



ELETROFLOCULAÇÃO POR ELETRÓLISE COM O USO DE CORANTES

Caio Gonçalves de Assis¹
Eduarda Victória da Silva Vaz²
Jean Castanha³
Mariana Soares Figueiredo⁴
Murilo Mendes⁵
Paola Aparecida Biscaia Horacio⁶
Rosane Rodrigues⁷
Marco Antonio Cardoso⁸

Resumo: Este trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência da técnica de eletrofloculação assistida por eletrólise no tratamento de soluções aquosas contaminadas com corantes sintéticos, em especial o azul de metileno. A metodologia consistiu na montagem de um sistema eletroquímico utilizando eletrodos metálicos conectados a uma fonte de corrente contínua, submetendo a solução contaminada a 5 minutos de eletrólise. Foram analisados parâmetros físico-químicos como cor, pH, condutividade e turbidez antes e após o tratamento. Os resultados demonstraram que, embora o tempo de contato tenha sido reduzido, foi possível observar a formação de flocos, decantação parcial e redução visual da intensidade da cor, evidenciando a efetividade inicial do processo. Conclui-se que a eletrofloculação se apresenta como uma alternativa promissora, ambientalmente adequada e economicamente viável para o tratamento de efluentes industriais contendo corantes, sendo necessário o controle de variáveis operacionais para maximizar sua eficiência.

Palavras-chave: Efluente; Eletrofloculação; Eletrólise.

¹Acadêmico do curso de Engenharia Química, pela UNIFATEB, campus Telêmaco Borba – e-mail: <caioassistb@gmail.com>.

²Acadêmico do curso de Engenharia Química, pela UNIFATEB, campus Telêmaco Borba – e-mail: <aeduardavaz@gmail.com>.

³Acadêmico do curso de Engenharia Química, pela UNIFATEB, campus Telêmaco Borba – e-mail: <jcastanha62@gmail.com>.

⁴Acadêmico do curso de Engenharia Química, pela UNIFATEB, campus Telêmaco Borba – e-mail: <mariana.soares5152@gmail.com>.

⁵Acadêmico do curso de Engenharia Química, pela UNIFATEB, campus Telêmaco Borba – e-mail: <murilo8486@hotmail.com>.

⁶Acadêmico do curso de Engenharia Química, pela UNIFATEB, campus Telêmaco Borba – e-mail: <tclpaola055@gmail.com>.

⁷Acadêmico do curso de Engenharia Química, pela UNIFATEB, campus Telêmaco Borba – e-mail: <rosanerodriguesaz0909@gmail.com>.

⁸Professor do curso de Engenharia Química, pela UNIFATEB, campus Telêmaco Borba – e-mail: <marco.souza@unifateb.edu.br>.



Abstract: This study aimed to evaluate the efficiency of the electroflocculation technique assisted by electrolysis in the treatment of aqueous solutions contaminated with synthetic dyes, particularly methylene blue. The methodology involved setting up an electrochemical system using metal electrodes connected to a direct current power source, subjecting the contaminated solution to 5 minutes of electrolysis. Physicochemical parameters such as color, pH, conductivity, and turbidity were analyzed before and after the treatment. The results showed that, although the contact time was short, it was possible to observe floc formation, partial sedimentation, and a visible reduction in color intensity, demonstrating the initial effectiveness of the process. It is concluded that electroflocculation presents itself as a promising, environmentally appropriate, and economically viable alternative for the treatment of industrial effluents containing dyes, with operational variables needing to be controlled in order to maximize its efficiency.

Key-words: Effluent; Electroflocculation; Electrolysis.

1. INTRODUÇÃO

A presença de corantes sintéticos nos efluentes industriais, principalmente da indústria têxtil, constitui uma das principais fontes de poluição hídrica devido à sua resistência à degradação, toxicidade e impacto visual significativo. O azul de metileno, um corante catiônico amplamente utilizado para tingimento de algodão, seda e papel, é frequentemente detectado em corpos d'água contaminados por despejos industriais. Sua estrutura química estável o torna persistente no ambiente, dificultando a remoção por métodos convencionais de tratamento (SANTOS et al., 2014).

Frente a isso, tecnologias de tratamento avançadas vêm sendo pesquisadas, entre elas a eletrofloculação, também chamada de eletrocoagulação. Trata-se de um processo eletroquímico no qual se utilizam eletrodos metálicos (como ferro ou alumínio), que ao serem submetidos à corrente elétrica liberam íons metálicos coagulantes in situ (FERREIRA et al., 2013). Esses íons reagem com espécies presentes no meio formando hidróxidos metálicos (ex: $\text{Fe}(\text{OH})_2$, $\text{Al}(\text{OH})_3$), que promovem a adsorção e floculação de partículas suspensas e compostos orgânicos (COSTA et al., 2016).

2. DESENVOLVIMENTO

2.1 CORANTES INDUSTRIAIS



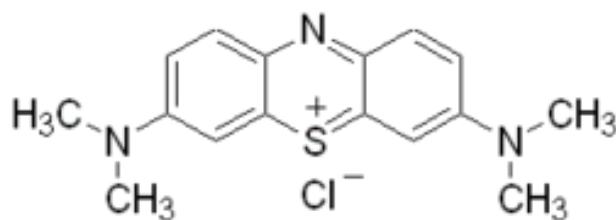
De acordo com Silva e Lima (2020), diversos corantes industriais e seus subprodutos podem apresentar efeitos tóxicos, mutagênicos ou carcinogênicos, colocando em risco tanto a vida aquática quanto a saúde humana quando presentes em águas destinadas ao abastecimento ou à irrigação. Além desses impactos, a liberação de efluentes coloridos provenientes principalmente das indústrias têxtil, de papel e de couro reduz a penetração da luz solar nos corpos d'água, prejudicando a fotossíntese e comprometendo o equilíbrio dos ecossistemas.

Junior e Azevedo (2024) ressaltam ainda que a contaminação hídrica por corantes representa um desafio ambiental relevante, pois se trata de compostos orgânicos sintéticos com alta estabilidade química, baixa biodegradabilidade e remoção dificultada pelos sistemas convencionais de tratamento. Além da toxicidade, a presença desses compostos na água interfere na penetração da luz solar, reduz a fotossíntese aquática e afeta diretamente os ecossistemas, comprometendo a biodiversidade e a qualidade da água (SILVA; LIMA; 2020).

2.2 AZUL DE METILENO

O azul de metileno (Figura 1) é um corante catiônico da classe das fenotiazinas, amplamente utilizado em diferentes segmentos industriais devido às suas propriedades químicas e à boa estabilidade em solução aquosa. Na indústria têxtil, destaca-se no tingimento de fibras como algodão, lã e seda, sendo especialmente eficaz na obtenção de tonalidades azuladas intensas (AQUINO NETO et al., 2011).

Figura 1 – Estrutura do Azul de Metileno



Fonte: ANTUNES; *et al.* (2018)

O azul de metileno é um composto químico sintético pertencente ao grupo

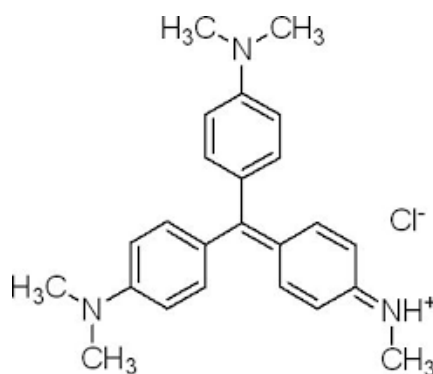


das fenotiazinas, conhecido por sua coloração azul intensa e por possuir diversas aplicações em diferentes áreas, como medicina, biologia, química e tratamento de efluentes.

2.3 VIOLETA DE METILA

O violeta de metila, também conhecido como cristal violeta, é um corante catiônico da classe dos triarilmetanos, muito utilizado em microbiologia como corante primário na técnica de Gram, além de aplicações em histologia, tinturaria e como marcador em processos analíticos.

Figura 2– Estrutura do violeta de metila



Fonte: ANTUNES; *et al.* (2018)

Apresenta coloração violeta intensa, elevada solubilidade em água e forte afinidade por materiais com cargas negativas, como componentes da parede celular bacteriana. Apesar de sua ampla utilização, o violeta de metila pode apresentar toxicidade, o que exige cuidados no manuseio e no descarte, a fim de evitar impactos ambientais e riscos à saúde.

2.4 EFLUENTES INDUSTRIAIS

Souza (2019) destaca que um dos principais contaminantes dos recursos hídricos ocorridos nas últimas décadas, consiste no descarte inadequado e indevido de efluentes provenientes dos mais diversos setores industriais, ressalta-se ainda que é de suma importância a realização de tratamentos específicos e adequados que reduzam de forma eficiente os contaminantes químicos ou biológicos contidos nestes



resíduos antes que sejam descartados ao meio.

Santos (2020) ressalta que as constantes tendências de industrialização ao redor do globo poderão resultar na geração de efluentes industriais em grandes quantidades com alto conteúdo orgânico, que se tratado adequadamente, pode-se minimizar o impacto gerado ao meio ambiente

Dentre os processos industriais destaca-se o setor responsável pela produção de celulose e papel, onde durante a realização do processo de polpação, branqueamento, e fabricação do papel, uma quantidade muito expressiva de água é empregada, o que resulta na geração de efluentes líquidos, que apresentam em sua composição subprodutos da madeira tais como a lignina gerando assim um efluente rico em compostos orgânicos (SOUZA, 2019).

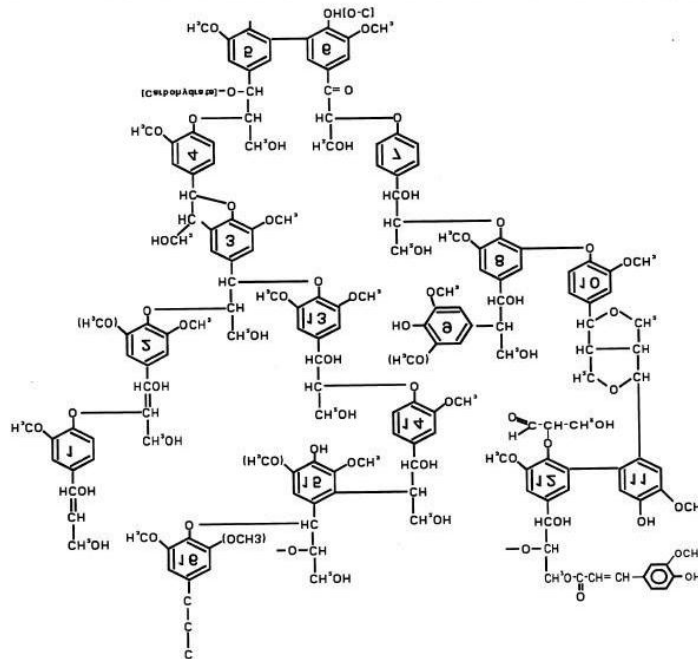
2.5 LIGNINA

Segundo Lima (2023) a lignina é um polímero natural complexo presente na parede celular das plantas, especialmente em tecidos lenhosos, cuja função principal é conferir rigidez, impermeabilidade e resistência à degradação biológica. Souza (2014) ainda destaca que diferente de compostos como a celulose e a hemicelulose, que são polissacarídeos, a lignina é formada por unidades fenólicas (derivadas principalmente de álcoois coniferílico, sinapílico e p-cumárico), organizadas de maneira irregular.

Carvalho (2014) complementa que, devido à complexa estrutura da lignina apresentada na Figura 3, sua degradação se torna difícil. Essa característica torna a lignina essencial tanto para a proteção da planta contra microrganismos quanto para a integridade estrutural da madeira, conferindo-lhe maior resistência mecânica. No entanto, essa mesma resistência representa um desafio em processos industriais, como a polpação e a produção de biocombustíveis (LIMA, 2023).



Figura 3 – Estrutura da Lignina



Fonte: LOUZADA e WANDERLEY (2009)

2.6 ELETROFLOCULAÇÃO

Belan (2014) e Santos (2020) descrevem que o processo de eletrofloculação para o tratamento de efluentes industriais é extremamente simples para aplicação, entretanto agrega conceitos físico-químicos complexos.

Carvalho, Souza e Zempulski (2015) ressaltam que o processo de eletrofloculação emprega o uso de eletrodos metálicos que através da passagem de corrente em meio líquido resultam no surgimento de íons que atuam como os floculantes em processos químicos

Estudos recentes demonstram que a eletrofloculação é eficaz na remoção de corantes como o azul de metileno, alcançando altas taxas de remoção de cor e redução de turbidez, com mínima necessidade de reagentes químicos adicionais, apresentando-se como uma alternativa sustentável para o tratamento de efluentes têxteis (SANTOS et al., 2014; COSTA et al., 2016).

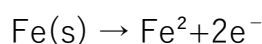


2.7 REAÇÕES DURANTE O PROCESSO

Durante o experimento realizado com o corante azul de metileno, foi aplicado o processo de eletrofloculação assistida por eletrólise, que envolve reações eletroquímicas com liberação de coagulantes metálicos *in situ*. Esse processo é uma alternativa eficiente e ecologicamente adequada para a remoção de contaminantes orgânicos e inorgânicos de efluentes industriais, em especial aqueles provenientes da indústria têxtil.

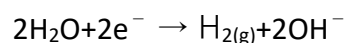
No sistema montado, utilizou-se duas barras metálicas conectadas a uma fonte de corrente contínua, submersas em uma solução contendo azul de metileno e sal (NaCl) diluídos em água. Ao aplicar corrente elétrica por 5 minutos, ocorreram simultaneamente reações de oxidação e redução nos eletrodos, promovendo a liberação de espécies químicas ativas responsáveis pela coagulação dos poluentes.

No ânodo (eletrodo positivo), houve a oxidação do ferro metálico (Fe⁰) presente na barra, liberando íons Fe²⁺ segundo a reação:

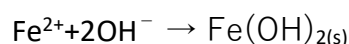


Essa reação é amplamente documentada na literatura como o principal mecanismo de geração de coagulantes metálicos no processo de eletrofloculação (FERREIRA; MOREIRA; LENZI, 2013; COSTA et al., 2016).

Simultaneamente, no cátodo (eletrodo negativo), ocorreu a redução da água, liberando gás hidrogênio (H₂) e íons hidroxila (OH⁻), de acordo com a seguinte reação:



A presença desses íons Fe²⁺ e OH⁻ no meio leva à formação de hidróxidos metálicos insolúveis, como o Fe(OH)₂, que atuam como coagulantes altamente eficientes:





Em ambientes ligeiramente aerados ou com pH mais alcalino, parte do Fe^{2+} pode ainda se oxidar a Fe^{3+} , formando $\text{Fe}(\text{OH})_3$, um dos agentes flocculantes mais comuns em processos de coagulação (SANTOS *et al.*, 2014; SILVA; LIMA; GUIMARÃES, 2016).

Esses hidróxidos metálicos, com alta superfície específica, promovem a adsorção e complexação de moléculas de azul de metileno, um corante catiônico de estrutura aromática estável. A interação ocorre principalmente por atração eletrostática e interações químicas superficiais entre os grupos funcionais do corante e os flocos formados (REIS; MAHFOUD, 2018).

Além disso, o hidrogênio gerado no cátodo forma microbolhas, que facilitam o transporte dos flocos para a superfície, processo este conhecido como flotação eletroquímica, contribuindo para a separação das partículas e para a remoção da cor (GONZÁLEZ *et al.*, 2020).

Segundo estudos recentes, o uso de eletrodos de ferro em soluções com azul de metileno pode alcançar até 98% de remoção de cor em condições otimizadas (densidade de corrente entre 70 a 250 A/m^2 e tempo ≥ 30 min) (SHARIFIFAR *et al.*, 2019). No presente experimento, o tempo curto (5 minutos) limita essa eficiência, mas os sinais visuais de floculação e decantação indicam que o processo se iniciou com sucesso.

3. MATERIAIS E REAGENTES

Destaca-se que para a realização do procedimento de tratamento de efluente empregou-se o uso dos corantes de azul de metileno, violeta de metila e uma solução de lignina, preparou-se então 3 soluções com a mesma concentração para as amostras de azul de metileno e violeta de metila. Fixou-se no recipiente da solução duas barras metálicas com uma fita isolante.

Posteriormente acrescentou-se uma quantidade de exatamente 10g de sal na solução com a finalidade de servir de ponte salina, permitindo assim a passagem



da corrente elétrica pelo meio, e se conectou os eletrodos metálicos a uma fonte geradora de corrente a uma voltagem de x volts, como visto na figura 4. O procedimento foi realizado ao longo de x minutos, coletando-se amostras de x em x minutos. Ressalta-se ainda que ao longo do processo foi possível notar a formação das bolhas de hidrogênio provenientes do processo de eletrofloculação.

Figura 4 – Preparação do processo de eletrofloculação e surgimento das bolhas de hidrogênio

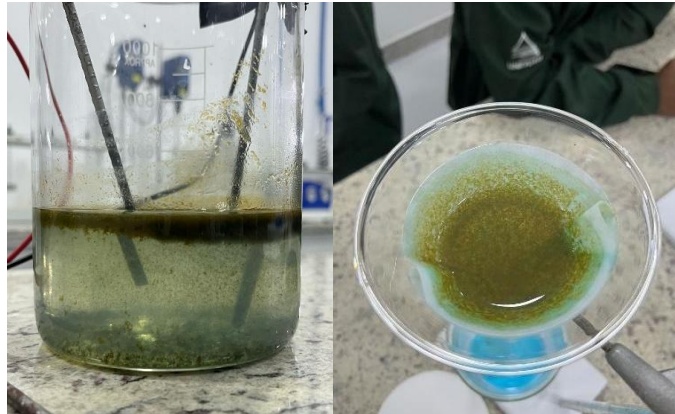


Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

Após a realização do experimento pode-se notar a formação de uma camada na superfície do efluente constituída das amostras de corante removida ao longo do procedimento e de íons de Fe que se soltaram das barras metálicas, com o auxílio de uma seringa realizou-se a coleta das amostras que foram posteriormente filtradas com o auxílio de um papel filtro, que foi devidamente trocado a cada filtração, evitando assim alguma possível contaminação das demais amostras com a “torta” residual formada no mesmo, conforme é demonstrado na Figura 5.



Figura 5 – Aspecto final após a eletrofloculação e processo de filtração



Fonte: Elaborado pelos autores (2025)

O mesmo processo foi realizado para as amostras de violeta de metila e da lignina, empregando os mesmos parâmetros de corrente e quantidade de sal. Posteriormente realizou-se a caracterização dos parâmetros de coloração, pH para as amostras analisadas visando analisar a eficiência da aplicação do processo de eletrofloculação para cada tipo de efluente analisado.

4. ANÁLISE DOS DADOS

Foram iniciadas as medições com o material filtrado após a adição de azul de metila, esse processo foi repetido 5 vezes (uma para cada etapa da filtração) como mostra tabela e fotos abaixo.

Tabela 1 – Medições

Medições De Cor da Mistura com Azul de Metila	
Frasco	Valor (mg/L)
1	0,116
2	0,103
5	0,086
4	0,1
5	0,068

Fonte: Autores.



Na etapa seguinte foram realizadas as medições com o material filtrado após a mistura com a lignina, esse processo foi repetido 6 vezes (uma para cada etapa da filtração) como mostra a tabela abaixo.

Tabela 2 - Medições

Medições De Cor da Mistura com Lignina	
Frasco	Valor (mg/L)
1	0,322
2	0,547
5	0,532
4	0,038
5	0,016
6	0,006

Fonte: Autores.

Na etapa seguinte foram realizadas as medições com o material filtrado após a mistura com a violeta de metileno, esse processo foi repetido 3 vezes (uma para cada etapa da filtração) como mostra a tabela abaixo.

Tabela 3 – Medições

Condutividade e PH das Soluções de Violeta de Metila		
Frasco	Condutividade(mS)	PH
1	19,76	5,88
2	24,8	6,45
5	25,9	5,85
4	Material Descartado	

Fonte: Autores.

Para as análises de condutividade e PH, o processo foi realizado para as 5 amostras filtradas após a adição de azul de metileno.



Tabela 4 - Medições

Condutividade e PH das Soluções de Azul de Metileno		
Frasco	Condutividade(mS)	PH
1	27,7	6,34
2	27,4	6,6
5	28,9	5,44
4	28	6,41
5	27,7	3,82

Fonte: Autores.

Seguindo as análises de condutividade e PH, o processo foi realizado para as 6 amostras filtradas após a adição de lignina.

Tabela 5 – Condutividade e PH

Condutividade e PH das Soluções de Lignina		
Frasco	Condutividade(mS)	PH
1	16,6	6,3
2	17	5,25
5	15,2	6,29
4	17,2	6,41
5	16,8	6,92
6	17,8	7,14

Fonte: Autores.

A análise experimental evidenciou alterações significativas nas características visuais e físico-químicas do efluente tratado. Observou-se redução perceptível da coloração azul intensa inicial, atribuída à adsorção do corante pelos flocos metálicos formados, bem como variação na turbidez, que aumentou durante a etapa de formação dos flocos e foi reduzida após os processos de decantação e filtração, confirmando a eficiência da coagulação-floculação.

O pH apresentou tendência de aumento, resultado da liberação de íons OH^- no cátodo durante a eletrólise, enquanto a condutividade elétrica, inicialmente



elevada pela presença de NaCl como eletrólito suporte, sofreu leve redução após a remoção parcial dos poluentes.

A presença das bolhas de hidrogênio, originadas pela redução da água no cátodo, contribuiu para o processo de flotação, melhorando a remoção dos flocos de corante (GONZÁLEZ et al., 2020). Embora a eficiência do processo ainda não tenha atingido os níveis máximos relatados na literatura — que chegam a mais de 95% de remoção em condições otimizadas (SHARIFIFAR et al., 2019) —, os resultados indicam que o método é promissor para o tratamento de efluentes contaminados com corantes sintéticos.

Neste contexto, mesmo não sendo realizada quantificação espectrofotométrica da remoção de cor, a análise qualitativa foi suficiente para comprovar a ocorrência da eletrofloculação, cuja eficiência reduzida pode ser associada ao tempo de tratamento empregado (5 min), inferior ao reportado na literatura (até 30 min, com remoções superiores a 95%).

Diante disso, esses resultados destacam a relevância do controle de variáveis operacionais, tais como tempo de eletrólise, densidade de corrente e pH, que exercem influência direta sobre a eficiência global do processo.

5. CONCLUSÃO

O processo de eletrofloculação assistida por eletrólise demonstrou ser eficaz na remoção parcial do corante azul de metileno em soluções aquosas, mesmo com um tempo curto de aplicação da corrente elétrica (5 minutos). A geração in situ de coagulantes metálicos, principalmente hidróxidos de ferro, promoveu a floculação e decantação dos sólidos suspensos, facilitando a separação dos poluentes presentes no efluente (FERREIRA; MOREIRA; LENZI, 2013; COSTA et al., 2016).

Para aumentar a eficiência do sistema, recomenda-se o controle rigoroso da densidade de corrente, do tempo de tratamento e do pH da solução, bem como o monitoramento detalhado por meio de análises físico-químicas (cor, turbidez, pH e



condutividade), essenciais para avaliar o desempenho real do tratamento (REIS; MAHFOUD, 2018; SILVA; LIMA; GUIMARÃES, 2016).

Portanto, a eletrofloculação surge como uma alternativa ambientalmente amigável e economicamente viável para o tratamento de águas residuais contendo corantes, podendo ser aplicada em escala laboratorial e industrial, desde que adequadamente otimizada.

REFERÊNCIAS

ANTUNES, E.C.E.S.; et al. Remoção de corante têxtil utilizando a casca do abacaxi como adsorvente natural. **Revista HOLOS**, ano 34 , volume 03

AQUINO NETO, Sidney de et al. Tratamento de resíduos de corante por eletrofloculação: um experimento para cursos de graduação em Química. **Química Nova**, São Paulo, v. 34, p. 1468–1471, maio 2011.

BELAN, A. L. D. **Eletrofloculação aplicada ao tratamento de efluentes têxteis**. Monografia de Especialização em Pós Graduação em Gestão Ambiental na Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Medianeira, Paraná, 2014

CARVALHO, D. L. **Estudo da melhor granulometria do cavaco para produção de celulose**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química. FATEB, Telêmaco Borba, PR, 2014

CARVALHO, Diéury de Lima; SOUZA, Marco Antonio Cardoso de; ZEMPULSKI, Denise Aparecida. Utilização do método eletrofloculação para tratamento de efluentes industriais. **Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades**, v. 3, n. 14, p. 14–28, ago. 2015.

COSTA, C. S. M. da; MATOS, C. R.; FIGUEIREDO, S. A. Eletrocoagulação aplicada no tratamento de efluentes têxteis sintéticos: estudo com corante azul de metileno. **Revista Virtual de Química**, v. 8, n. 2, p. 409-421, 2016. Disponível em: <https://www.abq.org.br/cbq/2014/trabalhos/5/5882-19185.html>. Acesso em: 10 ago. 2025.

FERREIRA, E. M.; MOREIRA, R. F. P. M.; LENZI, E. K. Eletrocoagulação no tratamento de efluentes: uma revisão. **Revista de Engenharia e Tecnologia**, v. 5, n. 1, p. 32-45, 2013.

GONZÁLEZ, F. J.; RINCÓN, J.; FERNÁNDEZ, E. *Electrocoagulation in wastewater treatment: an updated review*. **International Journal of Environmental Research**



and Public Health, v. 17, n. 19, p. 7206, 2020. DOI:
<https://doi.org/10.3390/ijerph17197206>.

JUNIOR, W.A.G.P.; AZEVEDO, F.R.P. Corantes sintéticos e seus impactos ambientais: desafios, legislação e inovações tecnológicas sustentáveis. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**. São Paulo, v. 10, n. 12, dez. 2024.

LIMA, E.A.; **Obtenção e caracterização de lignina kraft utilizando resíduos industriais**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental. UTFPR, Apucarana, PR.

REIS, T. A. dos; MAHFOUD, M. *Removal of methylene blue dye by electrocoagulation: review*. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 35, n. 2, p. 589-602, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/0104-6632.20180352s20160466>.

SANTOS, S. M.; MOURA, F. C. C.; PESSOA, R. N. **Eletrocoagulação de corantes catiônicos: uma abordagem experimental e econômica**. Congresso Brasileiro de Química – CBQ, 2014. Disponível em:
<https://www.abq.org.br/cbq/2014/trabalhos/5/5882-19185.html>. Acesso em: 10 ago. 2025.

SHARIFIFAR, M.; KHOSRAVI, R.; DANESHVAR, N. *Removal of methylene blue from aqueous solutions by electrocoagulation using iron electrodes*. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 7, n. 1, p. 102842, 2019. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.102842>.

SILVA, L. P. da; LIMA, J. M. de; GUIMARÃES, R. F. Poluição por corantes: impactos ambientais e técnicas de remoção. **Revista Científica da FASETE**, v. 12, n. 1, p. 25-34, 2016.

SILVA, M. A.; LIMA, D. S. Gestão e tratamento de efluentes na agricultura intensiva: uma abordagem sustentável. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, Mossoró, v. 15, n. 1, p. 112–119, 2020.

SOUZA, M.A.C. **Substituição da antraquinona por surfactante na polpação**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Química. FATEB, Telêmaco Borba, PR, 2014