

UNIVERSIDADE FEDERAL DA FRONTEIRA SUL
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL E SANITÁRIA
CAMPUS CHAPECÓ

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO
(ELETROFLOCULAÇÃO) APLICADO AO LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO**

DISCENTE: Kemilly Soranzo
ORIENTADOR: Prof. Dr. Guilherme Martinez Mibielli
COORDENADOR: Prof. Dr. João Paulo Bender

Dezembro - 2025

KEMILLY SORANZO

**AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO
(ELETROFLOCULAÇÃO) APLICADO AO LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO**

Projeto de pesquisa apresentado ao Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), como requisito para aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Martinez Mibielli

Coorientador: Prof. Dr. João Paulo Bender

CHAPECÓ

2025

KEMILLY SORANZO

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO (ELETROFLOCULAÇÃO) APLICADO AO LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção de grau de Bacharel em Engenharia Ambiental e Sanitária da Universidade Federal da Fronteira Sul.

Orientador: **Prof. Guilherme Martinez Mibielli**

Este trabalho de conclusão de curso foi defendido e aprovado pela banca em: 05.12.2025

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **GUILHERME MARTINEZ MIBIELLI**
Data: 05/12/2025 15:06:14-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Guilherme Martinez Mibielli - UFFS

Documento assinado digitalmente
 **MARCELO GUERREIRO CRIZEL**
Data: 08/12/2025 08:44:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Marcelo Guerreiro Crizel – Técnico da UFFS

Documento assinado digitalmente
 **CAROLINE PAGANI CENCI**
Data: 08/12/2025 13:33:08-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

**Enga. Ambiental e Sanitarista Caroline Pagani Cenci – Kemia
Tratamento de Efluente**

AVALIAÇÃO DA EFICIÊNCIA DO TRATAMENTO FÍSICO-QUÍMICO (ELETROFLOCULAÇÃO) APLICADO AO LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO

Kemilly Soranzo¹

João Paulo Bender²

Guilherme Martinez Mibielli²

RESUMO

A geração de resíduos sólidos faz parte da vida do ser humano, especialmente desde a mudança da vida nômade, por volta de 10 mil anos a.C.. Atualmente o que mais tem preocupado, além do volume gerado, é a diversidade desses resíduos, no qual representa um desafio ambiental crescente. Assim, é fundamental o desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias para o manejo, tratamento e disposição adequada desses resíduos, com o objetivo de minimizar seus impactos negativos. Com base nisso, a maneira mais adequada de disposição final desses resíduos são os aterros sanitários, porém durante sua decomposição, forma-se o lixiviado, também chamado de chorume, no qual caracteriza-se por ser altamente poluente. Posto isso, este trabalho possui como objetivo avaliar a eficiência do tratamento físico-químico (eletrofloculação) no tratamento de um efluente sintético à base de ácido fúlvico comparando seus resultados ao tratamento de um efluente real, proveniente de lixiviado de aterro sanitário coletado após tratamento biológico. Posteriormente, busca-se realizar um aumento de escala do sistema, a fim de analisar a viabilidade operacional e o potencial de aplicação em diferentes condições de volume. Após a realização dos ensaios, foi possível observar uma eficiência elevada na redução de DQO e cor, atingindo valores superiores a 80% e 90% respectivamente. Os melhores resultados foram obtidos com eletrodos de cobre e em pH ácido. O aumento de escala mostrou-se eficaz demonstrando assim, estabilidade e consistência do experimento.

Palavras chaves: Tratamento físico-químico; Lixiviado; DQO.

¹ Discente do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), Campus Chapecó, SC, Brasil. E-mail: kemillysoranzo@gmail.com

² Docente do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), Campus Chapecó, SC, Brasil. E-mail: joão.bender@uffs.edu.br

² Docente do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), Campus Chapecó, SC, Brasil. E-mail: guilherme.mibielli@uffs.edu.br

ABSTRACT

The generation of solid waste is part of human life, especially since the shift from nomadic life around 10,000 BC. Currently, what is most concerning, besides the volume generated, is the diversity of this waste, which represents a growing environmental challenge. Therefore, it is essential to develop and improve technologies for the management, treatment, and proper disposal of this waste, with the aim of minimizing its negative impacts. Based on this, the most appropriate method for the final disposal of this waste is in sanitary landfills. However, during decomposition, leachate, also called slurry, is formed, which is highly polluting. That said, this study aims to evaluate the efficiency of physical-chemical treatment (electrofloculation) in the treatment of a synthetic effluent based on fulvic acid, comparing its results to the treatment of a real effluent from landfill leachate collected after biological treatment. Subsequently, we seek to scale up the system in order to analyze its operational feasibility and potential for application under different volume conditions. After conducting the tests, we observed high efficiency in COD and color removal, reaching values greater than 80% and 90%, respectively. The best results were obtained with copper electrodes and at acidic pH. The scale-up proved effective, demonstrating the stability and consistency of the experiment.

Keywords: Physical-chemical treatment; Leachate; COD.

1. INTRODUÇÃO

A produção de resíduos sólidos faz parte da vida do ser humano, especialmente desde a mudança da vida nômade, por volta de 10 mil anos a. C., quando passaram a viver em comunidades (DEUS, et. al., 2015). Atualmente, o aumento populacional e a urbanização intensificam ainda mais o descarte de resíduos. Atrelado a grande produção de resíduos sólidos que são gerados, outro fato preocupante é a diversificada composição destes resíduos, tornando-os cada vez mais agressivos ao meio ambiente. Dada a alta diversidade e complexidade dos resíduos sólidos urbanos, é evidente o risco ambiental e à saúde pública associado ao descarte inadequado, uma vez que sua composição pode incluir metais, óleos e solventes, capazes de contaminar o solo e os recursos hídricos, além de atrair animais e insetos que atuam como vetores de doenças (GOUVEIA, 2012).

Dessa forma, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010) determina que, após o tratamento e destinação dos RSU, os resíduos restantes, chamados de rejeitos, devem ser destinados a uma disposição final ambientalmente adequada. Esse processo deve seguir normas operacionais específicas para evitar riscos à saúde pública e à segurança, além de reduzir os impactos ambientais (ABREMA, 2023).

Posto isto, a maneira mais adequada para disposição final destes resíduos são os aterros sanitários. Conforme a NBR 8419/92, o aterro sanitário é uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, projetada para proteger a saúde pública e a segurança, além de mitigar os impactos ambientais. Essa metodologia utiliza princípios de engenharia para compactar os resíduos em uma área limitada, reduzir ao máximo seu volume e cobri-los com terra diariamente ou em intervalos menores, se necessário (ABNT, 1992).

Conforme destaca Godoi (2019), durante a degradação dos resíduos sólidos dispostos em um aterro sanitário, é gerado o lixiviado, comumente também chamado de chorume, que tem por característica cor escura sendo sua origem dada por três principais fontes, a própria umidade natural dos resíduos, no qual aumentam durante a incidência de chuvas; a água que é liberada durante o processo de decomposição pelos resíduos orgânicos; e por meio de bactérias existentes nos resíduos que liberam enzimas no qual são capazes de realizar a dissolução dos compostos orgânicos presentes. Além disso, são características importantes da sua composição: altas concentrações de nitrogênio amoniacal, cloretos, matéria orgânica e

compostos orgânicos de difícil degradação (substâncias húmicas e metais) (KAWAHIGASHI, 2014).

O tratamento do lixiviado gerado no interior do aterro, surge como um importante problema a ser investigado, visto que o grande desafio no tratamento deste efluente deve-se à heterogeneidade na sua composição, e a presença de substâncias recalcitrantes como ácidos os fúlvicos, no qual métodos convencionais de tratamento costumam não ser eficientes para remoção completa dos mesmos, exigindo assim, tratamentos mais avançados (GIACOMETTI, 2024). Atualmente as técnicas mais aplicadas no tratamento do chorume consistem na aplicação de processos químicos e biológicos, porém é necessário a inclusão de métodos alternativos, como a eletrofloculação, a fim de reduzir parâmetros físico-químicos como cor, turbidez e DQO.

A eletrofloculação é caracterizada por ser um processo que envolve a geração de coagulantes “in situ” através da dissolução de íons ferro e/ou alumínio a partir, respectivamente, de eletrodos de ferro e de alumínio pela ação da corrente elétrica aplicada a esses eletrodos (GRECCO;SOUZA;ZANONI, 2021). De acordo com o destacado por Queiroz et al. (2024), o método da eletrofloculação é amplamente aceito como uma alternativa eficiente à coagulação química para o tratamento de efluentes, pois possui como característica principal a não geração de poluentes secundários, uma vez que dispensa a adição de coagulantes químicos.

Dada a alta complexidade deste efluente e sua problemática ambiental, este estudo tem por objetivo avaliar a eficiência do tratamento físico-químico (eletrofloculação) aplicado a um efluente sintético à base de ácido fúlvico comparando seus resultados ao tratamento de um efluente real, proveniente de lixiviado de aterro sanitário coletado após tratamento biológico. Posteriormente, busca-se realizar um aumento de escala do sistema, a fim de analisar a viabilidade operacional e o potencial de aplicação em diferentes condições de volume.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente estudo buscou avaliar a eficiência do tratamento físico-químico (eletrofloculação) aplicado a um efluente sintético, bem como sua utilização em lixiviado de aterro sanitário.

2.2 Objetivos específicos

Buscando alcançar o objetivo geral, definiu-se os seguintes objetivos específicos:

- Realizar o tratamento do efluente sintético a partir do processo de eletrofloculação, variando o tipo de eletrodo (alumínio e cobre), e a corrente aplicada;
- Comparar e avaliar as diferentes condições para os resultados obtidos com base nos parâmetros de cor, turbidez e DQO, com o objetivo de aplicação da melhor condição em um efluente real;
- Realizar ensaios com aumento de escala.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 EFLUENTE

Para a realização deste estudo, foi utilizado inicialmente um efluente sintético, cuja sua composição é dada principalmente por ácidos fúlvicos e posteriormente será aplicada a melhor condição para um efluente real. Em um primeiro momento foram realizados ensaios de eletrofloculação, com eletrodos de alumínio e cobre. Posteriormente foi realizada a caracterização destes efluentes, através de medição de cor, turbidez e Demanda Química de Oxigênio.

Em um segundo momento, foram realizados ensaios com a melhor condição do efluente sintético, aplicados ao efluente real, onde também foi realizada a caracterização do mesmo conforme descrito anteriormente. Além disso, também trabalhou com três escalas diferentes de reatores.

3.1.1 Efluente Sintético

Em estudo publicado por Dresch et al. (2023), onde realizou-se a quantificação de substâncias húmicas presentes no lixiviado oriundo de quatro aterros sanitários localizados na região sul do Brasil, percebeu-se que a concentração média de ácido fúlvico nas amostras era comumente de 0,2%. Com isso, preparou-se um efluente sintético com concentração de 0,2%, diluindo o ácido fúlvico comercial “BioGain® Fúlvico 70” em água destilada. Tendo como objetivo a purificação desta solução, de modo a obter um efluente composto apenas por ácido fúlvico, utilizou-se a metodologia citada por Dresch et al. (2023), onde reduziu-se o pH da solução, deixando-o próximo de 1,00 adicionando-se H_2SO_4 20% e após 24h de repouso, realizou-se a filtração à vácuo. Logo em seguida, o efluente preparado foi submetido à refrigeração em 4 °C.

3.1.2 Efluente Real

As amostras reais de chorume utilizadas para a elaboração do estudo, foram cedidas por uma empresa especializada em tratamento de efluentes localizada na cidade de Chapecó-SC. O aterro sanitário em questão localiza-se na região norte do Rio Grande do Sul e o chorume analisado foi coletado após processo de tratamento biológico.

3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS EFLUENTES

3.2.1 Determinação de pH, cor e turbidez

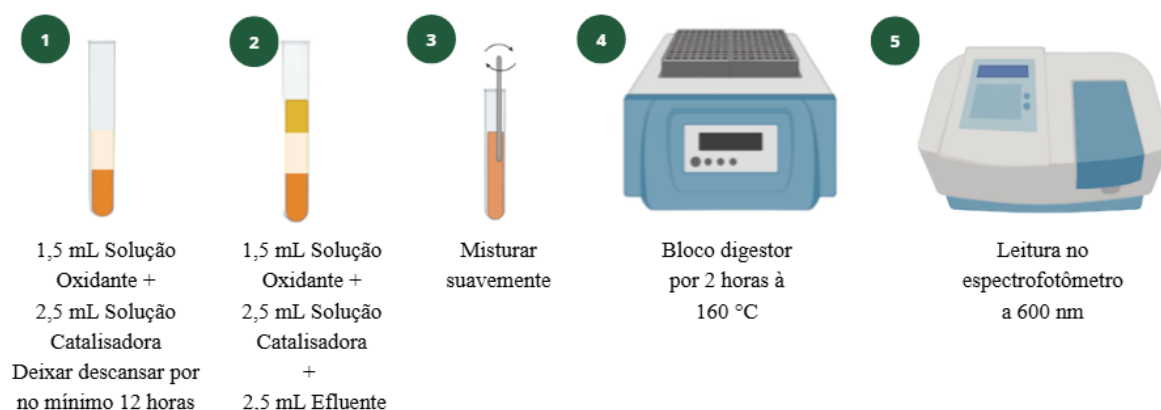
A determinação do pH do efluente foi realizada pelo método potenciométrico, a partir de um pHmetro digital, cujo modelo é mPA210 MS TECNOPON®. A cor foi determinada com equipamento colorímetro Del Lab®, onde as amostras que ultrapassarem os valores de cor superiores às faixas de leitura suportadas pelo aparelho disponível (limite de 500 uC), foram diluídas com água destilada para que se adequem a faixa do equipamento. A leitura da turbidez foi feita com o aparelho turbidímetro modelo TB-1000 TECNOPON®, sendo que nesta etapa não foi necessário realizar a diluição das amostras. Todos os equipamentos utilizados para as medições estão disponíveis no Laboratório de Resíduos Sólidos da UFFS.

3.2.2 Determinação da Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A análise de DQO seguiu a metodologia descrita no *Standard Methods for Examination of Water and Wastewater* (APHA et al., 1999). O procedimento envolveu a digestão ácida da amostra com uma solução catalisadora e uma solução oxidante em um bloco digestor a 160 °C por duas horas. A solução catalisadora é composta por ácido sulfúrico (H_2SO_4) e sulfato de prata ($AgSO_4$), enquanto a solução oxidante inclui dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$), sulfato de mercúrio ($HgSO_4$), ácido sulfúrico (H_2SO_4) e água deionizada. Após a digestão, as amostras ficaram esfriando por 30 minutos antes de serem analisadas no espectrofotômetro, com a leitura feita a 600 nm.

Tendo em vista isso, foi elaborada uma curva padrão utilizando uma solução de biftalato de potássio (KHP), seguindo a relação descrita por Peixoto et. al (2008), cujo 2,0 mL de KHP possui um valor teórico de DQO de 2.000 mg O_2 /L.

Figura 1 - Determinação da Demanda Química de Oxigênio.

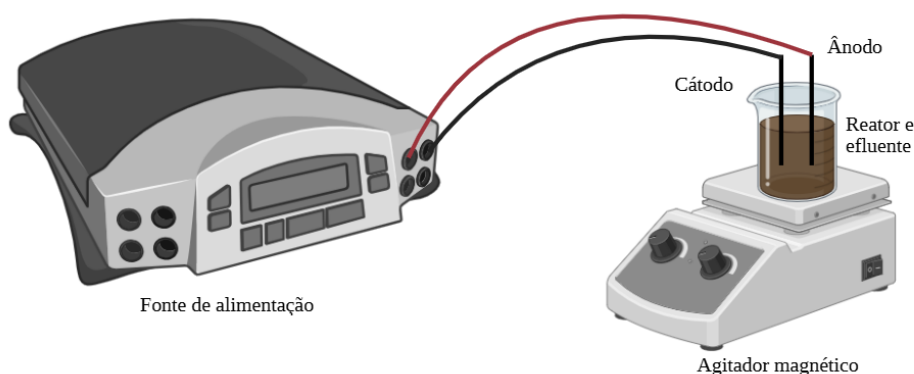


3.3 ENSAIO DE ELETROFLOCULAÇÃO

3.3.1 Bancada 220 mL

Na realização deste estudo, os ensaios de eletrofloculação foram realizados em reator batelada, em béqueres de 250 mL, no qual as amostras (aproximadamente 220 mL) ficaram submetidas a agitação magnética. Utilizou-se a fonte de alimentação DC POWER SUPPLY FA-3030 da Instrutherm®. A montagem do experimento pode ser observada no esquema representado pela Figura 02.

Figura 02 - Esquema experimental do reator de eletrofloculação empregado na realização do estudo.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

De acordo com estudos anteriores referentes à eletrofloculação aplicada ao tratamento de lixiviado de aterro sanitário e de efluente sintético, foram fixadas as variáveis seguindo as melhores condições observadas nos mesmos. De maneira geral, o sistema experimental foi

composto por dois eletrodos (cátodo e ânodo) posicionados a uma distância de 1,5 cm. Após a realização dos ensaios, as amostras permanecem sob refrigeração a 4 °C. Na Tabela 01, estão dispostas as condições operacionais que foram aplicadas aos ensaios.

Tabela 01 - Condições operacionais iniciais.

Parâmetros	Condições Operacionais
Tipo de eletrodo	Alumínio e cobre
Distância entre os eletrodos	1,5 cm
Volume	220 mL
Tipo de efluente	Sintético
pH do meio	3,0
Corrente elétrica	300, 400 mA
Tempo de reação	40 minutos
Comprimento do eletrodo submerso	6 cm
Área de eletrodo submersa	18,85 cm ²

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Após a realização dos experimentos, optou-se por analisar a melhor condição obtida e aplicá-la à um efluente real. Com isso, a conformação do reator e esquema utilizado durante esse experimento foi semelhante à descrita na Tabela 01, porém, somente com eletrodos de cobre sendo aplicada uma corrente de 400 mA, os demais parâmetros mantiveram-se os mesmos. Posteriormente foram armazenados sob refrigeração à 4 °C, para em seguida serem realizadas as análises.

3.3.2 Bancada 400 mL e 800 mL

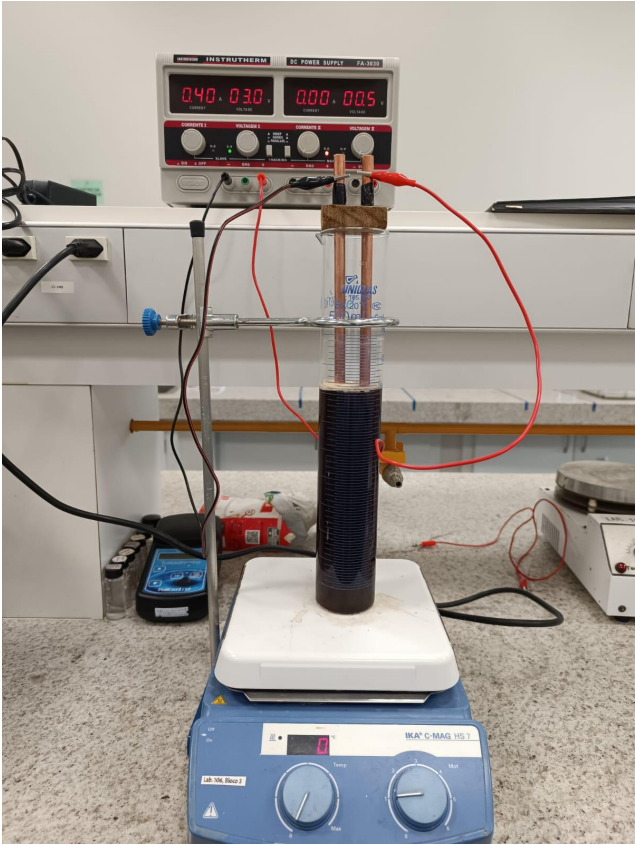
Após a realização dos ensaios em 220mL, cujo as condições foram descritas, foi realizado um aumento de escala do reator, conforme descrito na Tabela 02.

Tabela 02 - Condições operacionais secundárias.

Parâmetros	Escala 400 mL	Escala 800 mL
Tipo de eletrodo	Cobre	Cobre
Pares de eletrodos	1 par	2 pares
Volume	400 mL	800 mL
Tipo de efluente	Sintético e Real	Real
Distância entre os eletrodos	1,5 cm	1,5 cm
pH do meio	3,0	3,0
Corrente elétrica	400 mA	400 mA
Tempo de reação	40 minutos	40 minutos
Comprimento de eletrodo submerso	11 cm	9 cm
Área de eletrodo submersa	34,24 cm²	56,55cm²

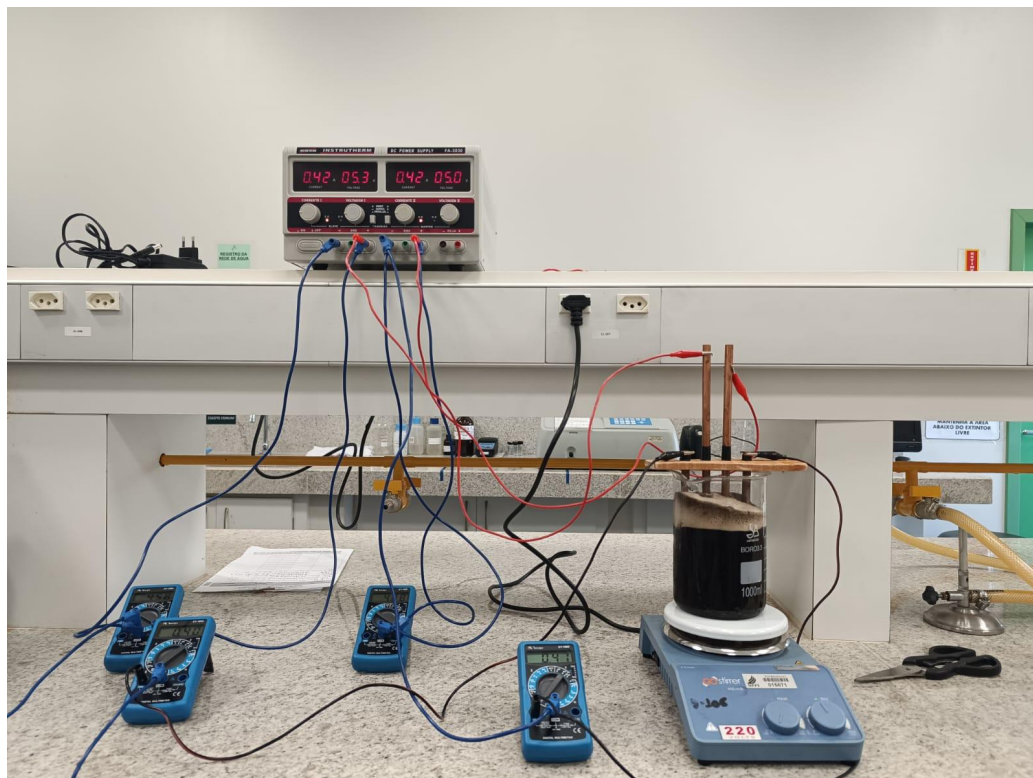
Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Figura 03 - Esquema experimental do reator de eletrofloculação de 400 mL.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Figura 04 - Esquema experimental do reator de eletrofloculação de 800 mL.



Fonte: Elaborado pela autora (2025).

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS EFLUENTES

A escolha de ser estudado um efluente sintético a base de ácidos fúlvicos deu-se principalmente pela sua massa molecular elevada e sua estrutura complexa, representando assim, uma alta persistência no meio ambiente, podendo contaminar águas superficiais e subterrâneas, causando comprometimento da qualidade e gerando riscos à saúde da população.

A caracterização de ambos os efluentes foi realizada através de leitura dos parâmetros de cor, turbidez, DQO e pH. Parâmetros como cor e turbidez estão associados com a presença de substâncias em solução ou suspensão no meio líquido, já o pH está associado com o grau de acidez ou alcalinidade do efluente em questão. Entretanto, conforme destacado por Bassani (2010), a Demanda Química de Oxigênio é um dos mais importantes parâmetros, pois torna possível a realização da medida de um resíduo orgânico em termos de quantidade de oxigênio requerida para sua oxidação até dióxido de carbono e água.

4.1.1 Caracterização do efluente sintético

Após análises, os parâmetros físico-químicos avaliados no efluente sintético que foi utilizado neste estudo encontram-se na Tabela 03.

Tabela 03 - Caracterização físico-química do efluente sintético em estado bruto.

Parâmetro	Resultado
DQO (mg O_2 /L)	8.782,98
Cor (uC)	26.950
Turbidez (NTU)	294
pH	7,69

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Giacometti (2024) estudou a eletrofloculação aplicada ao tratamento de um efluente sintético à base de ácido fúlvico. Inicialmente os parâmetros observados pela mesma apontam uma DQO em torno de 6.515 mg O_2 /L e com cor superior a 15.000 uC. Ao compararmos os resultados obtidos, percebemos que há variações nos valores encontrados, no qual podem

estar associados a uma série de fatores, como por exemplo a degradação microbiana, reações químicas (oxidação e redução), dentre outros fatores. Entretanto, não foi possível comparar com outros trabalhos pois não há estudos publicados sobre eletrofloculação aplicada à efluente sintético constituído de ácido fúlvico.

4.1.2 Caracterização do efluente real

Do mesmo modo que foram realizadas as medições dos parâmetros físico-químicos do efluente sintético, foi caracterizado o efluente real. Os resultados estão dispostos na Tabela 04.

Tabela 04 - Caracterização físico-química do efluente real em estado bruto.

Parâmetro	Resultado
DQO (mg O_2 /L)	6.846,81
Cor (uC)	14.700
Turbidez (NTU)	18,4
pH	8,13

Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Rigobello et al. (2015), realizou a caracterização de um lixiviado proveniente de um aterro sanitário localizado no município de Maringá - PR, onde foram encontradas uma DQO média de 4.498 mg O_2 /L e uma cor 3.480 uC. Já em estudo publicado por Cenci (2023), no qual trabalhou com lixiviado proveniente de aterro sanitário após tratamento biológico, observou-se uma DQO de aproximadamente 6.700 mg O_2 /L e coloração superior a 14.000 uC. É importante destacar que essa variação de resultados é dada principalmente pela composição do lixiviado proveniente de aterros sanitários, no qual pode variar dependendo de alguns fatores, como a idade do aterro, modo de operação, fatores hidrogeológicos e as características dos resíduos depositados. Em aterros com idade de operação mais avançada, seu lixiviado geralmente é muito complexo, constituído por altas concentrações de ácidos húmicos e fúlvicos (MORAIS e ZAMORA, 2005).

4.2 ENSAIO DE ELETROFLOCULAÇÃO

De acordo com Fornari (2007), em sua forma mais simples, o processo de eletrofloculação é dado através de um ânodo e um cátodo, quando aplicado uma diferença de potencial através de um meio externo, o material do ânodo é oxidado, enquanto o cátodo sofre redução. Durante o processo de oxidação do ânodo, ocorre a liberação de íons positivos que desestabilizam o sistema das partículas negativas suspensas no efluente, possibilitando assim a coagulação e a formação de flocos sedimentáveis.

4.2.1 Bancada 220 mL

4.2.1.1 Efluente sintético

Partindo das condições já descritas, foi aplicado o ensaio de eletrofloculação, com o objetivo de reduzir parâmetros físico-químicos de cor, turbidez e DQO. Os resultados estão dispostos na Tabela 05.

Tabela 05 - Resultados dos ensaios de eletrofloculação aplicada ao efluente sintético.

Ensaio	Eletrodo	S/V (cm ² /L)	DC (mA/cm ²)	DQO (%R)	Cor (%R)	Turbidez (%R)
*C3	Cobre	85,6	15,92	1.000,35 (86,61)	3.320 (87,68)	10,77 (96,34)
**A3	Alumínio	85,6	15,92	1.781,56 (79,72)	7.953 (70,49)	152 (48,30)

*C3: Eletrodo de cobre, com corrente aplicada de 300 mA, **A3: Eletrodo de alumínio, com corrente aplicada de 300 mA, S/V: razão entre área submersa e o volume da solução tratada, DC: densidade de corrente; %R: valor percentual da remoção em relação ao efluente bruto. Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Ao analisarmos os dados apresentados na Tabela 05, observa-se que o ensaio C3 alcançou uma diminuição de DQO de 86,61%, enquanto a cor apresentou uma redução de 87,68% e sua turbidez reduziu em cerca de aproximadamente 96,34%.

Embora os resultados encontrados mostraram-se significativos, optou-se por realizar o aumento da densidade de corrente, com o objetivo de verificar se o tratamento seria dado de forma mais eficiente. Os valores obtidos estão apresentados na Tabela 06.

Tabela 06 - Resultado dos ensaios de eletrofloculação aplicada ao efluente sintético após aumento da densidade de corrente.

Ensaio	Eletrodo	S/V (cm ² /L)	DC (mA/cm ²)	DQO (%R)	Cor (%R)	Turbidez (%R)
*C4	Cobre	85,6	21,22	728,01 (91,71)	2.613,33 (90,3)	18,43 (93,73)
**A4	Alumínio	85,6	21,22	2.053,72 (76,62)	7.711 (71,39)	180 (38,78)

*C4: Eletrodo de cobre, com corrente aplicada de 400 mA, **A4: Eletrodo de alumínio, com corrente aplicada de 400 mA, S/V: razão entre área submersa e o volume da solução tratada, DC: densidade de corrente; %R: valor percentual da remoção em relação ao efluente bruto. Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Após a realização dos ensaios com maior densidade de corrente, observou-se uma considerável redução dos parâmetros físico-químicos. A análise dos dados, revela que o ensaio com melhores resultados foi novamente alcançado com eletrodo de cobre, chegando a 91,71% de redução da DQO, além de uma diminuição de cerca de 90,30% da cor e 93,73% da turbidez. Na Figura 05 é possível observar a diferença na aparência do efluente após passarem pelo processo de eletrofloculação.

Figura 05 - Amostras do efluente sintético após o ensaio de eletrofloculação.



S: efluente sintético bruto, C3: Eletrodo de cobre, com corrente aplicada de 300 mA, C4: Eletrodo de cobre, com corrente aplicada de 400 mA, A3: Eletrodo de alumínio, com corrente aplicada de 300 mA, A4: Eletrodo de alumínio, com corrente aplicada de 400 mA. Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Ao analisarmos todos os resultados obtidos, percebe-se que os mais favoráveis estão na condição composta por eletrodo de cobre, com densidade de corrente de 21,22 mA/cm², tempo de reação de 40 minutos e pH igual a 3,0.

Em estudos realizados com a aplicação da eletrofloculação ao tratamento de efluente sintético, Giacometti (2024), destacou que os melhores resultados foram obtidos com uma densidade de corrente de 10,60 mA/cm², com eletrodos de alumínio, alcançando uma redução de DQO em 45%, além de reduzir a cor em cerca de 79% e alcançando a redução de 80% da turbidez.

A análises dos dados apresentados indica que a eletrofloculação aplicada ao efluente sintético a base de ácido fúlvico mostrou uma eficiência significativa na redução de DQO especialmente quando houve o aumento da densidade de corrente evidenciando assim a influência direta desse parâmetro na eficiência do processo. Posto isso, decidiu-se aplicar essa condição em um efluente real (lixiviado oriundo de aterro sanitário, coletado após tratamento biológico), a fim de verificar se os resultados obtidos também seriam promissores.

4.2.1.2 Efluente Real

A partir dos melhores resultados obtidos com o efluente sintético, nas condições de: eletrodo de cobre, intensidade de corrente de 21,22mA/cm², tempo reacional de 40 min e pH 3,0 inicial do processo, foi realizado o ensaio com efluente real, sendo os resultados apresentados na Tabela 07.

Tabela 07 - Ensaio da melhor condição aplicado ao efluente real.

Ensaio	Eletrodo	S/V (cm ² /L)	DC (mA/cm ²)	DQO (%R)	Cor (%R)	Turbidez (%R)
*RC4	Cobre	85,6	21,22	1.052,84 (84,62)	51 (99,65)	11,90 (35,33)

*RC4: Efluente real, eletrodo de cobre, com corrente aplicada de 400 mA, S/V: razão entre área submersa e o volume da solução tratada, DC: densidade de corrente; %R: valor percentual da remoção em relação ao efluente bruto. Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A Tabela 07 mostra que a aplicação da eletrofloculação ao tratamento de lixiviado de aterro sanitário obteve resultados significativos, principalmente na remoção de cor, alcançando em 99,65% de diminuição, além de uma redução da Demanda Química de Oxigênio de 84,62% e de turbidez de 35,33%. Na imagem da Figura 06 é apresentada uma comparação entre a melhor condição obtida no tratamento do efluente sintético e a mesma quando aplicada ao efluente real.

Figura 06 - Amostra de efluente real após eletrofloculação, comparada ao efluente sintético.



S: Efluente sintético bruto, C4: Efluente sintético, eletrodo de cobre, com corrente aplicada de 400 mA, RC4: Efluente real, eletrodo de cobre, com corrente aplicada de 400 mA, R: Efluente real bruto. Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Ao analisarmos estudos com aplicação da eletrofloculação ao tratamento de lixiviado de aterro sanitário, como o publicado por Cenci (2023), observa-se que houve uma redução de 80% de DQO e 96% de cor nos ensaios, cujo as melhores condições foram observadas em pH igual a 3,0, densidade de corrente igual a 5,5 mA/cm² e tempo de reação de 40 minutos.

Em estudo publicado por Dia et al. (2018), cujo as condições operacionais foram dadas através de uma densidade de corrente de 8 mA/cm², tempo de reação de 20 minutos, com ânodo de alumínio e cátodo de aço inoxidável, obteve-se uma redução de DQO do lixiviado em cerca de 37%. Enquanto isso, em estudo publicado por Rodrigues (2007), pode-se perceber que houve redução de 23% de DQO do lixiviado bruto, após realização da eletrofloculação com eletrodos de alumínio.

Ademais, resultados relativos à redução de parâmetros como DQO, cor e turbidez, mostram-se semelhantes aos obtidos nos estudos apresentados, sendo comprovado que o aumento da densidade de corrente resultaria em uma melhora significativa no tratamento do efluente, evidenciando dessa maneira que os mecanismos físicos do processo foram eficientes.

4.2.2 Bancada 400 mL e 800 mL

Com base nos resultados alcançados em uma escala menor, decidiu-se por estudar a eficiência do tratamento da eletrofloculação quando aplicado em uma escala maior. Sendo assim, as condições operacionais descritas na melhor condição aplicadas nos efluentes sintético e real, como tempo de reação de 40 minutos, pH igual a 3,0, densidade de corrente de 11,68 mA/cm², efluente sintético e real, foram utilizados para o aumento de escala. Inicialmente trabalhou-se com um volume de 400 mL, sendo os resultados obtidos apresentados na Tabela 08.

Tabela 08 - Resultados dos ensaios de eletrofloculação após aumento de escala, em reator de 400 mL.

Ensaio	Eletrodo	S/V (cm ² /L)	DC (mA/cm ²)	DQO (%R)	Cor (%R)	Turbidez (%R)
*SE1	Cobre	85,6	11,68	1.816,43 (79,32)	291 (98,92)	115 (60,88)
**RE1	Cobre	85,6	11,68	1.737,23 (74,63)	54 (99,63)	> 18,4 (0)

*SE1: Ensaio com efluente sintético em reator de 400 mL, **RE1: Ensaio com efluente real em reator de 400 mL, S/V: razão entre área submersa e o volume da solução tratada DC: densidade de corrente; %R: valor percentual da remoção em relação ao efluente bruto. Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Ao analisarmos os resultados, é possível observar que o tratamento de eletrofloculação aplicada ao efluente sintético (SE1) apresentou desempenho bastante consistente, alcançando reduções de 79,32% na DQO, 98,92% na cor e 60,88% na turbidez. Por outro lado, no ensaio realizado com efluente real (RE1), verificou-se uma redução expressiva da cor (99,63%) e uma redução de DQO de 74,63%, embora não tenha sido observada diminuição significativa na turbidez.

Apesar de os resultados obtidos serem menores em comparação aos ensaios realizados com 220 mL, nota-se uma redução significativa nos parâmetros analisados, demonstrando que o tratamento é eficaz em escalas maiores. A imagem da Figura 07 apresenta uma comparação entre os efluentes brutos e os efluentes após o processo de eletrofloculação.

Figura 07 - Comparação entre amostras de efluente após eletrofloculação, com real e sintético brutos.



S: Efluente sintético bruto, SE1: Ensaio com efluente sintético em reator de 400 mL, RE1: Ensaio com efluente real em reator de 400 mL, R: Efluente real bruto. Fonte: Elaborado pela autora (2025).

A diferença obtida nos resultados entre o efluente sintético e o real, é dada principalmente pelas suas características físico-químicas distintas, o que influencia diretamente o desempenho da eletrofloculação. Alguns fatores como concentração de matéria orgânica, presença de substâncias húmicas, metais, alcalinidade, condutividade, sólidos suspensos, entre outros, irão determinar a quantidade e a estabilidade de flocos, bem como a redução de cor, turbidez e DQO, apresentando assim, resultados distintos (PATEL, et al., 2025).

Diante disso, decidiu-se realizar um segundo aumento de escala, entretanto, optou-se analisar apenas a eficiência do tratamento físico-químico aplicado a um efluente real. Nesta etapa, as condições operacionais mantiveram-se praticamente inalteradas em relação ao que foi descrito anteriormente, como pH inicial igual a 3,00, tempo de reação de 40 minutos, densidade de corrente de 14,15 mA/cm², dois pares de eletrodos com distância de 1,5 cm entre eles. Os resultados obtidos após a eletrofloculação estão descritos na Tabela 09.

Tabela 09 - Resultados dos ensaios de eletrofloculação após segundo aumento de escala, com reator de 800 mL.

Ensaio	Eletrodo	S/V (cm ² /L)	DC (mA/cm ²)	DQO (%R)	Cor (%R)	Turbidez (%R)
*RE2	Cobre	70,6	14,15	1.158,04 (83,09)	890 (93,95)	>18,4 (0)

*RE2: Ensaio com efluente real em reator de 800 mL, S/V: razão entre área submersa e o volume da solução tratada, DC: densidade de corrente; %R: valor percentual da remoção em relação ao efluente bruto. Fonte: Elaborado pela autora (2025).

Com base nos resultados apresentados, é possível observar que houve redução de 83,09% na DQO, bem como uma diminuição de 93,95% na cor, entretanto, a turbidez não apresentou redução, indicando assim, a necessidade de um tratamento complementar, como por exemplo filtração ou centrifugação. Podemos observar na Figura 08, uma comparação sobre as três escalas diferentes que foram aplicadas ao efluente real (lixiviado proveniente de aterro sanitário).

Figura 08 - Comparação entre as amostras de efluente real após o processo de eletrofloculação e o efluente real bruto.



RE2: Ensaio com efluente real em reator de 800 mL, RE1: Ensaio com efluente real em reator de 400 mL, RC4: Ensaio com efluente real em reator de 220 mL, R: Efluente real bruto. Fonte: Elaborado pela autora (2025).

No estudo de Amouei et al. (2021), onde o lixiviado apresentou uma DQO inicial de 19420 mg O_2 /L e uma turbidez de 780 NTU, utilizou um reator com volume de 1L e aproximadamente de 600 mL de efluente, foram alcançados resultados promissores em meio alcalino (pH igual a 10), com uma redução da DQO de 83,14% e uma redução da turbidez de 77,24%.

Rusdianasari (2017), estudou a eletrofloculação com eletrodos de alumínio, aplicado ao tratamento de lixiviado de aterro sanitário em uma cidade da Indonésia, onde o mesmo apresentou uma DQO inicial de 415 mg O_2 /L, utilizando um reator com volume de 1L. Quando aplicada uma corrente de 3 mA/cm² observou-se uma diminuição de aproximadamente 73,77% da Demanda Química de Oxigênio.

Posto isto, Carvalho et al. (2017), trabalhou com reator de 5L, um par de eletrodos de chapa de alumínio e uma densidade de corrente de 59,37 mA/cm², com uma DQO inicial de 20.640 mg O_2 /L e uma cor de 13.254 mg/L, obtendo-se assim uma redução de aproximadamente 92% de DQO, além de reduzir 86,7% de cor, com um tempo de reação de 30 minutos e em pH alcalino.

Os resultados obtidos indicam que o reator de 800 mL apresentou um desempenho satisfatório, comprovando a eficiência do processo de eletrofloculação na redução da matéria orgânica e da cor do lixiviado de aterro sanitário. O comportamento observado confirma que o sistema conseguiu replicar tendências e eficiências comuns encontradas na literatura, mesmo em diferentes conformações.

4.3 RAZÃO ÁREA DE ELETRODO SUBMERSA POR VOLUME

O aumento de escala em sistemas de eletrofloculação exige preservar as condições eletroquímicas no qual são responsáveis pela geração de coagulante in situ e a formação de flocos. Parâmetros como a densidade de corrente aplicada, tempo de resistência hidráulica, distância entre os eletrodos, condutividade, pH (CARVALHO, 2018) e razão área do eletrodo submersa/volume de solução (S/V) (BRAHMI, et al., 2019), são fundamentais para a eletrofloculação e devem ser considerados ao realizar-se o escalonamento do reator.

Durante o aumento de escala realizado, adotou-se como critério principal a manutenção da razão área do eletrodo submersa por volume de solução (S/V), uma vez que este parâmetro influencia de forma direta a quantidade de coagulante gerado (CARVALHO,

2018). Embora a densidade de corrente seja idealmente mantida constante em escalonamento de reatores, tal condição não pôde ser atendida devido à limitações da fonte de alimentação.

Ao analisarmos particularmente a redução da Demanda Química de Oxigênio (DQO), nota-se que no experimento de 220 mL, com S/V igual a 85,6 cm²/L, onde a melhor condição é dada pelo eletrodo de cobre e densidade de corrente de 21,22 mA/cm², houve redução significativa da DQO (91,71%). Ao aumentar o volume para 400 mL, a razão S/V permaneceu inalterada, porém com uma densidade de corrente de 11,68 mA/cm², apresentando assim reduções de DQO entre 74% e 79% respectivamente.

Com tudo, ao realizar o aumento de escala para o volume de 800 mL, o S/V diminuiu para 70,6 cm²/L e a densidade de corrente aumentou, alcançando 14,15 mA/cm². Essa variação dos parâmetros foi dada devido a limitações físicas do reator, sendo necessário adaptar a área de eletrodo submerso de acordo com o que era suportado pelo béquer. Com isso, a redução da DQO foi de 83,09 %, evidenciando assim, a importância de manter-se a proporção dos parâmetros durante o escalonamento. Outro aspecto relevante é que a densidade de corrente desempenha papel crucial na redução dos parâmetros físico-químicos, como evidenciado nos resultados, uma vez que a redução da densidade de corrente acarretou em uma menor eficiência da diminuição da DQO, cor e turbidez.

5. CONCLUSÃO

A análise dos resultados deste estudo revelou que o processo de eletrofloculação foi eficaz na remoção de contaminantes, tanto no efluente sintético baseado em ácido fúlvico quanto no lixiviado de aterro sanitário. O tratamento físico-químico provou ser eficaz, especialmente na diminuição de parâmetros como a Demanda Química de Oxigênio (DQO) e cor aparente, atingindo reduções superiores a 80% e 90%, respectivamente. Em meio ácido (pH 3,0), os eletrodos de cobre apresentaram os maiores índices de remoção, evidenciando grande eficácia na desestabilização das partículas e na criação de flocos que podem ser sedimentados/flotados.

Apesar de terem sido encontrados resultados significativos em relação à redução da DQO e da cor, a turbidez não mostrou uma diminuição relevante em alguns testes. Isso indica a necessidade de adicionar etapas complementares, como filtração ou centrifugação, ao processo para assegurar uma melhor clarificação do efluente tratado.

O aumento de escala de 220 mL para 400 mL e, em seguida, para 800 mL, confirmou a estabilidade e a consistência do procedimento. A densidade de corrente mostrou-se um importante fator a ser levado em consideração quando realizado o escalonamento, especialmente quando falamos sobre redução da DQO. Ademais, o desempenho alcançado na escala maior confirmou a utilidade do reator como uma unidade experimental confiável, mantendo resultados consistentes com os observados em sistemas de maior volume descritos na literatura.

6. REFERÊNCIAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos: Procedimento**. Rio de Janeiro, 1992.

AMOUEI, A. I.; et al. *Treatment of landfill leachate by electrocoagulation process*. *Environmental Health Engineering and Management Journal*, v. 8, n. 1, p. 51–58, 2021. DOI: 10.34172/EHEM.2021.07. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/9fd6/ed05cc79dab13858081c3a338e77d8136f53.pdf>. Acesso em: nov. 2025.

Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente - ABREMA. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil - 2023**. São Paulo, 2023.

APHA; AWWA; WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. Washington, 1999.

BASSANI, Fabiana. Monitoramento do lixiviado do aterro controlado de Maringá, Paraná, e avaliação da tratabilidade com coagulantes naturais, radiação ultravioleta (UV) e ozônio. 2010. 144 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2010. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UEM-10_2d556ee499cbc1526c36ce47bb7e1222. Acesso em out. 2025.

BRAHMI, Khaled; et al. Investigação do efeito dos parâmetros de projeto do reator de eletrocoagulação na remoção de cádmio de águas residuais industriais sintéticas e fosfatadas. *Revista Árabe de Química*, vol 12, nº 8, 2019. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878535214003621?utm_source. Acesso em nov 2025.

CARVALHO, Endrew Henrique de Sousa. Concepção e avaliação de reator vertical de eletrocoagulação/flotação na remoção de alquilbenzeno linear sulfato. 2018. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Escola de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Goiás, Goiânia. Disponível em https://files.cercomp.ufg.br/weby/up/780/o/Disserta%C3%A7%C3%A3o_Mestrado_Endrew_Carvalho.pdf. Acesso em nov 2025.

CARVALHO, Endrew Henrique de Sousa; et al. Tratamento de lixiviado de aterro por eletrocoagulação. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL (ABES). **Anais do III Congresso Nacional de Inovação, Sustentabilidade e Tecnologias Ambientais – INTERCORR 2018**. Caxias do Sul: ABES, 2018. p. 1–8. Disponível em: https://abes-dn.org.br/anais eletronicos/36_Download/TrabalhosCompletosPDF/III-430.pdf. Acesso em out. 2025.

CENCI, Caroline Pagani. Avaliação Da Eletrofloculação Quando Aplicada Ao Tratamento De Lixiviado De Aterro Sanitário. In: Anais IV EMADS - Encontro sobre Meio Ambiente e Dinâmicas Socioambientais: Inovação e Tecnologia no Tratamento e Qualidade da Água. **Anais...Chapecó (SC) Unochapecó**, 2024. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/iv-emads/919637-avaliacao-da-eletrofloculacao-quando-apli cada-ao-tratamento-de-lixiviado-de-aterro-sanitario/>. Acesso em: out. 2025.

DEUS, Rafael Mattos; BATTISTELLE, Rosane Aparecida Gomes; SILVA, Gustavo Henrique Ribeiro. Resíduos sólidos no Brasil: contexto, lacunas e tendências. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 20, n. 4, p. 685-698, out./dez. 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/jLnBfyWrW7MPPVZSz46B8JG/>. Acesso em: out. 2025.

DIA, Oumar et al. Hybrid process, electrocoagulation-biofiltration for landfill leachate treatment. *Waste Management*, v. 75, p. 391–399, 1 maio 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X18300825> . Acesso em: out. 2025.

DRESCH, Aline Perin et al. Evaluation Of Two Different Methods For The Quantification Of Humic Substances In Landfills In Southern Brazil. In: Congresso Brasileiro De Biotecnologia Industrial, I, 2024, Florianópolis. *Anais* [...]. Chapecó, 2023. Disponível em: <https://www.cobbind.com.br/evento/cobbind2024/trabalhosaprovados/naintegra/17086>. Acesso em: out. 2025.

GIACOMETTI, Karine Graeff. **Aplicação de tratamento físico-químico como alternativa para a redução de DQO em efluente à base de ácido fúlvico**. 2024.

GODOI, Mayara Caroline Santos. Tratamento de lixiviado de aterro sanitário por meio do processo de eletrocoagulação e filtração. 2019. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2019. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/12165>. Acesso em out. 2025.

GOUVEIA, Nelson. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectivas de manejo sustentável com inclusão social. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 17, n. 6, p. 1503 - 1510, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/csc/a/y5kTpqkqyY9Dq8VhGs7NWwG/?format=html&lang=pt>. Acesso em nov. 2025.

GRECCO, Luís Henrique Araújo; SOUZA, Bárbara Camila de Araújo; ZANONI, Maria Valnice Boldrin. Eletrocoagulação/eletrofloculação para tratamento de águas residuárias: eletrodos não convencionais e acoplamento de técnicas. *Química Nova*, v. 45, n. 4, p. 535-544, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/yvJSLtRbXYQTqrkjyhZBGyy/?format=html&lang=pt>. Acesso em: nov de 2025.

FORNARI, Marilda Menchon Tavares. Aplicação da técnica de eletro-floculação no tratamento de efluentes de curtume. 2007. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2007. Disponível em: <https://tede.unioeste.br/handle/tede/1866>. Acesso em set. 2025.

KAWAHIGASHI, Flávia et al. Pós-tratamento de lixiviado de aterro sanitário com carvão ativado. *Engenharia sanitária e ambiental*, v. 19, n. 3, p. 235-244, 2014. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/vwhbRLzfrGKghNqBL9XRFqd/?lang=pt>. Acesso em set. 2025.

Morais, JL e Zamora, PP. Uso de Processos Avançados de Oxidação para Melhorar a Biodegradabilidade de Lixiviados Maduros de Aterros Sanitários. *Journal of Hazardous Materials*, 123, 181-186. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.03.041>. Acesso ago. 2025

PATEL, Sandeep Kumar; et al. State of the art review for industrial wastewater treatment by electrocoagulation process: mechanism, cost and sludge analysis. *Desalination and Water*

Treatment, v. 321, p. 100915, 2025. DOI: 10.1016/j.dwt.2024.100915. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1944398624204252>. Acesso em nov 2025.

PEIXOTO, André Luís de Castro et al. Predição da demanda química de oxigênio em chorume maduro contendo reagente de fenton, por meio de modelo matemático empírico gerado com planejamento fatorial completo. *Química Nova*, v. 31, n. 7, p. 1641–1647, 2008. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/qn/a/FNLCq6GcZ84qKBxkxh9bdJR/?lang=pt#ModalTutors> .

Acesso em: set. 2025.

QUEIROZ, Ana Quêzia Avelino de; et al. Análise de desempenho do uso de tecnologia eletrolítica no tratamento de efluentes domésticos : Uma revisão sistemática da literatura. *Revista Semiárido De Visu*, v. 12, n. 3, p. 1559-1572, 2024. Disponível em: <https://semiariidodevisu.ifsertaope.edu.br/index.php/rsdv/article/view/952>. Acesso em: nov 2025.

RIGOBELLO, Eliane Sloboda, et al. Identificação de compostos orgânicos em lixiviado de aterro sanitário municipal por cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massas. *Química Nova*, Vol 38, nº 6, 794-800, 2015. Disponível em <https://www.scielo.br/j/qn/a/gjywYnsFVKVt6y9gfTzG9tR/?format=html&lang=pt>. Acesso em out 2025.

RODRIGUES, Marina de Castro. Tratamento eletrolítico de lixiviado de aterro sanitário. 2007. 123 f. Dissertação de Mestrado. Curso de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Departamento de Engenharia Sanitária Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis - SC, 2007.

RUSDIANASARI, N.; et al. *Treatment of landfill leachate by electrocoagulation using aluminum electrodes*. In: **SICEST 2016 – Sriwijaya International Conference on Engineering, Science and Technology**. *MATEC Web of Conferences*, v. 101, p. 02010, 2017. DOI: 10.1051/mateconf/201710102010. Disponível em: https://www.matec-conferences.org/articles/mateconf/pdf/2017/15/mateconf_sicest2017_02010.pdf. Acesso em: nov. 2025.