorrerá em intervalos específicos de pH e a depender da concentração das espécies hidrolisadas formadas durante o processo. A liberação de moléculas complexas levam a alterações e conseqüente insolubilidade do  $Al(OH)_3$  em valores de pH entre 5-6, intervalo de pH que o efluente transitou durante o tratamento.

### 3.1 Turbidez

Os valores de turbidez final variaram de 16 a 92 NTU para as amostras eletrofloculadas, tornando o resultado eficiente quando comparado com o valor de turbidez



para vinhaça bruta (Tabela 2). Porém, a vinhaça bruta decantada alcançou uma turbidez ainda menor de 4,2 NTU, tendo uma eficiência maior quando comparada a amostra bruta.

Tabela 3 – Valores finais de turbidez para as amostras eletrofloculadas e vinhaça decantada.

<b>Amostras</b>	<b>Tempo (min.)</b>	<b>Corrente (A)</b>	<b>Turbidez (NTU)</b>
Experimento 1	45	1	92
Experimento 2	90	1	16
Experimento 3	45	2	60
Experimento 4	90	2	17
Vinhaça decantada	-	-	4,2

Fonte: Do autor (2021).

Houve um impacto positivo para o tempo de 90 minutos chegando bem próximo ao resultado obtido para a amostra decantada, enquanto as amostras de 45 minutos se tornaram inferiores. O aumento dessa turbidez nos experimentos 1 e 3 podem estar associados à baixa densidade de corrente aplicada no sistema e ao menor tempo, uma vez que as amostras 2 e 4 demonstraram maior estabilidade dos agregados devido ao tempo maior aplicado.

### **3.2 Sólidos Suspensos Totais (SST)**

A determinação dos SST é de extrema importância para assegurar que o efluente foi tratado. A vinhaça decantada teve ao final do experimento 148 mg/L, enquanto as amostras eletrofloculadas variaram os seus resultados de 152 à 378 mg/L de sólidos suspensos totais, sendo resultados considerados relevantes em relação ao valor de SST para a vinhaça bruta (Tabela 2).

Tabela 4 – Valores finais para SST para as amostras eletrofloculadas e vinhaça decantada.

<b>Amostras</b>	<b>Tempo (min.)</b>	<b>Corrente (A)</b>	<b>SST (mg/L)</b>
Experimento 1	45	1	283
Experimento 2	90	1	201
Experimento 3	45	2	378
Experimento 4	90	2	152
Vinhaça decantada	-	-	148

Fonte: Do autor (2021).

Segundo Rincón, Cabrales e Martínez (2008), parâmetros como pH e densidade da corrente influenciam na eficiência de remoção de sólidos totais da vinhaça, demonstrando que

um pH inicial em condições básicas e o aumento da densidade de corrente contribuem com uma maior concentração de solução de alumínio, ajudando a desestabilizar as partículas coloidais que serão posteriormente eliminadas por flotação ou sedimentação.

Ainda, Gardiman et al. (2019) demonstra que menores eficiências para a remoção de sólidos, como observadas em alguns ensaios do atual projeto, podem estar relacionadas a incorporação do material do eletrodo consumido no sistema, e elevados teores de açúcares e sólidos dissolvidos presentes na vinhaça.

### 3.3 Demanda Química de Oxigênio – solúvel (DQOs)

Apesar da DQOs não ser um composto específico, ela é utilizada como indicador de grau de poluição de um efluente, demonstrando o potencial de impacto ambiental que o mesmo pode causar em corpos d'água. A partir das análises, foi possível observar que a vinhaça decantada teve o menor valor para DQOs, enquanto para as amostras eletrofloculadas, as condições do experimento 4 foram mais favoráveis.

Tabela 5 – Valores finais para DQO solúvel.

<b>Amostras</b>	<b>Tempo (min.)</b>	<b>Corrente (A)</b>	<b>DQOs (mg/L)</b>
Experimento 1	45	1	10420
Experimento 2	90	1	10573
Experimento 3	45	2	10286
Experimento 4	90	2	10230
Vinhaça decantada	-	-	9638

Fonte: Do autor (2021).

Fornari (2007) e Dallago et al. (2012) afirmam que quanto maior a densidade de corrente, maior será a remoção de DQO do meio, podendo ser uma justificativa para os presentes resultados.

Em contra partida, Moreno-Cassilas et al. (2007) relaciona a redução de DQO com o pH do meio, afirmando que para eletrodos de Alumínio a eficácia será maior para valores de pH ácidos, já que dessa forma o alumínio teria apenas um estado de oxidação, a sua solubilidade seria mínima, e a evolução de oxigênio no cátodo ajudaria com a demanda de oxigênio. Os mesmos autores ainda afirmam que a carga orgânica pode aumentar no efluente quando compostos reagem para formar produtos solúveis e permanecem no meio, podendo

justificar os valores de DQO mais altos para as amostras eletrofloculadas quando comparadas com a vinhaça decantada.

Em estudos Gardiman et al. (2019), afirmaram que a eletrofloculação possui baixa eficiência para a remoção de sólidos dissolvidos, o que explica pouca variação nos resultados das amostras eletrofloculadas em diferentes condições. Sendo assim, os sólidos dissolvidos fixos do próprio efluente se aglutinam aos hidróxidos gerados no reator formando pequenos flocos, o que acaba elevando os valores de turbidez. Esse mesmo autor afirma que a baixa remoção de DQO está associada aos compostos constituintes da vinhaça como a sacarose, que não são removidos pelo tratamento eletrolítico ressaltando ainda que a remoção de DQO via eletrofloculação é pouco conhecida, o que favorece as observações feitas para o atual projeto.

#### 4. CONCLUSÃO

Nas condições do experimento realizado, a vinhaça bruta decantada apresentou resultados melhores e mais eficientes para turbidez, sólidos suspensos totais, e DQO solúvel, sendo então a prática mais adequada de acordo com a viabilidade e facilidade quando comparadas com o pré-tratamento por eletrofloculação nas condições (corrente, tempo e densidade de corrente) sugeridas no presente estudo.

A densidade de corrente e tipo de efluente podem ter minimizado a eficiência do tratamento por eletrofloculação, já que quanto mais alta a densidade de corrente mais eficiente e melhor será a remoção de poluentes do meio, e pelo fato da vinhaça ser um efluente com uma carga de poluentes muito alta, o coagulante produzido em corrente baixa e constante pode não ter sido o suficiente para o tratamento.

A literatura não fornece um modelo ideal de Eletrofloculação para desempenhar um tratamento amplo aceitável e confiável para efluentes, sendo necessário novos testes e adequações de acordo com água residual escolhida.

#### 5. REFERÊNCIAS

ARAUJO, G. J. F.; OLIVEIRA, S. V. W. B. Vinhaça - Conceitos, desafios e oportunidades: Uma revisão Bibliográfica. **XXIII Simpósio de Engenharia de Produção**, Bauru - SP, 2016.

BRAUNBECK, O.; BAUEN, A.; ROSILLO-CALLE, F.; CORTEZ, L.. Prospects for green cane harvesting and cane residue use in Brazil. **Biomass And Bioenergy**, [S.I.], n.17, p.495-506, 16 jul. 1999.

CANDIDO, C.; LOMBARDI, A. T.; LIMA, M. I. S. Cultivo de *Chlorella Vulgaris* em vinhaça filtrada. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, [S.I.], n. 35, p. 55 - 62, mar. 2015.

DALLAGO, R. M. et. al. Eletrofloculação aplicada ao tratamento de efluente de laticínio. **Perspectiva**, [S.I.], n. 135, v. 36, p. 101-111, set. 2012.

DAVILA, J. A.; MACHUCA, F.; MARRIANGA N. Treatment of vinasses by electrocoagulation–electroflotation using the Taguchi method. **Electrochimica Acta**, [S.I.], n.56, p.7433-7436, 2011.

FORNARI, M. M. T. **Aplicação da técnica de eletro-floculação no tratamento de efluentes de curtume**. 2007. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2007.

GARCIA-SEGURA, S. 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**, n. 801, p. 1107-1126, 15 set. 2017.

GARDIMAN JUNIOR, B. S.; GARCIA, G. O.; REIS, E. F. Avaliação da taxa de remoção e custo do tratamento da água residuária do café por um sistema eletrolítico. **RAMA**. v. 12, n. 3, jul-set. 2019.

GOES, T.; MARRA, R.; SOUZA, G. S. \_ Setor sucroalcooleiro no Brasil: situação atual e perspectivas. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, ano 17, n. 2, pag. 39-51, abr./maio/jun. 2008.

KANNAN, N.; KARTHIKEYAN, G.; TAMILSELVAN, N. Comparison of treatment potential of electrocoagulation of distillery effluent with and without activated *Areca catechu* nut carbon. **Journal of Hazardous Materials**, [S.I.], v. B137, p. 1803–1809, 2006.

KARCHIYAPPAN, T. *et al.* Treatment of vinasse liquid from sugarcane industry using electrocoagulation/flocculation followed by ultra filtration. **Polish Journal of Chemical Technology**, [S.I.], n. 4, v. 21, p. 40-44, 2019.

MORENO-CASILLAS, H. A. *et al.* Eletrocoagulation mechanism for COD removal. **Separation and Purification Technology**, [S.I.], v. 56, p. 204–211, 2007.

NIDAL, F. The application of electrocoagulation process for wastewater treatment and for the separation and purification of biological media. **Chemical and Process Engineering**. Université Clermont Auvergne, 2017.

POELMAN, E. et al. Potential of eletrolytic flocculation for recovery of micro-algae. **Resources, Conservation and Recyclin**, [S.I.], n. 19, p. 1-10, 1997.

RINCÓN, J. D.; CABRALES A. M.; MARTINEZ, F. M. Remoción de sólidos totales de vinazas por electrocoagulación – electroflotación. **Dyna**, Medellín, n.158, v. 76, p. 41-47, Jun. 2009.

RODRIGUES, S. B. V.; SILVA, D. C. da; QUADROS, A.L. O ensino superior de química: reflexões a partir de conceitos básicos para a química orgânica. **Química Nova**. Belo Horizonte, n.10, v.34, p.1840-1845, 14 jun. 2011.

SEIXAS, F. L.; GIMENES, M. L.; FERNANDES-MACHADO, N. R. C. Tratamento da vinhaça por adsorção em carvão de bagaço de cana-de-açúcar. **Química Nova**, [S.I.], v.39, p. 172-179, 2016.

ZENOZI, A. *et al.* Harvesting of microalgae *Dunaliella salina* Using Electroflocculation. **Journal of Agricultural Science and Technology**, [S.I.], v. 15, p. 879-888, 2013.