

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

LAURA BRITO VIANA

**TRATAMENTO DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO POR
ELETROCOAGULAÇÃO: EFEITOS DA VARIAÇÃO TEMPORAL
NOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS**

CAMPO MOURÃO

2025

LAURA BRITO VIANA

**TRATAMENTO DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO POR
ELETROCOAGULAÇÃO: EFEITOS DA VARIAÇÃO TEMPORAL
NOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS**

**Treatment of landfill leachate by electrocoagulation: Effects of temporal
variation on physicochemical parameters.**

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): Eudes José Arantes.

CAMPO MOURÃO

2025



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

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins 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 são cobertos pela licença.

LAURA BRITO VIANA

**TRATAMENTO DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO POR
ELETROCOAGULAÇÃO: EFEITOS DA VARIAÇÃO TEMPORAL
NOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS**

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: 02/Dezembro/2025

Eudes José Arantes
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Thiago Morais de Castro
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Oswaldo Valarini Junior
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CAMPO MOURÃO

2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, pelo amor e, principalmente, pelo suporte incondicional em todos os momentos dessa caminhada. Cada demonstração de apoio e incentivo foi essencial para que eu pudesse superar os desafios e concluir mais essa etapa.

Ao meu namorado, agradeço pelo carinho, pela compreensão e por estar sempre ao meu lado, oferecendo apoio, motivação e confiança em cada fase deste percurso.

Estendo meus sinceros agradecimentos ao meu orientador Prof^o Dr. Eudes José Arantes, pela orientação, disponibilidade e pelos valiosos ensinamentos compartilhados ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Sua dedicação foi fundamental para o aprimoramento desta pesquisa. Bem como deixo meus agradecimentos ao Prof. Dr. Thiago Morais de Castro que contribuiu de forma significativa para a realização deste trabalho.

Agradeço também à Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), pela oportunidade de formação acadêmica e pessoal, e por proporcionar um ambiente de aprendizado e crescimento que contribuiu significativamente para a minha trajetória.

Por fim, a todos que, de alguma forma, contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, deixo aqui minha gratidão.

RESUMO

O aumento na geração de resíduos sólidos urbanos, associado ao maior volume de disposição em aterros, pode intensificar a produção de lixiviado — um efluente de elevada carga poluente e baixa biodegradabilidade — cuja quantidade ainda depende de fatores como regime de chuvas, compactação dos resíduos e eficiência das camadas de cobertura. Sua disposição inadequada representa sérios riscos ambientais e à saúde pública. Nesse contexto, o presente trabalho investigou a eficiência do processo de eletrocoagulação com eletrodos de alumínio no tratamento do lixiviado de um Aterro Sanitário Municipal do Estado do Paraná, avaliando parâmetros físico-químicos em diferentes tempos de tratamento. A metodologia envolveu a coleta e caracterização do lixiviado quanto a pH, turbidez, cor, condutividade, DQO e fósforo, antes e após a aplicação do processo em reator de bancada operando em batelada. O Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) adotou variações de concentração do lixiviado e tempo, com avaliação da eficiência de remoção de cada parâmetro. Os resultados demonstraram que a eletrocoagulação promoveu reduções que atingiram até 99,79% na turbidez e 98,25% na cor, e alcançando ainda até 87,75% de remoção de DQO, com melhores desempenhos em tempos intermediários e concentrações elevadas. A condutividade apresentou tendência de redução, enquanto o pH aumentou levemente após o tratamento, se mantendo ainda em faixa neutra, refletindo os efeitos eletroquímicos do processo. Conclui-se que a eletrocoagulação se mostrou uma alternativa viável e eficiente para o tratamento de lixiviado de aterro sanitário, especialmente na remoção de matéria orgânica e partículas em suspensão, podendo ser integrada a outros processos para garantir conformidade com os padrões legais de lançamento de efluentes.

Palavras-chave: lixiviado de aterro; eletrocoagulação; tratamento de efluentes; parâmetros físico-químicos.

ABSTRACT

The increase in municipal solid waste generation, associated with the greater volume of waste disposed of in landfills, can intensify leachate production—an effluent with high pollutant load and low biodegradability—whose quantity also depends on factors such as rainfall patterns, waste compaction, and the effectiveness of cover layers. Its improper disposal poses serious environmental and public health risks. In this context, the present study investigated the efficiency of the electrocoagulation process using aluminum electrodes in the treatment of leachate from a Municipal Sanitary Landfill in the state of Paraná, assessing physicochemical parameters at different treatment times. The methodology involved collecting and characterizing the leachate in terms of pH, turbidity, color, conductivity, COD, phosphorus, and nitrite before and after the application of the process in a batch-operated bench-scale reactor. The Central Composite Rotational Design (CCRD) incorporated variations in leachate concentration and treatment time, with evaluation of the removal efficiency for each parameter. The results demonstrated that electrocoagulation promoted reductions of up to 99.79% in turbidity and 98.25% in color, and achieved up to 87.75% COD removal, with better performance at intermediate treatment times and higher concentrations. Conductivity exhibited a decreasing trend, while pH increased slightly after treatment, remaining within a neutral range and reflecting the electrochemical effects of the process. It is concluded that electrocoagulation proved to be a viable and efficient alternative for sanitary landfill leachate treatment, particularly for the removal of organic matter and suspended particles, and may be integrated with other processes to ensure compliance with legal effluent discharge standards.

Keywords: landfill leachate; electrocoagulation; wastewater treatment; physicochemical parameters.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ponto de coleta do lixiviado: Lagoa de Contenção.....	18
Figura 2 – Coleta do lixiviado com balde plástico (A) e armazenamento das amostras coletadas em galão de polietileno de alta densidade (B).....	19
Figura 3 – Visualização frontal (A) e lateral (B) do reator de eletrocoagulação	20
Figura 4 – Montagem completa do sistema de eletrocoagulação: agitador mecânico, reator e fonte de corrente contínua	21
Figura 5 – Efluente antes do ensaio de eletrocoagulação (A) e efluente após o tratamento com formação de lodo (B).....	26
Figura 6 – Superfícies de resposta para turbidez	26
Figura 7 – Superfícies de resposta para cor.....	27
Figura 8 – Superfícies de resposta para remoção da DQO	27
Figura 9 – Perfis de valores preditos e desejabilidade global para turbidez, cor e DQO	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros analisados e equipamentos utilizados	19
Tabela 2 – Planejamento dos ensaios de eletrocoagulação.....	22
Tabela 3 – Resultados da Eficiência de Remoção dos parâmetros de Turbidez, DQO e Cor aparente.....	24
Tabela 4 – Síntese dos valores experimentais e preditos de remoção (%) e desejabilidade global.....	30

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 OBJETIVO	11
2.1 Objetivo geral	11
2.2 Objetivos específicos	11
3 JUSTIFICATIVA	12
4 REVISÃO DA LITERATURA	13
4.1 Geração e caracterização do lixiviado	13
4.2 Características físico-químicas	13
4.3 Importância do tratamento do lixiviado e seus impactos ambientais	14
4.4 Fundamentos da eletrocoagulação	14
4.5 Parâmetros operacionais e desempenho	16
4.6 Vantagens e processos integrados	16
5 MATERIAL E MÉTODOS	18
5.1 Área de estudo e amostragem	18
5.2 Caracterização do lixiviado	19
5.3 Montagem do sistema de eletrocoagulação	20
5.4 Planejamento experimental	21
5.5 Avaliação da eficiência de remoção	23
6 RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
6.1 Caracterização do lixiviado bruto	24
6.2 Eficiência do processo de eletrocoagulação	24
6.3 Análise estatística dos fatores	26
6.4 Demanda Química de Oxigênio (DQO)	28
6.5 Cor aparente	29
6.6 Turbidez	29
6.7 Parâmetros complementares	30
6.8 Considerações integradas	30
6.9 Comparativo com estudos da literatura	31
7 CONCLUSÃO	33
REFERÊNCIAS	35

1 INTRODUÇÃO

A intensificação do consumo de recursos naturais e o aumento da geração de resíduos sólidos têm impulsionado o crescimento dos impactos ambientais negativos, exigindo soluções eficazes para mitigar tais efeitos. Nesse contexto, os aterros sanitários desempenham papel fundamental na disposição final ambientalmente adequada de resíduos urbanos. No entanto, esses sistemas geram um subproduto altamente poluente: o lixiviado, ou chorume, um líquido escuro e de odor forte, resultante da decomposição da matéria orgânica e da percolação da água pelas camadas de resíduos (Silva *et al.*, 2010; Ferreira, 2013).

O lixiviado apresenta uma composição complexa, com alta carga de matéria orgânica, metais pesados, amônia, compostos nitrogenados e outras substâncias tóxicas, o que representa um sério risco ao meio ambiente e à saúde pública (Ferreira, 2013). Devido a essa complexidade, o tratamento do lixiviado é um desafio para os gestores de resíduos e requer soluções tecnológicas eficientes e economicamente viáveis.

Dentre as alternativas de tratamento, a eletrocoagulação tem se destacado por sua eficácia na remoção de diversos poluentes, incluindo a matéria orgânica e metais pesados, por meio de processos eletroquímicos que promovem a desestabilização e agregação das partículas contaminantes (Martins; Rocha; Silva, 2024). Trata-se de uma tecnologia promissora, de fácil operação, baixo custo e com potencial para complementar ou substituir métodos convencionais (Martins; Rocha; Silva, 2024).

Este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência do processo de eletrocoagulação na remoção de carga orgânica do lixiviado proveniente de um Aterro Municipal no Estado do Paraná.

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

Avaliar a eficiência da eletrocoagulação com eletrodos de alumínio no tratamento do lixiviado proveniente de um aterro sanitário no Estado do Paraná, focando na avaliação de parâmetros físico-químicos, em diferentes intervalos de tempo de tratamento.

2.2 Objetivos específicos

- Realizar a caracterização inicial do lixiviado bruto, determinando pH, turbidez, cor, condutividade, demanda química de oxigênio (DQO) e fósforo, de modo a estabelecer o perfil físico-químico do efluente de entrada.
- Preparar e operar o reator de eletrocoagulação em batelada, utilizando eletrodos de alumínio, padronizando densidade de corrente, volume tratado e condições experimentais para assegurar reprodutibilidade.
- Aplicar o processo de eletrocoagulação em diferentes intervalos de tempo definidos no planejamento experimental, garantindo o controle das variáveis envolvidas (agitação, distância entre eletrodos, tensão/densidade de corrente).
- Coletar e analisar as amostras tratadas ao final de cada tempo de exposição, quantificando novamente os mesmos parâmetros físico-químicos para avaliar a magnitude das alterações promovidas pelo processo.
- Calcular a eficiência de remoção de cada parâmetro, comparando resultados entre os diferentes tempos e concentrações avaliados, identificando tendências, comportamentos e condições ótimas.
- Interpretar os efeitos eletroquímicos observados, como variações de pH e condutividade, relacionando-os aos mecanismos de coagulação, flotação e formação de hidróxidos de alumínio no sistema.
- Integrar os resultados obtidos ao Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR), analisando a influência das variáveis independentes (tempo e concentração) sobre as respostas, e determinando a combinação mais eficiente.

3 JUSTIFICATIVA

O tratamento adequado do lixiviado proveniente de aterros sanitários representa um dos principais desafios na gestão de resíduos sólidos, especialmente em municípios de pequeno e médio porte, que frequentemente enfrentam limitações técnicas e financeiras. Esse tipo de efluente caracteriza-se por sua elevada carga orgânica, baixa biodegradabilidade e composição complexa, exigindo tecnologias eficazes para seu tratamento (Silva, 2010; Oliveira, 2009).

Nesse contexto, a eletrocoagulação destaca-se como uma alternativa promissora por combinar simplicidade operacional, baixo custo e elevada eficiência na remoção de poluentes (Candia-Onfray *et al.*, 2018). Trata-se de um processo eletroquímico que dispensa o uso de reagentes químicos externos, reduz a geração de lodo e apresenta bom desempenho no tratamento de efluentes recalcitrantes, como o lixiviado de aterros (Mollah *et al.*, 2001).

O uso de eletrodos metálicos, como os de ferro ou alumínio, amplia a viabilidade técnica e econômica do processo, considerando seu baixo custo — especialmente quando comparado a tecnologias de maior complexidade e custo operacional, como processos oxidativos avançados e sistemas de membranas (nanofiltração e osmose reversa) —, além de sua alta disponibilidade e comprovada eficiência na coagulação de compostos orgânicos e inorgânicos. Ademais, a análise da influência de diferentes tempos de tratamento permite otimizar a aplicação da eletrocoagulação, contribuindo para o aprimoramento de estratégias sustentáveis de manejo de lixiviados (Kobyta *et al.*, 2006).

Diante disso, este estudo justifica-se pela necessidade de investigar soluções ambientalmente adequadas e tecnicamente viáveis para o tratamento de lixiviado em Campo Mourão/PR, promovendo a conformidade com a legislação ambiental vigente e colaborando para o avanço do conhecimento técnico-científico sobre tecnologias emergentes de tratamento de efluentes de alta complexidade.

4 REVISÃO DA LITERATURA

4.1 Geração e caracterização do lixiviado

A composição do lixiviado varia consideravelmente conforme fatores como a idade do aterro, o tipo de resíduo recebido, as condições climáticas e operacionais do local (Carmo, 2018; Galvão, Souza, Vidal, 2020). De acordo com Giordano, Barbosa Filho e Carvalho (2011), esse efluente contém compostos orgânicos dissolvidos, metais pesados, amônia, nutrientes e substâncias recalcitrantes, o que dificulta sua biodegradabilidade, especialmente em lixiviados mais antigos, conhecidos como “maduros”.

Essa complexidade composicional exige tecnologias de tratamento que sejam capazes de lidar com uma ampla variedade de contaminantes, destacando-se a necessidade de processos mais robustos do que os tradicionalmente utilizados.

4.2 Características físico-químicas

A caracterização físico-química do lixiviado é etapa essencial para o delineamento de estratégias de tratamento eficazes. Os principais parâmetros avaliados incluem pH, turbidez, cor, condutividade elétrica, demanda química de oxigênio (DQO), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), sólidos totais e absorvância a 254 nm (Ferreira, 2013; Galvão, Souza, Vidal, 2020). Segundo estudo conduzido por Galvão, Souza e Vidal (2020), lixiviados analisados apresentaram, em média, DQO de 4212 mg/L, DBO de 923 mg/L e pH de 7,9, evidenciando significativa carga orgânica. A razão DBO/DQO observada foi de 0,22, valor que indica baixa biodegradabilidade e a predominância de compostos recalcitrantes.

A condutividade elétrica, relacionada à concentração de íons dissolvidos, influencia diretamente a eficiência de processos eletroquímicos como a eletrocoagulação (Ferreira, 2013). O pH, por sua vez, exerce papel crucial na solubilidade e na forma dos coagulantes gerados *in situ*, afetando de maneira direta a performance do tratamento (Souza, 2016).

Portanto, o conhecimento detalhado das características físico-químicas do lixiviado permite selecionar e otimizar os processos de tratamento, especialmente aqueles baseados em reações eletroquímicas.

4.3 Importância do tratamento do lixiviado e seus impactos ambientais

O descarte inadequado de lixiviado representa uma séria ameaça ao meio ambiente, podendo provocar a contaminação de solos e aquíferos subterrâneos, a eutrofização de corpos hídricos e riscos diretos à saúde pública (Ferreira, 2013; Ortiz, Botari, Botari, 2012; Fernandes *et al.*, 2015). Esses impactos justificam a exigência de tratamento eficiente antes da disposição final do efluente.

A Resolução CONAMA nº 430/2011 estabelece padrões de lançamento para efluentes, reforçando a obrigatoriedade do controle rigoroso da qualidade dos despejos líquidos. Contudo, a presença de substâncias orgânicas de difícil degradação compromete a eficácia de processos biológicos convencionais, como lagoas facultativas, reatores anaeróbios e sistemas de lodos ativados (Galvão, Souza, Vidal, 2020).

Diante da limitação dos métodos tradicionais, torna-se imprescindível o uso de tecnologias complementares ou alternativas, como os processos eletroquímicos, que apresentam maior capacidade de remoção de compostos recalcitrantes e adaptabilidade à variação na composição do lixiviado (Ferreira, 2013; Tang *et al.*, 2019).

4.4 Fundamentos da eletrocoagulação

A eletrocoagulação (EC) é um processo eletroquímico de tratamento de efluentes que se baseia na geração *in situ* de agentes coagulantes a partir da dissolução eletrolítica de eletrodos metálicos, geralmente de alumínio (Al) ou ferro (Fe). Quando uma corrente elétrica é aplicada ao sistema, ocorre a oxidação do ânodo, liberando íons metálicos para o meio líquido. Esses íons, em contato com a água, formam espécies hidroxiladas metálicas, que atuam como coagulantes, promovendo a desestabilização de partículas coloidais, emulsões e substâncias dissolvidas (Holt; Barton; Mitchell, 2005; Mollah *et al.*, 2001; Souza, 2016).

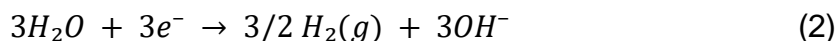
As reações eletroquímicas fundamentais variam conforme o material do eletrodo.

No caso do alumínio, o processo pode ser representado pelas equações 1 e 2:

Ânodo (oxidação):



Cátodo (redução):



Os íons Al^{3+} formados no ânodo reagem com os íons OH^{-} gerados no cátodo, originando hidróxidos metálicos, como $Al(OH)_3$, que apresentam alta capacidade de adsorção e aglomeração de poluentes (Mollah *et al.*, 2004; Daneshvar *et al.*, 2007). Esses hidróxidos podem agir por diferentes mecanismos, incluindo neutralização de carga, varredura (*sweep flocculation*) e adsorção superficial. A combinação desses mecanismos resulta na formação de flocos densos e facilmente separáveis por sedimentação ou flotação (Kobyta *et al.*, 2003).

A eficiência da eletrocoagulação é influenciada por diversos parâmetros operacionais, entre eles: o pH da solução, a densidade de corrente, a distância entre os eletrodos, o tempo de eletrólise e as características do efluente. O pH exerce papel fundamental, pois afeta diretamente a forma química dos coagulantes gerados. Em meio neutro a levemente alcalino, predominam espécies como $Al(OH)_3$ e $Al(OH)_4^{-}$, que apresentam maior estabilidade e capacidade de remoção de matéria orgânica (Carmo, 2018; Galvão; Souza; Vidal, 2020).

Além disso, a densidade de corrente determina a taxa de dissolução do metal e a produção de coagulantes. Correntes muito baixas podem gerar quantidade insuficiente de íons metálicos, enquanto correntes excessivas favorecem o consumo energético e a passivação dos eletrodos, reduzindo a eficiência global (Holt; Barton; Mitchell, 2005; Chen, 2004).

Resultados experimentais têm demonstrado a aplicabilidade da EC no tratamento de efluentes complexos, como o lixiviado de aterro sanitário. Carmo (2018) observou redução de 53,41% na DQO utilizando eletrodos de alumínio em arranjo bipolar, com pH inicial de 8,07 e tempo de eletrólise de 100 minutos. Ferreira (2013) relatou eficiência semelhante, de 53,9%, sob condições otimizadas para o mesmo material de eletrodo. Esses resultados confirmam o potencial da

técnica como alternativa promissora para a remoção de poluentes refratários e a melhoria da qualidade de efluentes.

4.5 Parâmetros operacionais e desempenho

A eficiência da eletrocoagulação é influenciada por diversos parâmetros operacionais, entre eles: o tipo e a disposição dos eletrodos, o tempo de eletrólise, a densidade de corrente aplicada, o pH inicial e a distância entre os eletrodos (Galvão, Souza, Vidal 2020; Ferreira, 2013).

Galvão, Souza e Vidal (2020) relataram que a aplicação de uma densidade de corrente de 161,08 A/m² por 90 minutos resultou em remoções de 46% para DQO, 82% para turbidez e 87% para DBO. Já Carmo (2018) obteve uma eficiência de 53,41% para DQO com tempo de eletrólise de 100 minutos e pH inicial de 8,07. Ortiz, Botari e Botari (2012) destacaram que tempos de retenção entre 15 e 60 minutos podem promover até 66% de remoção de DQO, dependendo das condições experimentais.

Além do tempo de eletrólise, o material e a configuração dos eletrodos desempenham papel fundamental no desempenho do tratamento. Estudos apontam que eletrodos de alumínio favorecem a remoção de compostos orgânicos, enquanto os de ferro são mais eficientes na precipitação de metais pesados (Souza, 2016). A escolha adequada desses parâmetros permite otimizar o processo, reduzindo custos operacionais e aumentando a eficiência do tratamento.

4.6 Vantagens e processos integrados

A eletrocoagulação apresenta diversas vantagens em comparação a métodos convencionais de tratamento de lixiviado. Entre seus principais benefícios, destacam-se a redução do uso de reagentes químicos, a menor geração de lodo, a simplicidade operacional e a capacidade de remover poluentes recalcitrantes (Garcia-segura *et al.*, 2017; Barrera-Díaz; Balderas-Hernández; Bilyeu, 2018).

Além disso, a eletrocoagulação pode ser integrada a outros processos para potencializar a remoção de contaminantes. Souza (2016) demonstrou que a combinação da eletrocoagulação com a coagulação química melhora significativamente a remoção de matéria orgânica e reduz a toxicidade do

efluente. Essa abordagem é particularmente relevante para lixiviados com elevada carga poluente e composição complexa, cuja degradação por métodos biológicos convencionais é limitada.

Estudos recentes no aterro sanitário de Campo Mourão evidenciaram a viabilidade da eletrocoagulação como tecnologia complementar ao tratamento convencional de lixiviados (Sousdaleff, 2024). Esses resultados reforçam o potencial da técnica para aplicação prática em escala municipal, oferecendo uma alternativa eficaz e sustentável para o gerenciamento de efluentes de alta complexidade.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Área de estudo e amostragem

Este estudo foi conduzido com amostras de lixiviado coletadas em um Aterro Sanitário Municipal no Estado do Paraná. A coleta foi realizada diretamente da lagoa de contenção (Figura 1), utilizando baldes plásticos previamente higienizados.

Figura 1 – Ponto de coleta do lixiviado: Lagoa de Contenção



Fonte: Acervo Próprio, 2025

As amostras foram armazenadas em galões de polietileno de alta densidade com capacidade de 20 litros, como representado na Figura 2, devidamente rotulados e transportados ao laboratório em caixa térmica para posterior congelamento.

Figura 2 – Coleta do lixiviado com balde plástico (A) e armazenamento das amostras coletadas em galão de polietileno de alta densidade (B)



Fonte: Acervo Próprio, 2025

5.2 Caracterização do lixiviado

A caracterização do lixiviado contemplou os parâmetros físico-químicos de pH, turbidez, DQO, cor, fósforo e condutividade. Os equipamentos utilizados para cada determinação, selecionados conforme as recomendações do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012), estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros analisados e equipamentos utilizados

Parâmetro	Equipamento Utilizado
Turbidez	Turbidímetro
Fósforo	Kit TNTplus + Espectrofotômetro Hach
DQO	Bloco digestor + leitura em espectrofotômetro Hach
Cor	Espectrofotômetro Hach (455 nm)
Parâmetro	Equipamento Utilizado

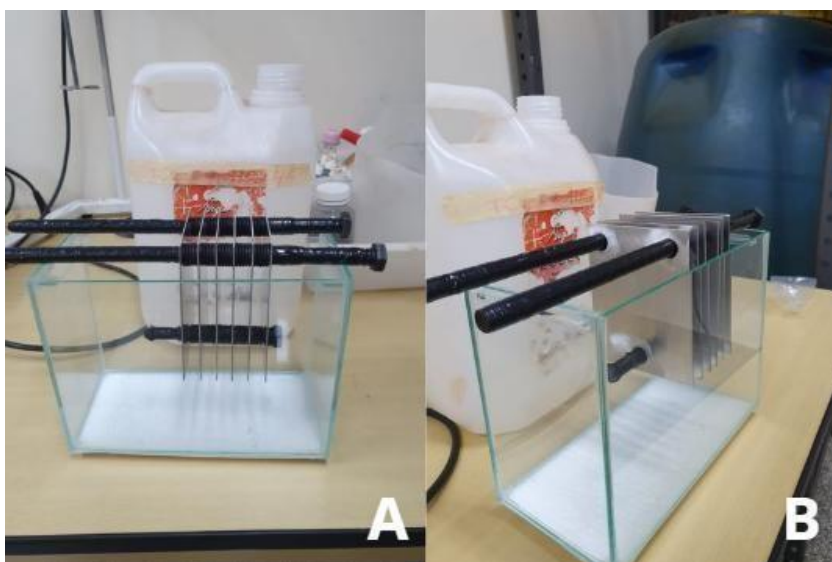
Fonte: Autoria Própria, 2025

5.3 Montagem do sistema de eletrocoagulação

O reator utilizado foi projetado e instalado no Laboratório de Saneamento da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), campus de Campo Mourão

– PR. Os ensaios de eletrocoagulação foram realizados em sistema do tipo batelada, em escala de bancada. Para isso, utilizou-se uma caixa de vidro com dimensões de 10 cm x 20 cm e volume útil de 3 Litros, conforme apresentado na Figura 4.

Figura 3 – Visualização frontal (A) e lateral (B) do reator de eletrocoagulação



Fonte: Acervo Próprio, 2025

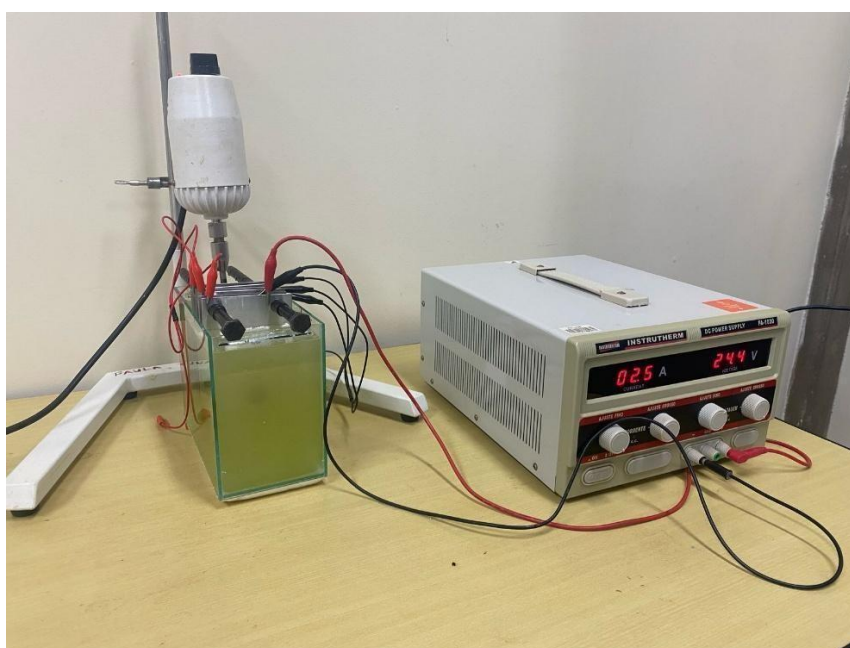
O sistema foi equipado com 6 eletrodos de alumínio com dimensões de 10 x 8 cm, em configuração bipolar, com espaçamento de 1 cm entre eles. A estrutura de suporte foi montada com barras metálicas de 25 cm (duas unidades) e uma de 10 cm, com isolamento elétrico garantido por fita isolante.

A alimentação elétrica do reator foi realizada por uma fonte de corrente contínua (Instrutherm – FA-1030), com tensão de 25 V. O controle e monitoramento da corrente elétrica foram feitos por meio de um amperímetro digital (Minipa ET- 2082C). O espaçamento e o isolamento entre os eletrodos foram ajustados com o auxílio de anéis de borracha, permitindo adequação padrão de 10 mm em todos os

ensaios. Os eletrodos foram conectados eletricamente em paralelo, com configuração monopolar, para a aplicação da corrente contínua.

A agitação da amostra foi feita por meio de agitador mecânico da marca FISATON, modelo 711 (cód. 450-1, 230 V), adequado para líquidos de baixa viscosidade, com capacidade para agitar até 6 litros de água ou menores volumes com viscosidade de até 1000 mPas (Figura 5). O equipamento possui motor universal com proteção contra sobrecarga, controle de rotação ajustável de 170 a 2000 RPM, potência de 40W e frequência de 60 Hz. A haste do agitador, em aço inoxidável 304, possui diâmetro de 1/4" e 180 mm de comprimento, equipada com hélice tipo naval de 60 mm de diâmetro. Tanto a haste quanto a hélice são revestidas com tinta emborrachada, visando prevenir reações de oxidação ou redução dos componentes metálicos do sistema de agitação.

Figura 4 – Montagem completa do sistema de eletrocoagulação: agitador mecânico, reator e fonte de corrente contínua



Fonte: Acervo Próprio, 2025

5.4 Planejamento experimental

Foi adotado um Delineamento Composto Central Rotacional, com triplicação nos pontos centrais, visando à investigação de duas variáveis em dois níveis. Os fatores experimentais foram definidos nos níveis inferior (-1), superior

(+1), ponto central (0) e nos pontos axiais (-1,41 e +1,41), de acordo com o ajuste de curvatura proposto por Montgomery (2012). As variáveis estudadas corresponderam à concentração do lixiviado e ao tempo de eletrocoagulação, apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Planejamento dos ensaios de eletrocoagulação

Ensaio	Concentração de Lixiviado (%)	Tempo (Segundos)	Codificação
R1	14,54	518	-1
R2	85,46	518	-1
R3	14,54	1582	1
R4	85,46	1582	1
R5	50	300	-1,41
R6	50	1800	1,41
R7	0	1050	0
R8	100	1050	0
R9	0	1050	0
R10	0	1050	0
R11	0	1050	0

Fonte: Autoria Própria, 2025

O planejamento experimental teve como objetivo otimizar a variável resposta, representada pela Eficiência de Remoção (ER). As equações polinomiais foram determinadas com base na análise da influência independente e combinada dos fatores.

Os resultados obtidos experimentalmente foram submetidos à análise estatística com o objetivo de verificar a influência das variáveis operacionais sobre a eficiência do processo de eletrocoagulação.

A avaliação dos dados foi realizada por meio da análise de superfície de resposta (ASR), utilizando um software de estatística que permitiu ajustar modelos empíricos representando o comportamento das respostas em função dos fatores estudados. Com base nesses modelos, foram geradas as superfícies de resposta ajustadas para cada parâmetro avaliado, possibilitando a identificação das regiões de maior eficiência de remoção.

A qualidade do ajuste foi verificada por meio da análise de variância (ANOVA), a fim de avaliar a significância dos efeitos principais e das interações entre os fatores. Os valores do erro puro (*MS Pure Error*) e do erro residual (*MS*

Residual) foram utilizados para verificar a adequação dos modelos propostos. Além disso, aplicou-se a função de desejabilidade (*desirability*) com o propósito de determinar a combinação ótima das variáveis independentes, visando maximizar simultaneamente as eficiências de remoção obtidas.

Essa abordagem estatística possibilitou compreender a interação entre os fatores operacionais e identificar as condições mais favoráveis ao desempenho do processo de eletrocoagulação no tratamento do lixiviado.

5.5 Avaliação da eficiência de remoção

A eficiência do processo foi avaliada por meio da remoção dos parâmetros de turbidez, cor e DQO. A eficiência de remoção (%) foi então calculada com base na Equação 3.

$$ER = \left(\frac{C_i - C_f}{C_i} \right) * 100 \quad (3)$$

Onde:

- C_i = concentração inicial do parâmetro (mg/L ou uT),
- C_f = concentração final após o tratamento.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Caracterização do Lixiviado Bruto

A caracterização do lixiviado bruto evidenciou a elevada carga poluente característica de efluentes provenientes de aterros sanitários em estágio maduro. Os valores iniciais determinados foram de 199,00 NTU de turbidez, 581 unidades de cor aparente (455 nm) e 576,20 mg/L de DQO, indicando a presença expressiva de sólidos suspensos, substâncias húmicas e matéria orgânica recalcitrante. O elevado teor de cor e turbidez demonstra a predominância de compostos aromáticos de alto peso molecular, enquanto a alta DQO reforça o caráter pouco biodegradável do efluente. Esses resultados confirmam que o lixiviado bruto analisado possui composição complexa e altas concentrações de poluentes, exigindo a aplicação de processos físico-químicos robustos, como a eletrocoagulação, para sua clarificação e redução da carga orgânica antes do descarte ou de tratamentos complementares.

6.2 Eficiência do Processo de Eletrocoagulação

A aplicação do processo de eletrocoagulação promoveu alterações nos parâmetros físico-químicos avaliados ao longo dos ensaios. Os valores médios iniciais e finais de turbidez, cor aparente e DQO foram obtidos experimentalmente, enquanto as respectivas eficiências de remoção encontram-se apresentadas na Tabela 2, permitindo observar o desempenho do processo em cada condição analisada.

Tabela 3 – Resultados da Eficiência de Remoção dos parâmetros de Turbidez, DQO e Cor aparente

ENSAIO	Turbidez (%)	Cor aparente	
		(%)	DQO (%)
R1	44,19	93,55	78,03
R2	99,25	87,55	74,26
R3	91,78	98,25	55,41
R4	99,07	93,92	74,14
R5	98,65	89,47	83,55
R6	99,26	96,04	87,75
R7	0,00	0,00	5,71
R8	99,60	93,46	87,09
R9	99,79	95,50	78,10
R10	99,72	95,69	80,66
R11	99,75	95,59	79,38

Fonte: Autoria própria (2025)

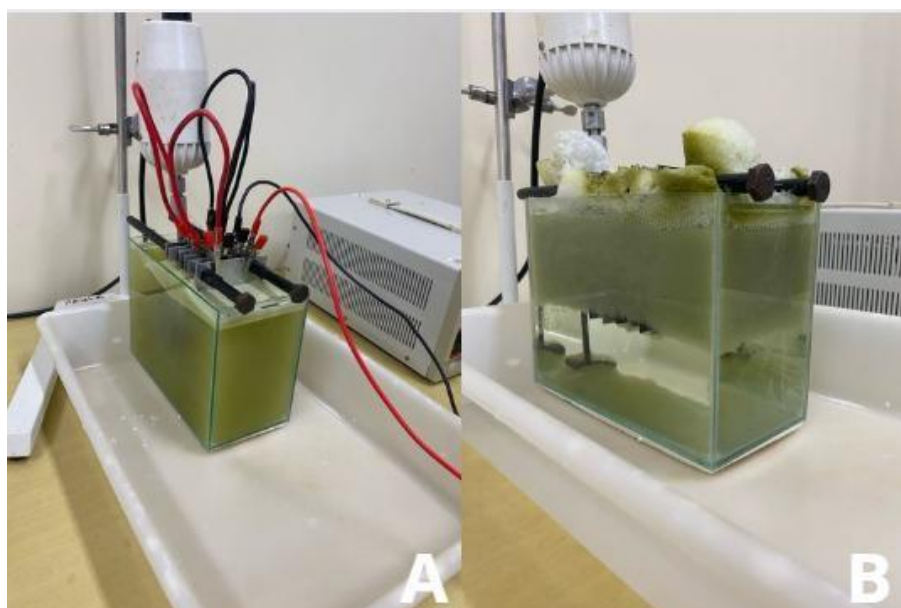
Notas complementares:

- R7 corresponde à amostra de água destilada utilizada como branco experimental.
- Temperatura de ensaio: 24,2 a 25,6 °C.

A turbidez inicial das amostras variou entre 6,57 e 199,00 NTU, reduzindo-se para valores entre 0,17 e 4,85 NTU após o tratamento, correspondendo a reduções superiores a 95% em todos os ensaios. O melhor desempenho foi registrado em R9 (50% de lixiviado, 17 min 30 s), com 99,79% de remoção, evidenciando a elevada capacidade do processo para eliminação de partículas suspensas. Essa eficiência está relacionada à formação de hidróxidos de alumínio no ânodo, que atuam como coagulantes metálicos *in situ*, promovendo a agregação e a flotação de sólidos coloidais. Resultados semelhantes foram relatados por Galvão, Souza e Vidal (2020), que apontaram a eletrocoagulação como técnica eficaz para clarificação de efluentes complexos.

A cor aparente, medida a 455 nm, apresentou comportamento análogo, com reduções acima de 90% na maior parte dos ensaios e máximo de 98,25% em R3 (14,54% de lixiviado, 26 min 22 s). Essa elevada remoção está relacionada à capacidade da eletrocoagulação em desestabilizar e remover substâncias cromóforas presentes em compostos húmicos e fúlvicos, conforme discutido por Galvão, Souza e Vidal (2020). A Figura 6 apresenta o contraste visual entre o efluente bruto e o tratado, permitindo observar as diferenças após a aplicação do processo. Observou-se ainda que a menor concentração de lixiviado (14,54%) favoreceu a clarificação, enquanto o aumento do tempo de exposição resultou em incrementos pouco significativos após os primeiros minutos de reação.

Figura 5 – Efluente antes do ensaio de eletrocoagulação (A) e efluente após o tratamento com formação de lodo (B)

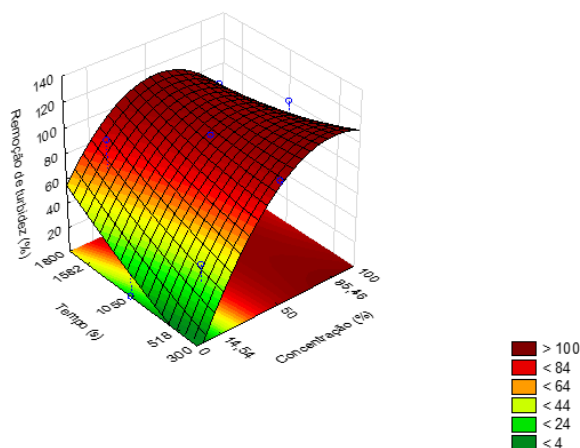


Fonte: Acervo próprio, 2025

6.3 Análise Estatística dos Fatores

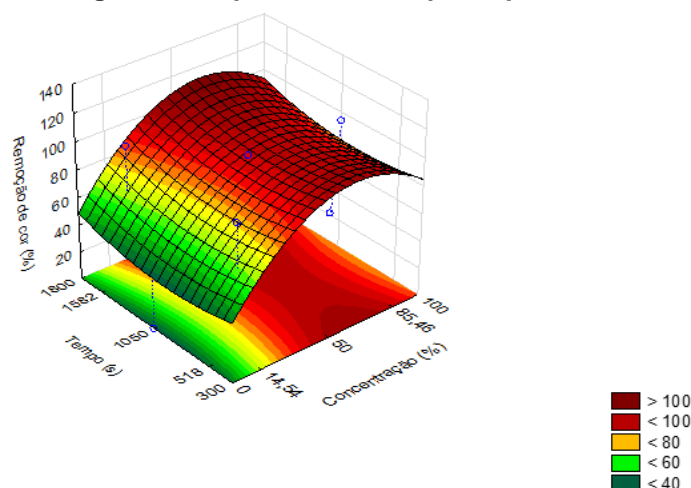
A análise de superfície de resposta (Figuras 7, 8 e 9) demonstrou que os fatores tempo e concentração do lixiviado influenciaram significativamente a eficiência do processo. As superfícies resposta para os parâmetros turbidez, cor e DQO evidenciaram tendência crescente de remoção com o aumento da concentração até o ponto central, seguido de estabilização para tempos superiores a 900 segundos.

Figura 6 – Superfícies de resposta para turbidez



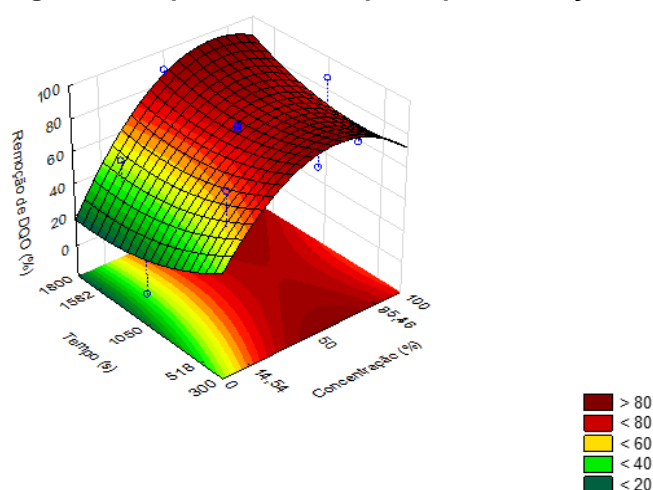
Fonte: Autoria própria (2025)

Figura 7 – Superfícies de resposta para cor



Fonte: Autoria própria (2025)

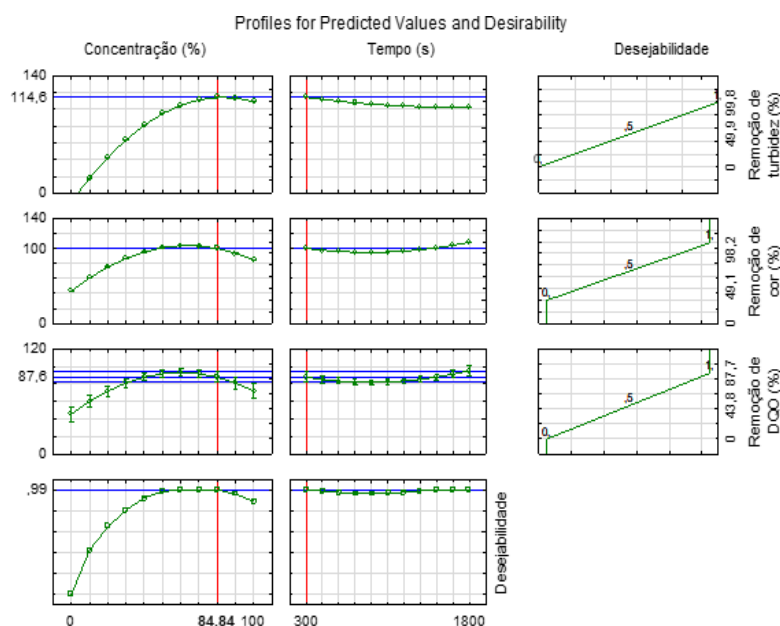
Figura 8 – Superfícies de resposta para remoção da DQO



Fonte: Autoria própria (2025)

Os modelos ajustados apresentaram significância estatística (p -valor $< 0,05$), considerando nível de significância de 5% e intervalo de confiança de 95%. Os valores previstos mostraram correlação consistente com os valores experimentais, com erros residuais inferiores a 5% e coeficientes de determinação (R^2) adequados ao ajuste dos dados. A análise multivariada indicou que o ponto de melhor desempenho ocorreu em aproximadamente 1020 segundos de eletrólise e 50% de concentração de lixiviado, condições identificadas como mais favoráveis ao tratamento segundo o modelo estatístico (Figuras 10), foram obtidos os valores preditos de 99,7% para turbidez, 98,2% para cor e 87,7% para DQO, representando o ponto de maior eficiência estimado pelo modelo.

Figura 9 – Perfis de valores preditos e desejabilidade global para turbidez, cor e DQO



Fonte: Autoria própria (2025)

Esse comportamento pode ser explicado pela dinâmica eletroquímica do sistema. Em tempos muito curtos, a quantidade de coagulante metálico ainda é insuficiente para promover a completa desestabilização das partículas e a agregação dos compostos orgânicos. Já em tempos excessivamente longos, ocorre tendência de redução da eficiência devido à saturação dos sítios ativos dos hidróxidos de alumínio, à possível redissolução de espécies já formadas e ao aumento desnecessário do consumo energético. Assim, o intervalo intermediário garante equilíbrio entre formação de coagulantes, estabilidade dos flocos e adequada transferência de massa.

Quanto à concentração, níveis moderados, como os 50% previstos no ponto ótimo, apresentam condutividade adequada para favorecer a geração de espécies coagulantes e, simultaneamente, evitam sobrecarga do sistema com excesso de matéria orgânica ou sólidos que poderiam dificultar a clarificação. Por isso, a combinação entre concentração intermediária e tempo otimizado favorece a eficiência global do processo, garantindo remoção elevada sem comprometer estabilidade operacional ou consumo energético.

6.4 Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A DQO apresentou variação mais pronunciada entre os ensaios, com remoções entre 55,41% e 87,75%. A análise de variância (ANOVA) indicou significância do modelo ($p < 0,05$) e coeficiente de determinação satisfatório, evidenciando que os

fatores tempo e concentração explicam de forma consistente o comportamento observado. A superfície de resposta revelou que o aumento da concentração do lixiviado favoreceu a remoção de matéria orgânica, resultado esperado pela elevação da condutividade elétrica, que intensifica a dissolução do alumínio no ânodo e a formação de espécies coagulantes (Ferreira, 2013; Mollah *et al.*, 2004). No entanto, o termo quadrático associado ao tempo mostrou tendência de redução da eficiência em períodos prolongados, fenômeno associado à saturação dos hidróxidos metálicos e à possível redissolução de compostos orgânicos previamente floculados, como também discutido por Sousa (2016). Esse comportamento indica que tempos moderados são mais favoráveis, evitando efeitos indesejados de passivação dos eletrodos ou dispersão dos flocos. A combinação entre concentração intermediária (50%) e tempo de aproximadamente 1020 segundos foi identificada como a condição mais favorável pelo modelo, resultando nos valores preditos de 87,70% para DQO, próximos aos valores experimentais observados.

6.5 Cor Aparente

A cor apresentou sensibilidade maior às variações de concentração do lixiviado, com remoções experimentais variando de 87,55% a 98,25%. A superfície de resposta e a equação ajustada mostraram que a concentração exerce o efeito predominante sobre esse parâmetro, com menores níveis de lixiviado – como a condição de 14,54% – favorecendo a clarificação. Esse resultado é consistente com a natureza dos compostos cromóforos presentes no lixiviado, geralmente associados a substâncias húmicas e fúlvicas de elevado peso molecular, que são removidas preferencialmente por adsorção nos hidróxidos metálicos formados *in situ* (Ferreira, 2013; Galvão; Souza; Vidal, 2020). O modelo apresentou significância estatística ($p < 0,05$) e erro residual reduzido, indicando boa adequação preditiva. A tendência observada de melhora mais acentuada em concentrações menores pode ser atribuída à relação entre carga orgânica inicial e quantidade de coagulante gerado, permitindo maior disponibilidade de sítios ativos para adsorção. Esse efeito já foi destacado por Sousa (2016), que observou remoções superiores de compostos húmicos em sistemas operando com proporções moderadas de efluente bruto. Assim, a remoção de cor se mostrou dependente principalmente da proporção entre as espécies coagulantes formadas e a carga cromófora presente no meio.

6.6 Turbidez

A remoção de turbidez apresentou valores elevados em praticamente todas as condições avaliadas, variando entre 44,19% e 99,79%. Esse comportamento está associado à rápida formação de hidróxidos de alumínio durante a eletrólise, que atuam na desestabilização de partículas coloidais por mecanismos de neutralização de cargas, adsorção e floculação por varredura, como descrito por Mollah *et al.* (2004) e Holt, Barton e Mitchell (2005). A análise de superfície de resposta indicou que tanto o tempo de eletrólise quanto a concentração exerceram influência positiva sobre a remoção, embora a turbidez tenha sido o parâmetro menos sensível à variação dos fatores, mantendo níveis elevados de clarificação mesmo em tempos curtos. O modelo ajustado apresentou significância estatística ($p < 0,05$) e coeficiente de determinação adequado, com termos lineares e quadráticos indicando tendência de estabilização após determinado intervalo, conforme também relatado por Galvão, Souza e Vidal (2020) para efluentes de alta complexidade. Esse comportamento reforça a rápida resposta do processo para sólidos suspensos, cuja remoção ocorre majoritariamente nos minutos iniciais de eletrólise.

6.7 Parâmetros Complementares

A condutividade elétrica apresentou tendência geral de redução, atingindo a maior queda em R2 (85,46% de lixiviado, 8 min 38 s), com redução de 38,32%, sugerindo remoção de íons dissolvidos e precipitação de espécies metálicas.

O pH inicial variou entre 7,0 e 9,08, apresentando leve elevação após o tratamento (7,72 a 8,82), comportamento atribuído à geração de íons hidroxila no cátodo, conforme observado por Sousa (2016).

As concentrações de fósforo permaneceram abaixo do limite de detecção, impossibilitando sua quantificação e discussão.

6.8 Considerações Integradas

A análise conjunta dos fatores indicou que o tempo de tratamento exerce maior influência sobre a DQO, enquanto a concentração do lixiviado afeta principalmente a cor e a condutividade. A turbidez apresentou remoções elevadas em todas as condições investigadas, indicando que o processo atua de maneira eficaz na desestabilização das partículas suspensas desde os estágios iniciais da eletrólise.

Os resultados experimentais e preditos evidenciados na Tabela 3 confirmam o potencial da eletrocoagulação como alternativa tecnológica viável para o tratamento de lixiviados, com alta eficiência na remoção de turbidez, cor e parte da carga orgânica. Entretanto, recomenda-se a integração com processos complementares, como oxidação avançada ou filtração, para o atendimento integral aos padrões de lançamento estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011.

Tabela 4 – Síntese dos valores experimentais e preditos de remoção (%) e desejabilidade global

Parâmetro	Valor experimental (%)	Valor predito (%)	Tempo (seg)	Concentração (%)	Desejabilidade
Turbidez	99,79	99,75	502,8	85,46	1,000
Cor	98,25	98,24	1573,2	14,54	1,031
DQO	87,09	87,70	1050	100	0,993

Fonte: Autoria própria (2025)

6.9 Comparativo com Estudos da Literatura

Os resultados obtidos neste estudo demonstram desempenho compatível e, em alguns casos, superior ao reportado em pesquisas anteriores sobre a aplicação da eletrocoagulação no tratamento de lixiviados de aterros sanitários.

Galvão, Souza e Vidal (2020) observaram reduções superiores a 90% na turbidez e 85% na cor aparente utilizando eletrodos de alumínio em efluentes complexos, resultados semelhantes aos obtidos neste trabalho. Esses autores destacam que a eficiência do processo está fortemente associada à formação de hidróxidos metálicos amorfos, capazes de adsorver e precipitar partículas coloidais, mecanismo também evidenciado nos ensaios realizados.

Sousa (2016) identificou comportamento análogo quanto ao aumento do pH durante a eletrólise, atribuído à geração de íons hidroxila no cátodo e à consequente precipitação de espécies metálicas. O mesmo fenômeno foi constatado neste estudo, confirmando o efeito eletroquímico característico do processo.

Em estudo mais recente, Ferreira *et al.* (2022) avaliaram a eletrocoagulação aplicada ao lixiviado de aterro controlado, relatando remoção de DQO em torno de 80% sob condições ótimas de corrente e tempo intermediário de tratamento. O

valor obtido neste trabalho (87,09%) reforça o bom desempenho do sistema empregado e a adequação das condições experimentais definidas pelo delineamento composto central rotacional.

A comparação com estudos prévios demonstra que o comportamento do sistema desenvolvido se alinha ao desempenho esperado para eletrocoagulação aplicada ao tratamento de lixiviados, alcançando valores iguais ou superiores aos comumente relatados. Sousa (2016) descreveu remoções de turbidez variando entre 80% e 95% e de cor entre 70% e 92%, faixas que foram igualadas ou superadas nas condições avaliadas. Ferreira (2013) também observou remoções de cor próximas de 90% utilizando eletrodos de alumínio, corroborando o potencial do método para a descoloração de efluentes com elevada presença de substâncias húmicas. Quanto à DQO, os resultados obtidos se encontram dentro da faixa considerada típica para o processo, conforme reportado por Mollah *et al.* (2004) e Holt, Barton e Mitchell (2005), que descrevem eficiências entre 60% e 85% em sistemas operando com cargas orgânicas complexas. Dessa forma, os dados aqui apresentados confirmam que o desempenho observado é consistente com a literatura, destacando-se especialmente para turbidez e cor.

Esses resultados confirmam que a eletrocoagulação com eletrodos de alumínio é uma tecnologia promissora para o tratamento de lixiviados com elevada carga orgânica e baixa biodegradabilidade, destacando-se pelo controle operacional simples e pela rápida resposta do sistema.

Em síntese, o desempenho obtido neste estudo reafirma o potencial da eletrocoagulação como etapa primária ou complementar em sistemas integrados de tratamento de lixiviados, especialmente quando associada a processos de polimento, como oxidação avançada ou adsorção (Holt; Barton; Mitchell, 2005).

7 CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo avaliar a eficiência da eletrocoagulação com eletrodos de alumínio no tratamento de lixiviado de aterro sanitário, alcançando de forma satisfatória todos os objetivos estabelecidos. Inicialmente, a caracterização do lixiviado bruto permitiu identificar parâmetros críticos, como turbidez de 199 NTU, cor aparente de 581 uC, DQO de 576,20 mg·L⁻¹, pH ácido e elevada condutividade elétrica, confirmando a elevada carga poluente e a necessidade de um tratamento físico-químico robusto.

O reator de eletrocoagulação foi preparado e operado em batelada sob condições controladas, garantindo reprodutibilidade dos ensaios quanto à densidade de corrente, distância entre eletrodos e volume tratado. A aplicação do processo em diferentes tempos definidos pelo Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) possibilitou testar sistematicamente a influência das variáveis independentes — tempo de eletrólise e concentração do lixiviado — sobre as respostas de interesse.

A análise das amostras tratadas demonstrou reduções expressivas nos parâmetros monitorados. A turbidez alcançou remoções de até 99,79%, resultado da formação eficiente de hidróxidos de alumínio capazes de desestabilizar e aglomerar partículas coloidais. A cor apresentou remoção máxima de 98,25%, associada à interação dos flocos metálicos com substâncias húmicas e fúlvicas. A DQO, por sua vez, apresentou remoções entre 55,41% e 87,75%, comportamento influenciado pela concentração do lixiviado e pela disponibilidade de coagulante metálico. Além disso, observou-se diminuição da condutividade elétrica, indicando redução de íons dissolvidos e precipitação de espécies metálicas.

O cálculo das eficiências de remoção em cada ensaio permitiu identificar tendências claras, evidenciando que concentrações moderadas e tempos intermediários favorecem a clarificação e a redução de carga orgânica. A integração desses resultados ao DCCR indicou significância estatística dos modelos ($p < 0,05$) e coeficientes de determinação adequados, demonstrando que os fatores avaliados explicam de forma consistente o comportamento das respostas. O ponto ótimo determinado pelo modelo ocorreu em 1020 s de eletrólise e concentração intermediária (50%) de lixiviado, condições nas quais foram previstos valores de 99,75% para turbidez, 98,24% para cor e 87,70% para DQO.

Assim, conclui-se que a eletrocoagulação utilizando eletrodos de alumínio

demonstrou elevado potencial para o tratamento de lixiviados, promovendo reduções significativas em sólidos suspensos, compostos cromóforos e matéria orgânica. Os resultados demonstram que o processo é eficiente como etapa primária e pode atuar de forma complementar em sistemas integrados de tratamento, especialmente quando associado a técnicas de polimento, como adsorção ou processos oxidativos avançados. Dessa forma, este estudo contribui para a consolidação da eletrocoagulação como alternativa tecnológica viável, sustentável e aplicável ao tratamento de efluentes de alta complexidade.

REFERÊNCIAS

- APHA/WEF/AWWA. Standard Methods for the examination of water and wastewater. In: CLESCERI, L.S, GREENBREG, E.; EATON, A.D. (Ed). **American public health association**. 20 th ed. Washington, 2012.
- Barrera-Díaz, C. E.; Balderas-Hernández, P.; Bilyeu, B. Electrocoagulation: Fundamentals and Prospectives. In: Martínez-Huitle, C. A.; Rodrigo, Manuel A.; Scialdone, O. **Electrochemical Water and Wastewater Treatment**. p. 61-76, 2018.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 18 mar. 2005.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Atualizada em 2012.
- CANDIA-ONFRAY, C., ESPINOZA, N., SABINO DA SILVA, E. B., TOLEDO-NEIRA, C., ESPINOZA, L. C., SANTANDER, R., GARCIA, V., SALAZAR, R. (2018). Treatment of winery wastewater by anodic oxidation using BDD electrode. **Chemosphere**, 206, 709-717. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2018.04.175> Data de acesso: 04/06/2025
- CARMO, M. W. R. D. B. do. **Aplicação do processo de eletrocoagulação no tratamento de lixiviado de lixão desativado**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2018.
- CHEN, G. Electrochemical technologies in wastewater treatment. **Separation and Purification Technology**, v. 38, n. 1, p. 11–41, 2004.
- DANESHVAR, N., SORKHABI, H. S., KASIRI, M. B. Decolorization of dye solution containing Acid Red 14 by electrocoagulation with a comparative investigation of different electrode connections. **Journal of Hazardous Materials**, v. 112, p. 55–62, 2007.
- FERNANDES, A., PACHECO, M. J., CIRÍACO, L., LOPES, A. (2015). Review on the electrochemical processes for the treatment of sanitary landfill leachates: Present and future. **Applied Catalysis B: Environmental**, 176-177, 183-200. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apcatb.2015.03.052> Data de acesso: 04/06/2025
- FERREIRA, D. S. **Estudo comparativo da coagulação/floculação e eletrocoagulação no tratamento de lixiviado de aterro**. 2013. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro, 2013.
- GALVÃO, N.; SOUZA, J. B.; VIDAL, C. M. S. Eletrocoagulação aplicada ao

tratamento de lixiviado de aterro sanitário. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales**, v. 13, n. 2, p. 500–514, 2020. DOI: [10.22201/iingen.0718378xe.2020.13.2.67651](https://doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2020.13.2.67651). Data de acesso: 27/03/2025

GARCIA-SEGURA, S.; EIBAND, M. M. S.; MELO, J. V. DE; MARTÍNEZ-HUITLE, C. A. Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the 57 fundamentals, emerging applications and its association with other technologies. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 801, p. 267-299, 2017.

GIORDANO, G. D.; BARBOSA FILHO, M. L.; CARVALHO, J. M. Estudo da eficiência de um sistema físico-químico para tratamento de lixiviado de aterro sanitário. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 16, n. 3, p. 267–274, 2011.

HOLT, P.; BARTON, G. W.; MITCHELL, C. A. The future for electrocoagulation as a localised water treatment technology. **Chemosphere**, v. 59, n. 3, p. 355-367, 2005.

KOBYA, M. et al. Treatment of textile wastewaters by electrocoagulation using iron and aluminum electrodes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 100, n. 1–3, p. 163–178, 2003.

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

MARTINS, A. P; ROCHA, D. S.; SILVA, T. S. Coffee Waste-Based Biochar for Water Treatment: A Comprehensive Review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, p. 247-268, 2024.

MOLLAH, M. Y. A., MORKOVYSK, P., GOMES, J. A. G., KESMEZ, M., PARGA, J., COCKE, D. L. Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. **Journal of Hazardous Materials**, v. 114, p. 199–210, 2004.

MOLLAH, M. Y. A., SCHENNACH, R., PARGA, J. R., COCKE, D. L. (2001). Eletrocoagulation (EC) - Science and applications. **Journal of Hazardous Materials**, 84(1), 29-41. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/S0304> Data de acesso: 04/06/2025

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 8. ed. New York: Wiley, 2012.

OLIVEIRA, C. C., PALÁCIO, SORAYA MORENO; ESPINOZA-QUIÑONES, F. R., MÓDENES, A. N., BORBA, F. H., SILVA, F. G. Toxicity assessment from electro- coagulation treated-textile dye wastewaters by bioassays. **Journal of Hazardous Materials**, v. 172, p. 330 337, 2009.

ORTIZ, K. R.; BOTARI, J. C.; BOTARI, A. Eficiência de remoção de DQO do processo de eletrocoagulação no tratamento de chorume. In: XII SAFETY, HEALTH AND ENVIRONMENT WORLD CONGRESS (SHEW), São Paulo, 2012. **Anais [...]**. São Paulo: SHEWC, 2012.

SILVA, E. A.; VAZ, G. L.; KLEN, M. R. F.; VEIT, M. T.; BARBIERO, T. A. e BERGAMASCO, R. Avaliação da eficiência de diferentes agentes coagulantes na remoção de cor e turbidez em efluentes de galvanoplastia. **Eclética Química**. Volume 35, N4, 2010.

SOUSA, P. C. de. **Aplicação do processo de eletrocoagulação no tratamento de efluentes da indústria têxtil**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2016.

SOUSDALEFF, M. **Estudo do biochar de borra de café no tratamento do lixiviado do aterro sanitário de Campo Mourão**. 2024. Dissertação (Mestrado em Inovações Tecnológicas) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2024.

TANG, J., ZHANG, C., SHI, X., SUN, J., CUNNINGHAM, A. (2019). Municipal wastewater treatment plants coupled with electrochemical, biological and bio-electrochemical technologies: Opportunities and challenge toward energy self-sufficiency. **Journal of environmental management**, 234, 396-403. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.12.097>