

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

FABRÍCIO VIUDES SIMONATO

**APLICAÇÃO DA FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO EM ASSOCIAÇÃO A
ELETROCOAGULAÇÃO NO TRATAMENTO DE EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE
LATICÍNIOS**

MEDIANEIRA

2025

FABRÍCIO VIUDES SIMONATO

**APLICAÇÃO DA FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO EM ASSOCIAÇÃO A
ELETROCOAGULAÇÃO NO TRATAMENTO DE EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE
LATICÍNIOS**

**APPLICATION OF DISSOLVED AIR FLOTATION IN ASSOCIATION WITH
ELECTROCOAGULATION IN THE TREATMENT OF EFFLUENT FROM THE
DAIRY INDUSTRY**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Ambiental da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Eduardo Eyng.

MEDIANEIRA

2025



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

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

FABRÍCIO VIUDES SIMONATO

**APLICAÇÃO DA FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO EM ASSOCIAÇÃO A
ELETROCOAGULAÇÃO NO TRATAMENTO DE EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE
LATICÍNIOS**

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

Data de aprovação: 13 de fevereiro de 2025

Eduardo Eyng
Doutorado em Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *campus* Medianeira

Fábio Orssatto
Doutorado em Engenharia Agrícola
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *campus* Medianeira

Laercio Mantovani Flare
Doutorado em Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná, *campus* Medianeira

MEDIANEIRA

2025

Dedico este trabalho aos meus pais, minha família,
amigos e a mim.

AGRADECIMENTOS

Começando pelo mais importante meus pais, pelos incentivos, apoios e forças que me deram para superar cada etapa desse ciclo, sem vocês não poderia sonhar em viver o que essa graduação me propôs. Meus avós foram um pouco diferentes, sempre me pediam para voltar pra casa, mas entenderam que era um objetivo na minha vida, e eu precisava cumprir ele.

Ao meus amigos obrigado por todas vivencias, seja me ajudando a levantar quando estava por baixo, ou compartilhando momentos alegres, sem dúvidas todos vocês facilitaram essa jornada, o que fica é a minha gratidão eterna.

Agradeço também a UTFPR por me dar a capacitação para pode exercer a minha profissão, aos todos os professores do DAAMB, e em especial ao meu orientador, eles foram os responsáveis por eu estar onde estou, logo agradeço os ensinamentos, paciência e carinho, podem ter certeza de que estarão guardados na minha memória.

Por último, sendo meio narcisista, resolvi dedicar esse trabalho a mim, afinal quem se dedicou, que se sacrificou, quem se doou fui eu, então nada mais justo que ser um dedicado. E isso servira de lembrete para mim mesmo, você consegue conquistar o que você se propor.

RESUMO

No processo de produção das indústrias é comum resultar no produto desejado e, junto a ele, alguns outros derivados desse processo, como, por exemplo, o efluente líquido, que geralmente está carregado com poluentes. É necessário realizar a limpeza desse efluente para que seja descartado corretamente. Para isso, é necessário aplicar um tratamento físico, químico, biológico ou uma combinação dos anteriores. O efluente produzido na indústria de laticínios não é diferente, por apresentar alta carga orgânica, nutrientes e grande quantidade de sólidos suspensos, sendo necessário o tratamento desses poluentes. Para o presente trabalho, foi escolhida uma associação de tratamentos físico-químicos sendo aplicado ao efluente de laticínios. Utilizou-se a eletrocoagulação, que é um tratamento eletroquímico onde ocorre a eletrólise com o ânodo de sacrifício de alumínio, que aglutina os poluentes nos íons, fazendo com que eles se tornem um aglomerado para remoção por elevação ou decantação. Posteriormente, foi aplicada a Flotação por Ar Dissolvido (FAD), que gera microbolhas na base do equipamento. Essas microbolhas carregam o aglomerado até a superfície do equipamento, onde são retirados. Logo, o objetivo do trabalho foi avaliar a eficiência da FAD como tratamento posterior ao efluente de laticínios que foi tratado inicialmente pela eletrocoagulação. Portanto, foi coletado o efluente de uma indústria de laticínios localizada no Oeste do Paraná. Após a coleta, foi aplicado o tratamento de eletrocoagulação e feitas análises químicas para quantificação dos dados. Com os dados obtidos, foi realizado o tratamento da eletrocoagulação para o melhor cenário, e com esse efluente obtido, foi submetido à FAD para avaliar seus reais impactos no tratamento desse efluente. Inicialmente, observa-se que o tratamento da eletrocoagulação, como etapa única, foi promissor, pois apresentou resultados de remoção elevados. No entanto, não foi possível estabelecer um modelo matemático para otimizar o tratamento. A FAD, como etapa posterior, apresentou bons resultados principalmente na cor e turbidez, 39,2 NTU e 100,2 ABS respectivamente, sendo que seus valores iniciais eram 237,8 para cor e 112,4 NTU para turbidez. Para DQO também foram obtidos resultados bons, chegando a 1838 mg/L, o que representa uma queda significativa, considerando seu alto valor inicial 2929,5 mg/L. A eletrocoagulação enquanto etapa única de tratamento apresentou desempenho significativo para os três parâmetros DQO, cor e turbidez, sendo os melhores resultados de remoções 80,58%, 72,13% e 72,27% respectivamente, indicando que a eletrocoagulação como tratamento único é eficaz e promissor.

Palavras-chave: Sistemas de tratamento de efluentes; Tratamento físico-químico de efluentes; Associação de tecnologias.

ABSTRACT

In the production process of industries, it is common to obtain the desired product along with some by-products, such as, for example, liquid effluent, which is usually loaded with pollutants. It is necessary to treat this effluent to ensure its proper disposal. To do this, physical, chemical, biological treatment, or a combination of these must be applied. The effluent produced in the dairy industry is no different, as it contains high organic load, nutrients, and a large amount of suspended solids, requiring treatment for these pollutants. For this study, a combination of physical-chemical treatments was chosen to be applied to the dairy effluent. Electrocoagulation was used, which is an electrochemical treatment where electrolysis occurs with an aluminum sacrificial anode. This process agglomerates pollutants into ions, causing them to form a cluster that can be removed by elevation or decantation. Subsequently, Dissolved Air Flotation (DAF) was applied, which generates microbubbles at the base of the equipment. These microbubbles carry the agglomerate to the surface of the equipment, where they are removed. Thus, the aim of the study was to evaluate the efficiency of DAF as a post-treatment to the dairy effluent initially treated by electrocoagulation. Therefore, the effluent from a dairy industry located in the West of Paraná was collected. After collection, the electrocoagulation treatment was applied, and chemical analyses were conducted to quantify the data. With the obtained data, electrocoagulation treatment was performed for the best scenario, and with the resulting effluent, it was subjected to DAF (Dissolved Air Flotation) to assess its real impacts on the treatment of this effluent. Initially, it was observed that the electrocoagulation treatment, as a standalone stage, was promising, as it showed high removal results. However, it was not possible to establish a mathematical model to optimize the treatment. The DAF, as a subsequent stage, showed good results, especially in color and turbidity, with 39.2 NTU and 100.2 ABS, respectively, whereas the initial values were 237.8 for color and 112.4 NTU for turbidity. For Chemical Oxygen Demand (COD), good results were also obtained, reaching 1838 mg/L, representing a significant drop considering its initial high value of 2929.5 mg/L. Electrocoagulation, as a standalone treatment stage, showed significant performance for the three parameters—COD, color, and turbidity—yielding the best removal results of 80.58%, 72.13%, and 72.27%, respectively, indicating that electrocoagulation as a single treatment is effective and promising.

Keywords: Treatment; Effluent; Optimization; Dissolved Air Flotation; Electrocoagulation.

Sumário

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo Geral	3
2.2 Objetivo Específicos	3
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 Caracterização do efluente	4
3.2 Eletrocoagulação	4
3.3 Flotação por Ar Dissolvido	6
4 METODOLOGIA	6
4.1 Coleta da amostra	6
4.2 Processo de eletrocoagulação	7
4.3 Planejamento experimental para a eletrocoagulação.....	8
4.4 Processo flotação por ar dissolvido	9
4.5 Análise químicas	11
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	12
6 CONCLUSÃO	18
REFERÊNCIAS	19

1 INTRODUÇÃO

O tratamento de efluentes acontece em uma sucessão de processos químicos, físicos e biológicos. Dentre os processos se pode ter a junção destes, para maior remoção dos poluentes, como por exemplo, os tratamentos físico-químicos, onde, exclusivamente, mesclam uma técnica envolvendo a separação de sólidos, com uma técnica que altere a composição química do efluente, a fim de separar o composto contaminante da água. Não basta apenas conhecer as técnicas para aplicação dos tratamentos, também é função do responsável competente identificar qual a melhor condição da técnica a ser usada no tratamento de efluentes em específico.

Atualmente no Brasil tem-se a resolução CONAMA nº 430/11 que é responsável por padronizar e estabelecer os padrões de lançamentos de efluentes em corpos hídricos, essa resolução garante que o efluente seja tratado e assim devolvido para o manancial, porém atendendo aos parâmetros que foram ditados na resolução a fim de preservar a qualidade deste efluente, logo a CONAMA agir como um documento norteador.

Os estados brasileiros possuem autonomia para adequar a legislação de acordo com que acharem necessário, assim adaptando os padrões e criando suas diretrizes visando as utilizações específicas de cada estado.

O Brasil é um grande produtor e exportador de laticínios ficando entre os 10 maiores exportadores de laticínios, e em produção mundial de leite só perde para Índia, União Europeia e Estados Unidos (CARVALHO, RESENDE, ROCHA, 2020).

A indústria de laticínios é sem dúvida uma vertente econômica importante para o Brasil, porém ela tem uma significativa contribuição nas poluições dos corpos hídricos, já que apresenta um consumo elevado de água para a produção, para exemplificar um laticínio de pequeno porte consome, em uma razão de 1 litro por 1 litro ($L.L^{-1}$), entre 3,2 até 3,5 de água para a produção de leite, segundo (MENDONÇA; SANTOS; SARAIVA; PEREIRA, 2009)

Logo, todo o efluente gerado precisava de um tratamento adequado para ser descartado as redes públicas, e o efluente gerado em indústria de laticínio não é diferente, e como possui cargas orgânicas altas, nutrientes elevados e substâncias químicas utilizados para a limpeza, esse efluente precisa de um tratamento físico-químico ou biológico para ser descartado.

A eletrocoagulação consegue cumprir essa função de tratamento físico-químico, já que ela utiliza corrente elétrica para gerar o agente coagulante, e então proporcionar a remoção do material particulado presente no efluente, assim podendo separar os contaminantes do efluente tratado. E a FAD consegue desempenhar o mesmo papel físico-químico, mas utilizando microbolhas para arraste do material particulado, ou seja, a FAD consegue atuar com maior eficiência em efluente com grande quantidade de sólidos suspensos.

A principal contribuição deste trabalho foi associar a flotação por ar dissolvido como tratamento complementar de um efluente de laticínio previamente tratado por eletrocoagulação. Deste modo, objetivou-se analisar o efeito da flotação nesse processo, e a otimização desses tratamentos.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a contribuição da etapa de Flotação por Ar Dissolvido (FAD), como pós tratamento em efluentes provenientes de laticínios inicialmente tratados por eletrocoagulação.

2.2 Objetivos Específicos

- Analisar a eficiência do tratamento de eletrocoagulação como etapa única de tratamento físico-químico de efluentes de laticínio;
- Avaliar a eficiência do tratamento de FAD como etapa posterior para tratamento de efluentes, previamente tratados por eletroquímicos;
- Avaliar os efeitos do tempo de Detenção Hidráulica e a pressão de saturação na FAD aplicada como pós tratamento da eletrocoagulação em efluente de laticínios, para propor a otimização do sistema.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Caracterização do efluente

O efluente está sujeito a sofrer alterações dependendo do uso e gerenciamento empregado ao processo, portanto uma caracterização inicial do efluente é necessária para garantir uma maior precisão dos parâmetros do efluente bruto (VON SPERLING, 2005).

Para exemplificar tal importância foram selecionados dois trabalhos em situação semelhantes, ambas caracterizações ocorreram antes do tratamento primário utilizando efluente laticínio, HENARES (2015, p.38) encontrou um valor de 4.575 mg/L para Demanda Química de Oxigênio (DQO) total, enquanto ANDRADE(2011, p.78) para o mesmo tipo de efluente determinou 11.515,8 mg/L para DQO total, portanto podemos assegurar que todo efluente sofre por caracterização antes de ser testado a fim de determinar suas nuances.

O efluente escolhido para a realização do presente trabalho é o efluente proveniente de indústria de laticínio, ainda segundo os trabalhos de HENARES (2015, p.38) e ANDRADE(2011, p.78) esses efluentes possuem grande carga orgânica, geralmente composta por proteínas, gorduras e lactose. Logo requer processos biológicos e/ou tratamentos físico-químicos para um tratamento eficiente e diminuição da carga poluidora.

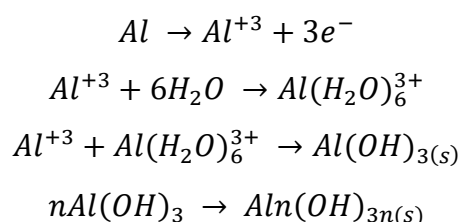
A produção de leite em 2022 foi de 34.6 bilhões de litros de leite, se comparado a 2021 houve uma redução de 1,6%, mas seus maiores produtores continua sendo os mesmos estados, o maior produtor é Minas Gerais com mais de 5 bilhões litros de leite, seguido Paraná, Santa Catarina, Goiás e Rio Grande do Sul produzindo entre 1,6 bilhões e 5 bilhões de litros de leite (EMBRAPA, 2024).

3.2 Eletrocoagulação

Sendo um método derivado da coagulação química que se baseia na adição de compostos coagulantes na solução a ser tratada, a eletrocoagulação tem características de tratamento parecido, mas a principal diferença é a utilização da

corrente elétrica, ocasionando a oxidação do eletrodo de sacrifício (GARCIA-SEGURA, 2017).

A eletrocoagulação com o alumínio é a técnica que utiliza uma corrente elétrica diretamente à água através de eletrodos, fazendo com que a barreira de energia seja superada e consequentemente quebrando as moléculas de águas liberando Al^{3+} e hidrogênio desenvolvido no ânodo e cátodo, respectivamente. O hidróxido metálico formado atua como coagulante, e aglutina com as partículas poluentes, e podem ser precipitadas ou elevadas à superfície dependendo da quantidade de bolhas no processo. (NASCIMENTO; GOBBI; PORTO; ROCHA) 2014.



Por ser um tratamento que utiliza corrente elétrica, apresenta menor quantidade de resquícios químicos em comparação a outros métodos, por não necessitar de produtos químicos, logo é uma técnica menos evasiva ao meio ambiente, o que a torna mais sustentável. Outras vantagens são praticidade e flexibilização de montagem, automação e operação dos equipamentos o que tornam o tratamento mais interessante, além de não causarem odores, segundo BAZRAFSHAN et al., 2015 e ELAZZOUZI et al., 2017.

E como maior desvantagem temos os desgastes dos eletrodos por oxidação, o que leva a serem substituídos constantemente, e a principal seria a dependência da eletricidade o que pode variar com épocas dos anos e estados, o que pode elevar o custo de operação (UDUMAN et al., 2011). Outro problema é condutividade, como ocorre a eletrólise em meio aquosa o PH pode influência necessitando de custo para adicionar tal um componente para ajustar tal parâmetro (TONES, 2015).

3.3 Flotação por ar dissolvido

O sistema de FAD consiste em enviar microbolhas pequenas, menores que 0,1 mm de diâmetro, dentro de um ambiente despressurizado contendo o efluente, ocorrerá a colisão dessas microbolhas com os coagulados presentes no efluentes, após essa colisão os coagulados serão aderidos as microbolhas, que por sua vez irão carregar para a superfície do sistema, onde é possível separar esse material coagulado, tratando o efluente. Ainda na FAD pode ocorrer mais três mecanismos secundários, que são a nucleação, aprisionamento e arraste pela nuvem de microbolhas. A nucleação é a parte do ar dissolvida que não formam as bolhas, e acabam sendo carregadas pelas demais bolhas pois acabam se condensando na solução. O aprisionamento é quando as microbolhas se misturam com os flocos de coagulados, isso resulta em uma maior densidade significativa do agregado na bolha particulada, mas já que é possível acrescentar uma maior pressão de bolhas, fazendo com que se tornem uma nuvem de bolhas, e apresentando baixa seletividade aos elementos, faz com que os agregados que não se aderirem nas bolhas sejam arrastados juntamente com os demais, essas ideias foram apresentadas por DANTAS; PINHEIRO; LEITE (2010).

Como OLIVEIRA; OLIVEIRA (2018) verifica o tratamento de FAD consegue fazer a remoção dos poluentes como etapa única de tratamento, causando uma diminuição significativa da cor aparente e turbidez, porém ao adicionar um agente coagulante o método de FAD se tornou ainda mais eficiente, logo o FAD como etapa posterior de tratamento de efluente se mostra como o melhor em um conjunto de etapas para tratamento, do que sendo um tratamento único etapa.

4 METODOLOGIA

4.1 Coleta da amostra

Para o presente trabalho foi escolhido um efluente lácteo como objeto de estudo, esse efluente foi proveniente de uma agroindústria, uma indústria de lácteos, situada no município de Matelândia - PR. O efluente bruto gerado na indústria é todo direcionado a caixa de gordura, e as amostras foram coletadas na saída da caixa de gordura, ou seja, antes do tratamento primário, o que garante um efluente com carga de materiais grosseiros reduzidos.

Foram coletados aproximadamente 120 litros de efluente em um mesmo dia por volta das 9:00, para assegurar as mesmas características para todos os processos, foram armazenadas em galões e ficaram em ambiente refrigerado até o início do tratamento.

Inicialmente é necessário fazer a caracterização desse efluente, e para isso foram utilizados os métodos apresentados no Quadro 1:

Quadro 1 – Métodos de análises

DQO	Standard Methods 5220B
Turbidez	Nelefométrico
Cor	Medida da absorbância com comprimento de onda 600nm.

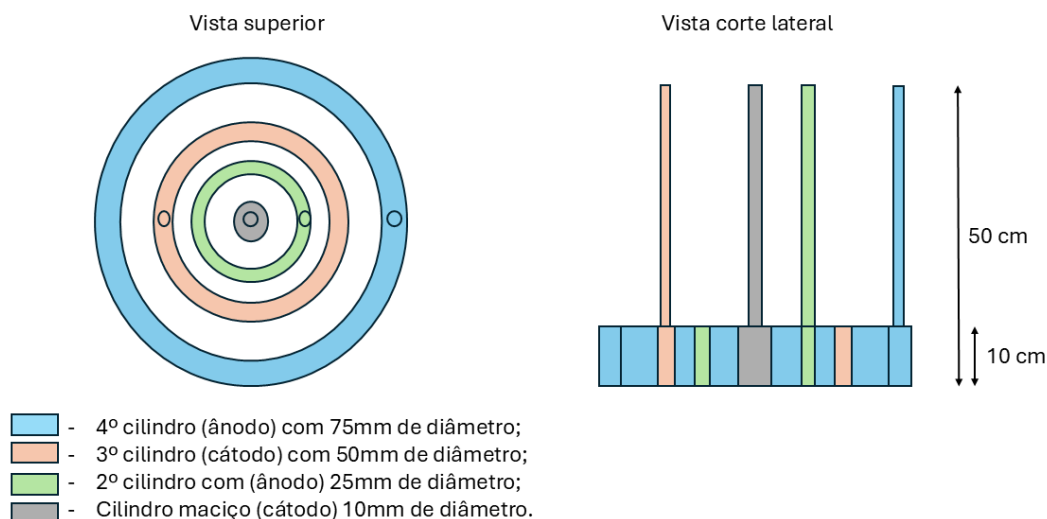
Fonte: Autoria própria (2025)

4.2 Processo de eletrocoagulação

O reator utilizado foi construído em um tubo de PVC de 100 mm de diâmetro, contido no PVC quatro cilindros, três deles sendo ocos, de alumínio, com os seguintes diâmetros 75 mm, 50 mm, 25 mm e um maciço de 10 mm de diâmetro (figura 1). Os cilindros são concêntricos e formam dois pares de eletrodos (ânodos e cátodos), e todos os cilindros de alumínio possuem 50 cm de altura. Possui hastes em cada

cilindro para conectar a fonte de corrente contínua, e torneiras para auxiliar na coleta de efluente tratado.

Figura 1 - Reator eletroquímico.



Fonte: Autoria própria (2025)

O funcionamento é através de bateladas onde o efluente é adicionado pela parte superior que é aberta, e com a capacidade máxima de 5 litros, porém foi alinhado a utilização de 4 litros de efluente bruto em cada batelada, a fim de coletar 10 %, ou seja, 400 mililitros de efluente tratado para as análises químicas.

Com a ajuda de uma fonte de energia é adicionado corrente no sistema ao reator e começa o processo de tratamento, após o tempo estipulado o efluente é coletado na torneira inferior, e o restante é descartado. Após o descarte é feita a lavagem do reator em preparação para a próxima batelada.

4.3 Planejamento experimental para a eletrocoagulação

Para avaliação do tratamento foi utilizado o Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR). O DCCR interrelaciona mais de uma variável aos fatores como por exemplo variáveis independentes, e nos proporcionando as variáveis respostas, e no caso da eletrocoagulação vai relacionar a remoção DQO, de turbidez e a cor aparente em porcentagem com os fatores densidade elétrica (X_1) e o tempo de

tratamento (X_2). A matriz de delineamento experimental para eletrocoagulação é apresentada no Quadro 2, a seguir.

Quadro 2 – Matriz do delineamento

Ensaio	Densidade de corrente (X_1)	Densidade de corrente (mA/cm^2)	TDH (X_2)	TDH (minutos)
1	-1	1,28	-1	7,9
2	1	3,4	-1	7,9
3	-1	1,28	1	22,1
4	1	3,4	1	22,1
5	0	2,3	0	15
6	0	2,3	0	15
7	0	2,3	0	15
8	0	2,3	0	15
9	1,41	3,8	0	15
10	-1,41	0,85	0	15
11	0	2,3	1,41	25
12	0	2,3	-1,41	5

Fonte: Autoria própria (2025)

Para a validação dos testes feitos foi utilizado análise de variância “ANOVA”, onde foi gerada após uma análise empírica feita pelo DCCR. O intervalo de confiança foi padronizado em 95% e p-valor < 0,05, logo caso seja obtido tais valores serão considerados efeitos significativos, e serão os pontos ótimos de tratamento.

4.4 Processo flotação por ar dissolvido

A câmara de saturação (Fotografia 1) foi construída em aço inox, com seção transversal circular de diâmetro interno de 125 mm, espessura de parede de 1 mm e altura de 1 m, resultando em um volume interno de aproximadamente 12,2 L. Estima-se pressão máxima de operação de 800 kPa. A câmara de saturação é a responsável pelo processo de FAD, mas requer o auxílio de uma bomba para chegar na pressão desejada.

O eluente utilizado foi obtido através do tratamento de eletrocoagulação utilizando o ponto central da matriz de delineamento, logo as condições de tratamento foram as seguintes, sendo $2,3 \text{ mA}/\text{cm}^2$ e o TDH 15 minutos, e houve uma

padronização do efluente tratado para garantir maior homogeneidade ao analisar as análises do FAD.

Fotografia 1 - Câmara de saturação.



Fonte: Autoria própria (2025)

Para essa etapa de FAD foi feita a mesma análise de DCCR executada no processo de eletrocoagulação, porém com as alterações dos fatores, sendo eles pressão (X_1) e tempo de tratamento (X_2), a remoção DQO, de turbidez e a cor aparente continuaram como parâmetros. No Quadro 3 é explicitada a matriz do delineamento para FAD.

Quadro 3 – Matriz do delineamento FAD

Ensaio	Pressão (X ₁)	Pressão (psi)	TDH (X ₂)	TDH (minutos)
1	-1	22,3	-1	8,9
2	1	57,7	-1	8,9
3	-1	22,3	1	13,1
4	1	57,7	1	13,1
5	0	40	0	11
6	0	40	0	11
7	0	40	0	11
8	0	40	0	11
9	-1,41	15	0	11
10	1,41	65	0	11
11	0	40	-1,41	8
12	0	40	1,41	14

Fonte: Autoria própria (2025)

Intervalo de confiança permanece o mesmo que anteriormente estipulado, 95% e p-valor < 0,05, e mesmo teste empírico “ANOVA” aplicado na etapa de eletrocoagulação. Toda essa avaliação estatística foi obtida utilizando a ferramenta computacional Statistica, software capaz de aplicar métodos estatísticos, processar grandes volumes de dados e gerar modelos gráficos para facilitar as análises de dados.

4.5 Análises químicas

As análises foram feitas em uma única repetição com 5 replicatas para cada parâmetro, sendo eles DQO, turbidez e cor, branco e bruto, totalizando 75 análises. Utilizou-se um bloco digestor para executar o método colorimétrico refluxo fechado, e em cada tubo de ensaio é disposto 2,5 ml de amostra mais 1,5 ml de solução digestão e 3,5 de ácido.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No Quadro 4 temos os iniciais e finais para o tratamento de eletrocoagulação, bem como seus o desvio padrão para cada ensaio:

Quadro 4 – Valores tratamento da eletrocoagulação

Ensaio	DQO inicial (mg/L)	DQO final (mg/L)	Desvio Padrão DQO	Turbidez inicial NTU	Turbidez final NTU	Desvio Padrão Turbidez	Cor inicial	Cor final	Desvio Padrão cor
1	15.549	4.064	389	1740	676	59	3498	2020	65
2	15.549	4.974	382	1740	598,6	265	3498	144,2	89
3	15.549	4.854	636	1740	782,4	29	3498	1568,2	46
4	15.549	4.689	345	1740	1001,2	28	3498	1836	46
5	15.549	3.799	277	1740	506,4	7	3498	1401,4	46
6	15.549	4.269	190	1740	568,4	14	3498	1245,4	33
7	15.549	3.809	1.244	1740	528,6	17	3498	993,2	59
8	15.549	5.449	2.086	1740	566,4	8	3498	1392,6	132
9	15.549	3.019	187	1740	484,6	11	3498	1064	16
10	15.549	5.579	812	1740	884,8	19	3498	1825,6	41
11	15.549	4.319	835	1740	540	22	3498	1085,2	55
12	15.549	4.039	433	1740	713	18	3498	1274,8	145

Fonte: Autoria própria (2025)

Para complementar o Quadro 4 o efluente bruto possui os seguintes desvio padrão DQO 415, cor 66 e turbidez 15, e é possível ver que o ensaio 9 obtiveram os melhores resultados, e seus desvio padrão são baixos o que indica uma confiabilidade ao analisar os resultados. O ensaio 9 possui a maior densidade de corrente, o que pode justificar os melhores resultados, porém ainda precisamos analisar as ANOVA's justificar os resultados.

Ainda analisando os resultados do Quadro 4, vemos que para cor e turbidez foi encontrado valores próximos e baixos, o que é um bom sinal, porém temos ensaios com o desvio padrão alto em comparação a média. Já para a DQO houve valores mais altos, mesmo considerando o valor inicial, 15.549 mg/L, destacando o ensaio 8 onde foi obtido 2.086 mg/L.

As remoções parciais da eletrocoagulação estão apresentadas no Quadro 5 com os valores para remoção parcial de DQO, turbidez e cor apresentado logo abaixo:

Quadro 5 – Remoções parciais dos parâmetros

Ensaio	Remoção DQO (%)	Remoção turbidez (%)	Remoção Cor (%)
1	73,86	53,74	41,71
2	68,01	57,87	59,03
3	68,78	55,63	55,09
4	69,84	43,39	47,88
5	75,56	70,92	58,35
6	72,54	67,07	64,29
7	75,50	69,83	72,27
8	64,95	67,30	60,95
9	80,58	72,13	69,55
10	64,12	48,97	47,91
11	72,22	69,08	67,92
12	74,02	59,02	63,21

Fonte: Autoria própria (2024)

Considerando os resultados obtidos no Quadro 5, e levando as análises das ANOVA's dos fatores, não foi possível gerar um modelo matemático a partir do DCCR, porém é possível concluir que houve uma média de remoção parcial de mais de 61% para turbidez, quase 60% em cor e 72% para DQO. Analisando ensaios individualmente houve caso que o DQO sofreu uma redução de mais de 80%, um resultado satisfatório e como possui a maior média é possível definir que o método foi mais eficiente nesse parâmetro. Observando cor e turbidez individualmente, há remoções promissoras chegando à remoção de mais de 72% para cor e turbidez. E as médias das remoções parciais encontradas foram de 72% para DQO, 61% para turbidez e 60% para cor.

Ao analisar quais os melhores resultado para cada parâmetro, foi notado que o ensaio 9, onde a densidade de corrente foi 3,8 mA/cm² e o TDH 15 minutos, obtiveram todos os melhores resultados, porém isso foi apenas uma coincidência estatística, já que pelos quadros das ANOVA's não houve significância estatística, apresentando as ANOVA's (Quadros 6, 7 e 8) para os três fatores temos:

Quadro 6 – ANOVA remoção Cor

Fatores	Soma do Quadrados (SS)	Graus de Liberdade (df)	Média dos Quadrados (MS)	F	p-valor
X1(L)	207,0040	1	207,0040	2,994336	0,134278
X1(Q)	189,7193	1	189,7193	2,744312	0,148679
X2(L)	9,8880	1	9,8880	0,143031	0,718306
X2(Q)	26,1717	1	26,1717	0,378577	0,560962
X1.X2	150,4094	1	150,4094	2,175690	0,190654
Erro	414,7910	6	69,1318	-	-
Total SS	977,8083	11	-	-	-

Fonte: Autoria própria (2025)

Quadro 7 – ANOVA remoção Turbidez

Fatores	Soma do Quadrados (SS)	Graus de Liberdade (df)	Média dos Quadrados (MS)	F	p-valor
X1(L)	75,5838	1	75,5838	0,919889	0,374541
X1(Q)	273,9760	1	273,9760	3,334410	0,117632
X2(L)	0,3189	1	0,3189	0,003881	0,952350
X2(Q)	146,6467	1	146,6497	1,784759	0,230004
X1.X2	67,0705	1	67,0705	0,816277	0,401088
Erro	492,9977	6	82,1663	-	-
Total SS	991,3815	11	-	-	-

Fonte: Autoria própria (2025)

Quadro 8 – ANOVA remoção DQO

Fatores	Soma do Quadrados (SS)	Graus de Liberdade (df)	Média dos Quadrados (MS)	F	p-valor
X1(L)	42,5527	1	42,55269	1,363713	0,287196
X1(Q)	1,9673	1	1,96727	0,063046	0,810122
X2(L)	4,1985	1	4,19847	0,134551	0,726348
X2(Q)	0,1803	1	0,18032	0,005779	0,941876
X1.X2	11,9496	1	11,94956	0,382955	0,558773
Erro	187,2213	6	31,20355	-	-
Total SS	247,9121	11	-	-	-

Fonte: Autoria própria (2024)

Então analisando as ANOVA's é notado que nas remoções de DQO, turbidez e cor não apresentam nenhum fator com alguma significância estatística igual ou

maior que 95%, na coluna p-valor todos os valores são maiores que 0,05, ou seja, nenhum fator é significativo.

Portanto a seguir é analisado o FAD como tratamento posterior, valores iniciais e resultados no Quadro 9, e no Quadro 10 suas remoções parciais:

Quadro 9 – Valores iniciais e finais do tratamento do FAD

Ensaio	DQO inicial (mg/L)	DQO final (mg/L)	Turbidez inicial NTU	Turbidez final NTU	Cor inicial	Cor final
1	2929,5	2049,5	112,4	70,38	237,8	165,0
2	2929,5	2088,0	112,4	68,61	237,8	169,2
3	2929,5	2203,0	112,4	86,36	237,8	145,2
4	2929,5	2253,5	112,4	106,2	237,8	170,2
5	2929,5	2094,5	112,4	57,52	237,8	126,6
6	2929,5	2212,5	112,4	63,92	237,8	104,4
7	2929,5	1838,0	112,4	75,02	237,8	124,6
8	2929,5	2154,5	112,4	39,20	237,8	118,8
9	2929,5	1866,5	112,4	88,80	237,8	155,2
10	2929,5	2204,0	112,4	42,00	237,8	100,2
11	2929,5	2064,5	112,4	52,74	237,8	159,0
12	2929,5	1945,8	112,4	49,20	237,8	137,8

Fonte: Autoria própria (2024)

Valores iniciais foram obtidos após a padronização do efluente obtido após a padronização do efluente, pois o reator de eletrocoagulação possui o funcionamento por bateladas, essa padronização garante uma amostra mais homogeneia, já que apesar de todos serem tratados na mesma faixa pode haver pequenas variações no efluente tratado. O ensaio utilizado para a padronização foi o mesmo que o ponto central, sendo 2,3 mA/cm² e o TDH 15 minutos, pois não houve modelos matemáticos para a otimização, portanto foi escolhido um ponto que não houvesse nenhum parâmetro extremo.

Quadro 10 – Remoções parciais dos parâmetros FAD

Ensaio	Remoção DOQ (%)	Remoção turbidez (%)	Remoção Cor (%)
1	30,04	37,38	30,61
2	28,73	39,36	28,85
3	24,80	23,17	38,94
4	23,08	5,52	28,43
5	28,50	48,83	46,76
6	24,48	43,13	56,10
7	37,26	33,26	47,60
8	26,46	65,12	49,96
9	36,29	21,00	37,74
10	24,77	62,63	57,86
11	29,53	53,08	33,14
12	33,58	56,23	42,05

Fonte: Autoria própria (2024)

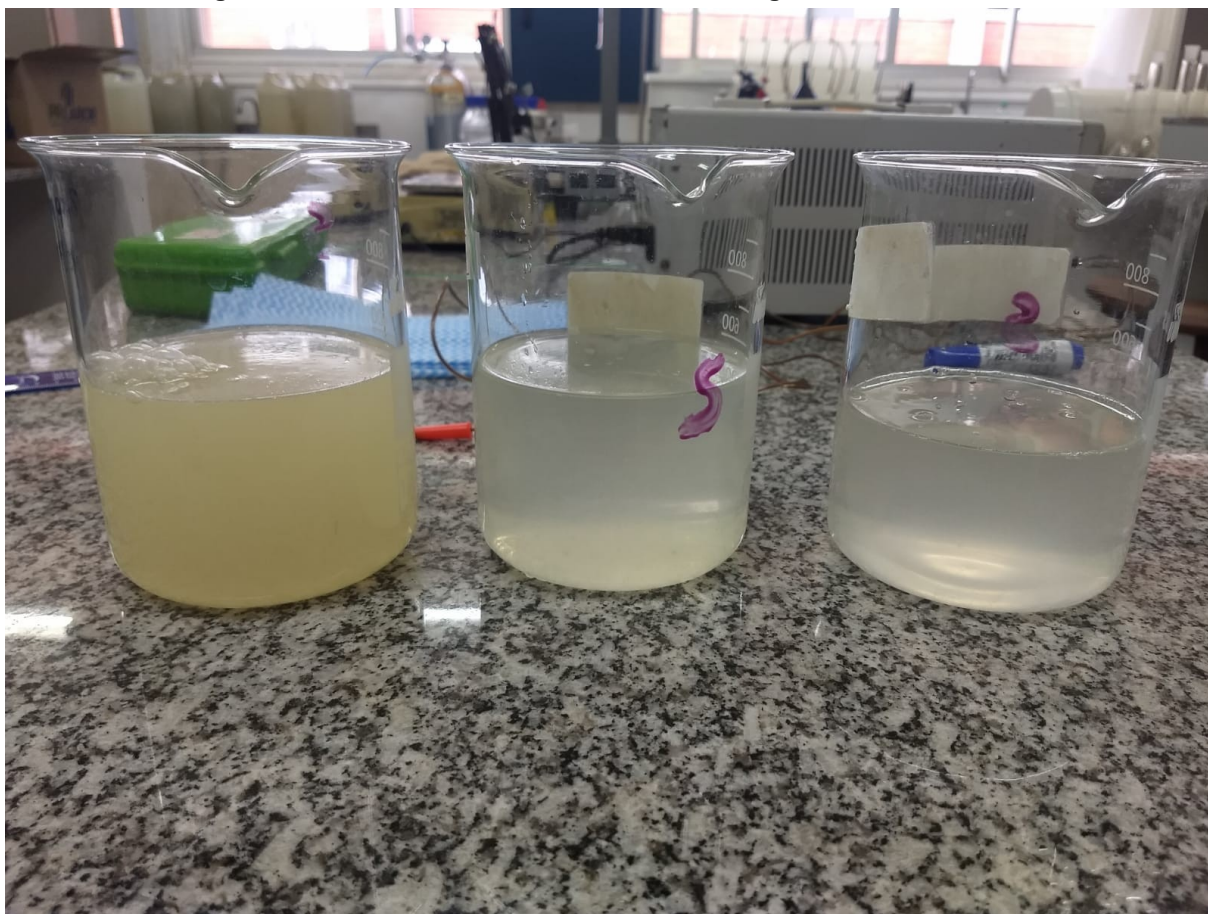
Portanto observamos que resultados do FAD como tratamento posterior a eletrocoagulação melhoram o efluente apenas com o tratamento de eletrocoagulação, resultando em uma melhoria superior a 40 % nos casos de turbidez e cor e perto dos 30 % para DQO, porém com os resultados não foi possível realizar a modelagem matemática do DCCR, segundo resultados obtidos nas ANOVA's.

Mas analisando individualmente cada parâmetro, é possível concluir que houve resultados promissores apesar das médias de remoções não atingirem o esperado, por exemplo houve caso com mais de 65 % na remoção de turbidez.

Ao analisar os melhores resultados temos, para DQO o ensaio 7, um dos pontos centrais, obteve a melhor remoção parcial, e outro ponto central, desta vez o 8, obteve o melhor resultado para a turbidez, ou seja, ambos os ensaios possuem aplicações de parâmetros iguais, sendo 40 psi e 11 minutos. E a melhor remoção parcial para cor ocorreu no ensaio 10 onde foi aplicado pressão a 65 psi e 11 minutos de ensaio. Foi obtido médias de remoção de 28,86% para DQO, 40,73% para turbidez e 41,25% para cor.

A seguir na fotografia 2 temos três becker's sendo da esquerda para a direita temos, o efluente bruto, o efluente apenas com o tratamento de eletrocoagulação e o efluente após o tratamento FAD:

Fotografia 2 - Efluente bruto - Efluente eletrocoagulação - Efluente FAD.



Fonte: Autoria própria (2024)

6 CONCLUSÃO

É possível concluir que, não foi possível gerar modelos matemáticos válidos para a otimização dos processos de tratamento a partir dos resultados obtidos, mas foi notado no presente trabalho que FAD após a eletrocoagulação é uma combinação que se completa, conforme resultados obtidos. Os resultados mostram que os tratamentos foram eficientes chegando à remoção de DQO em 80,58% sendo a maior, e para remoção de cor e turbidez pouco mais de 72% para os efluentes tratados por eletrocoagulação, o que indica que para é eficiente como tratamento único. Para o efluente tratado posteriormente por FAD houve reduções em todos os parâmetros, onde o DQO apesar de apresentar porcentagens de remoções menores tem o valor inicial alto (2929,5 ml/L), e o melhor cenário caiu para 1838 quase 40% de remoção, e por isso foi um tratamento satisfatório, e apesar dos outros parâmetros terem valores iniciais mais baixos, 112,4 NTU para turbidez e 237,8 para cor, também houve remoções parciais satisfatórias. Logo, os resultados apontam que a combinação dos tratamentos foi eficaz.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, L. H. **Tratamento de efluente de indústria de laticínios por duas configurações de biorreator com membranas e nanofiltração visando o reuso**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. Belo Horizonte, 2011.
- ANUARIO LEITE 2024; AVALIAÇÃO GENÉTICA MULTIRRACIONAL, 137p. Juiz de Fora; Embrapa Gado de Leite, 2024.
<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/1164754>. Acesso em: 7 fev. 2025
- BAZRAFESHAN, E.; ALIPOUR, M. R.; MAHVI, A. H. 2016. Textile wastewater treatment by application of combined chemical coagulation, electrocoagulation, and adsorption processes. **Desalin**. Water. Treat n.57, 203-215 p.
- CARVALHO, G. R.; RESENDE, J. C.; ROCHA, D. T. **Cadeia produtiva do leite no Brasil: produção primária**. 2020. Embrapa Gado de Leite. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/215880/1/CT-123.pdf>. Acessado em 11 de outubro de 2024.
- ELAZZOUI, M.; HABOUBI, K.; ELYOUBI, M. S. “Electrocoagulation flocculation as a low-cost process for pollutants removal from urban wastewater”. **Chemical engineering research and design**, vol. 117, pg. 614-626, 2017.
- 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. v. 801, p. 267-299, 2017.
- HENARES, J. F. **Caracterização do Efluente de Laticínio: análise e proposta de tratamento**. 2015. 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Alimentos) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Campo Mourão, 2015.
- MENDONÇA, R. C. S.; SANTOS, A. L.; SARAIVA, C. B.; PEREIRA, D. A. **Consumo de água e geração de efluentes em uma indústria de laticínios**. Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG)/Instituto de Laticínios Cândido Tostes (ILCT), Juiz de Fora, 2009.
- NASCIMENTO, I. L.; GOBBI, L. C.A.; PORTO, P. S. S.; ROCHA, S. M. S. **Eletrofloculação em efluentes oleosos utilizando eletrodos de alumínio**. Universidade Federal do Espírito Santo, 2014.
- TONES, A. R. M. **Estudo da aplicação da técnica de eletrofloculação na remoção da cor em misturas de corantes têxteis**. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais). Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Medianeira, 2015.
- VON SPERLING, M. **Introdução a qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3. Ed. DESA, UFMG: Belo Horizonte, 2005.

UDUMAN, N.; BOURNIQUEL, V.; DANQUAH, M. K.; HOADLEY, A. F. (2011). A parametric study of electrocoagulation as a recovery process of marine microalgae for biodiesel production. Chemical engineering journal, n.174, 249–257 p.