



II-190 - APLICAÇÃO DE ENERGIA FOTOVOLTAICA NO TRATAMENTO DE CORANTE ALIMENTÍCIO VIA PROCESSO OXIDATIVO ELETROQUÍMICO

Fernanda Sobreira Silva⁽¹⁾

Engenheira Sanitarista e Ambiental pela Universidade Federal do Oeste da Bahia. Especialista em Sustentabilidade Urbana pelo Instituto Federal de Pernambuco. Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal de Pernambuco. Doutoranda em Engenharia Química pela Universidade Federal de Pernambuco.

Naiana Santos da Cruz Santana Neves⁽¹⁾

Engenheira Química pela Universidade Federal de Pernambuco. Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal de Pernambuco. Doutora em Engenharia Química pela Universidade Federal de Pernambuco.

Ingrid Larissa da Silva Santana⁽¹⁾

Engenheira Química pela Universidade Federal de Pernambuco. Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal de Pernambuco. Doutora em Engenharia Química pela Universidade Federal de Pernambuco.

Marina Gomes Silva⁽¹⁾

Engenheira Química pela Universidade Federal de Pernambuco. Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal de Pernambuco. Doutora em Engenharia Química pela Universidade Federal de Pernambuco.

Daniella Carla Napoleão⁽¹⁾

Engenheira Química pela Universidade Federal de Pernambuco. Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal de Pernambuco. Doutora em Engenharia Química pela Universidade Federal de Pernambuco. Professor Adjunta pela Universidade Federal de Pernambuco.

Endereço⁽¹⁾: Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal de Pernambuco, Av. dos Economistas, s/n – Cidade Universitária - Recife - PE - CEP: 50740-590 - Brasil - Tel: (81) 2126-8238 - e-mail: fernanda.sobreira@ufpe.br

RESUMO

Os corantes alimentícios estão presentes em diversos produtos e são as principais fontes de contaminação por poluentes coloridos, sendo prejudiciais ao meio ambiente no descarte incorreto. Em virtude disso, este estudo teve como objetivo possibilitar o tratamento do corante alimentício amarelo crepúsculo utilizando os processos oxidativos avançados eletroquímicos, empregando eletrodos de grafite e um aparato experimental para sistemas eletroquímicos com emprego de alimentação via painel fotovoltaico, sob diferentes parâmetros e eletrólitos. No que tange a escolha do eletrólito, o clorado evidenciou maior eficiência de degradação, com distância entre os eletrodos de 2 cm e sem agitação no sistema para 120 min de tempo de exposição. A degradação atingiu percentuais de 58,19%, 71,42% e 98,36% em 232, 312 e 483 nm, respectivamente, para um volume de 500 mL. O monitoramento cinético reacional segue um modelo de pseudo primeira ordem para os 3 λ característicos, o modelo proposto pelo estudo de Nichela et al. (2010) demonstrou melhor adequação aos dados experimentais. Notadamente, a combinação dos processos oxidativos avançados eletroquímicos e energia fotovoltaica promoveram resultados satisfatórios, evidenciando a sustentabilidade do tratamento aliado aos princípios da energia renovável e ecologicamente correto ao tratamento de efluentes industriais.

PALAVRAS-CHAVE: Amarelo Crepúsculo, Corantes alimentícios, Energia fotovoltaica, Processos Oxidativos Avançados.

INTRODUÇÃO

O crescimento populacional atrelado ao desenvolvimento tecnológico propicia o aumento na produção de efluentes domésticos, hospitalares e industriais, que contêm diversas substâncias tóxicas para os mananciais. Nesse contexto, os corantes alimentícios constituem uma classe desses contaminantes complexos que, embora



estejam presentes em diversos produtos alimentícios e farmacêuticos, são prejudiciais ao meio ambiente quando descartados inadequadamente [1].

Dada a recalcitrância desses compostos orgânicos, os tratamentos alternativos de efluentes, como os processos oxidativos avançados (POA), são empregados a fim de converter as moléculas de estruturas complexas em CO_2 e H_2O ao final da completa degradação [2]. Ademais, esses processos podem ocorrer com a adição de oxidantes e catalisadores, como H_2O_2 e FeSO_4 , ou com formação de radicais ativos in situ, como ocorre em sistemas eletroquímicos [3].

Os processos oxidativos eletroquímicos (POAE) destacam-se pelo uso de tensão elétrica e eletrodos específicos para realizar a degradação de contaminantes, fazendo com que sejam tidos como economicamente viáveis [4]. Além disso, a possibilidade de utilizar eletrodos de grafite e outros metais com resultados efetivos para a degradação de diferentes tipos de contaminantes permite reduzir os custos associados a este tipo de técnica [5].

Para garantir a condutividade necessária para o fluxo de elétrons no sistema eletroquímico, diferentes eletrólitos podem ser utilizados. Os mais utilizados na literatura são NaCl , KCl e Na_2SO_4 [6, 7]. Com isso, a depender dos eletrodos empregados diferentes radicais ativos, como hidroxila e cloro livre, podem ser gerados no sistema. Deste modo, o acompanhamento de radicais associado a degradação ao longo do tempo reacional pode demonstrar de que modo está ocorrendo a degradação dos contaminantes no sistema.

De modo a aumentar ainda mais a viabilidade econômica deste tipo de sistema, pode-se substituir a alimentação convencional de energia elétrica que é indispensável para geração de radicais, pelo uso de energia elétrica gerada pelo painel solar. Esta é uma fonte sustentável que atua possibilitando o aproveitamento de recursos renováveis, podendo ser empregada no tratamento de efluentes. Associado a isso, o uso de equipamentos que armazenem a energia elétrica gerada permite ainda um uso mais independente do sistema.

O objetivo do presente trabalho foi avaliar a eficiência dos processos oxidativos avançados eletroquímicos no tratamento de corante alimentício amarelo crepúsculo (AC). Para isso, utilizou-se eletrodos de grafite e um aparato experimental para sistemas eletroquímicos com emprego de alimentação via painel fotovoltaico, sob diferentes parâmetros e eletrólitos.

MATERIAIS E MÉTODOS

A estrutura química do corante AC empregado no presente estudo está apresentada na Figura 1 (F. Trajano). Apesar desse contaminante ser amplamente utilizado em bebidas, doces e em outros alimentos processados, ele pode desenvolver alergias, asma e apresentar efeitos carcinogênicos e genotóxicos [1, 8].

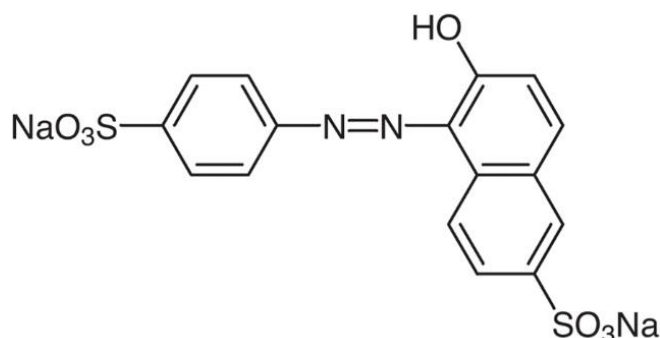


Figura 1: Estrutura química do corante amarelo crepúsculo.

Os ensaios de degradação ocorreram para solução aquosa a uma concentração inicial de $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ a partir de uma solução estoque a $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ do corante. Foram determinados os comprimentos de onda (λ) característicos do corante AC através de varredura espectral de 190 a 800 nm, utilizando espectrofotômetro de

ultravioleta/visível (UV/Vis) (Metash UV-5100). Para cada λ identificado foi construída uma curva analítica com faixa linear de trabalho de 2 a 20 mg·L⁻¹.

A fase inicial dos estudos sobre a determinação das condições operacionais dos processos oxidativos avançados eletroquímicos (POAE) para o corante em questão fazendo uso de sistema fotovoltaico de alimentação. Para isso, testes preliminares que foram conduzidos para investigar os parâmetros operacionais do POAE. Inicialmente, utilizou-se par de eletrodos de grafite para avaliação da eficiência de degradação do corante AC a 2 cm de distância. Sendo assim, avaliou-se como eletrólitos no sistema o NaCl e Na₂SO₄ a 0,05 mol·L⁻¹. Após a identificação do eletrólito de melhor degradação findado os 60 min experimentais, variou-se a concentração do eletrólito para 0,025 e 0,075 mol·L⁻¹. Obtido o melhor percentual de degradação, a distância entre os eletrodos (1, 2 e 3 cm), a presença de agitação (IKA, KS 130 control) também foi avaliada (0, 100 e 200 rpm) seguido da variação do volume experimental juntamente com a imersão do eletrodo para tratamento.

Após verificação das melhores condições foi realizado o monitoramento cinético dos dados experimentais para tratamento eletroquímico do corante amarelo crepúsculo. Para tal, as alíquotas foram coletadas em intervalos de tempo (0, 2, 5, 7, 10, 15, 20, 30, 45, 60, 90 e 120 min) determinados previamente e quantificadas em seguida. Os modelos cinéticos propostos por [9] e [10] foram utilizados para avaliar os dados experimentais com auxílio do software *Origin 8.0*.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

O sistema fotovoltaico de alimentação energética foi montado conforme descrito por [11]. Com o sistema montado, foi investigado a eficiência de degradação frente aos eletrólitos NaCl e Na₂SO₄ (Figura 2 (a)). Após definir o melhor eletrólito, estudou-se o percentual de degradação para diferentes concentrações do sal (Figura 2 (b)).

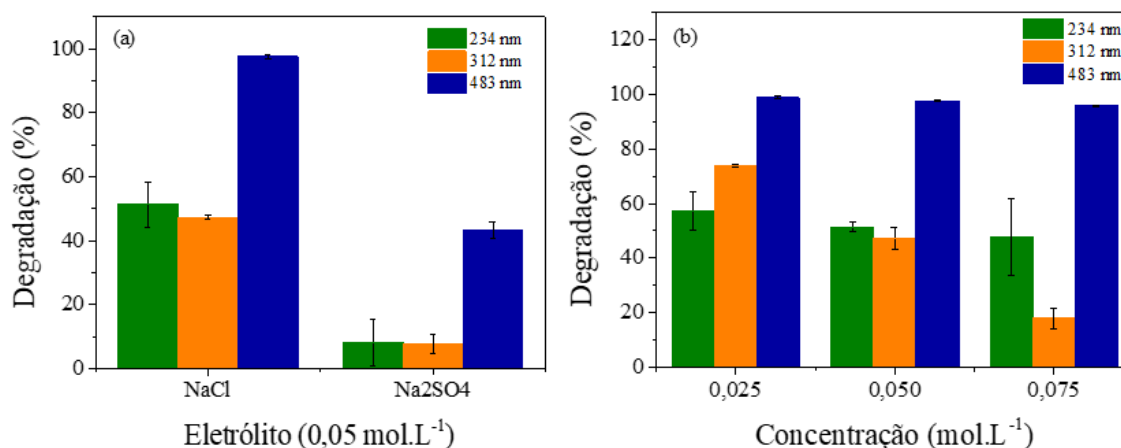


Figura 2: (a) Ensaio para o tipo de eletrólito empregado na degradação do corante amarelo crepúsculo ambos a 0,050 mol·L⁻¹; (b) Estudo da concentração para o eletrólito de maior eficiência.

A partir da Figura 2 (a), observa-se que o eletrólito clorado promoveu maiores percentuais de degradação iguais a 51,25; 47,30 e 97,58% para 234, 312 e 483 nm, respectivamente. Ao analisar a Figura 2 (b) é possível notar que a redução da concentração do eletrólito favoreceu o aumento da eficiência. Diante disso, o eletrólito NaCl a 0,025 mol·L⁻¹ foi selecionado para prosseguir os estudos.

O uso de sistema fotovoltaico *off-grid* como alimentação energética fornece a possibilidade de uso de sistemas sustentáveis aos tratamentos de contaminantes. A investigação da eficiência do tratamento do corante AC frente aos eletrólitos NaCl e Na₂SO₄, apresentada na Figura 2 (a), demonstrou que o eletrólito clorado promoveu maior percentual de degradação do corante. Além disso, a redução da concentração do eletrólito



(Figura 2 (b)) favoreceu a eficiência do processo. Isto porque, a presença de íons cloro no sistema favorece a formação de subprodutos reacionais como OCl^- , que também podem atuar no processo de descoloração de corantes [12]. Definido o eletrólito e a sua concentração, foi avaliada a eficiência do processo em relação a distância entre os eletrodos e a utilização da agitação.

Posteriormente, foi avaliada a distância entre os eletrodos e a utilização de agitação. Os dados obtidos estão dispostos na Figura 3 (a) e (b).

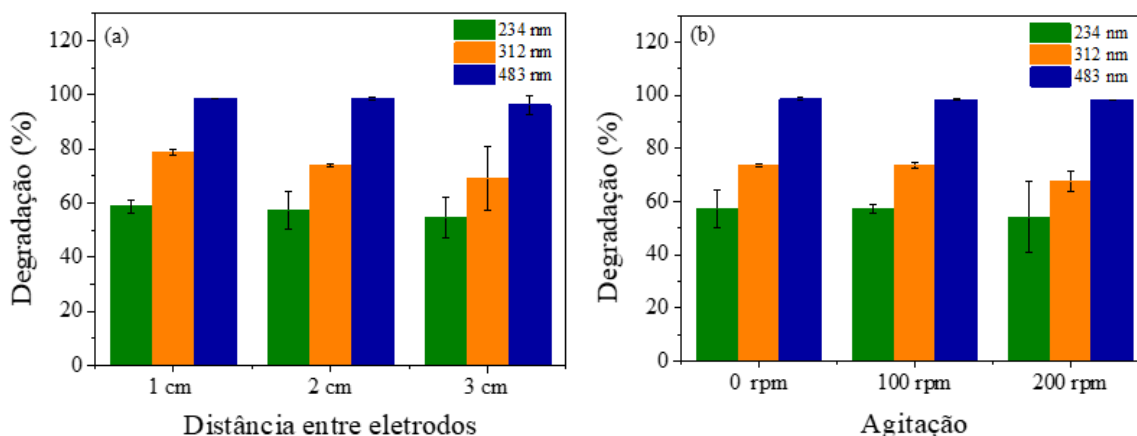


Figura 3: (a) Estudo da distância entre os eletrodos; (b) Ensaios de agitação do sistema eletroquímico empregado.

Diante da Figura 3 (a), nota-se que não houve variação percentual significativa para os 3 λ . Desse modo, adotou-se a distância intermediária de 2 cm.

Os resultados obtidos para o estudo de distância entre eletrodos (Figura 3 (a)) não apresentaram diferença percentual significativa. Diante disso, foi adotada a distância de 2 cm com intuito de garantir o fluxo de íons entre eletrodos e o meio reacional. Em seguida, foi verificado o estudo sobre o uso da agitação (Figura 3 (b)), o qual também não apresentou diferença percentual significativa. Desse modo, seguiu-se os ensaios sem a utilização da agitação, visto que é uma condição que aumenta o consumo energético.

Ao avaliar a Figura 4 (b), também se observa que não houve diferença percentual significativa. Logo, os ensaios de avaliação de volume (Tabela 1) foram realizados sem o uso da agitação.

Tabela 1: Eficiência de degradação do tratamento eletroquímico relacionando altura da solução aquosa do corante amarelo crepúsculo e altura do eletrodo imerso.

Volume (mL)	Relação Altura líquido (cm) / Imersão eletrodo (cm)	% de degradação em cada comprimento de onda (nm)		
		234	312	483
100	3,50	57,3078	73,6877	98,6637
250	3,75	53,1127	71,0213	98,4432
500	4,00	58,1924	71,4174	98,3639
750	3,17	52,6301	68,1136	86,7074
1000	3,83	52,2353	64,7132	86,4904

Ao avaliar a Tabela 1, infere-se que, especialmente, para o $\lambda = 483$ nm, a partir de 750 mL, o aumento do volume de solução de tratamento apresentou redução no percentual de degradação. Desse modo, o acompanhamento da cinética de degradação foi realizado a partir de 500 mL de solução do AC.

Após definir as condições operacionais, foi verificado o desempenho do processo frente a variação de volume. Ao avaliar os resultados dispostos na Tabela 1, observar-se que a partir de 750 mL o aumento do volume de solução trabalho apresentou redução no percentual de degradação acima de 10%. Tal fato pode ocorrer devido a redução da transferência de massa entre os íons oxidantes gerados, reduzindo, portanto, a eficiência do tratamento do composto orgânico em questão com o aumento do volume de operação. Diante disso, o acompanhamento cinético foi realizado utilizando 500 mL de solução durante 120 min.

Após determinar as condições operacionais de tratamento foi realizado o estudo cinético durante 120 min, conforme a Figura 4.

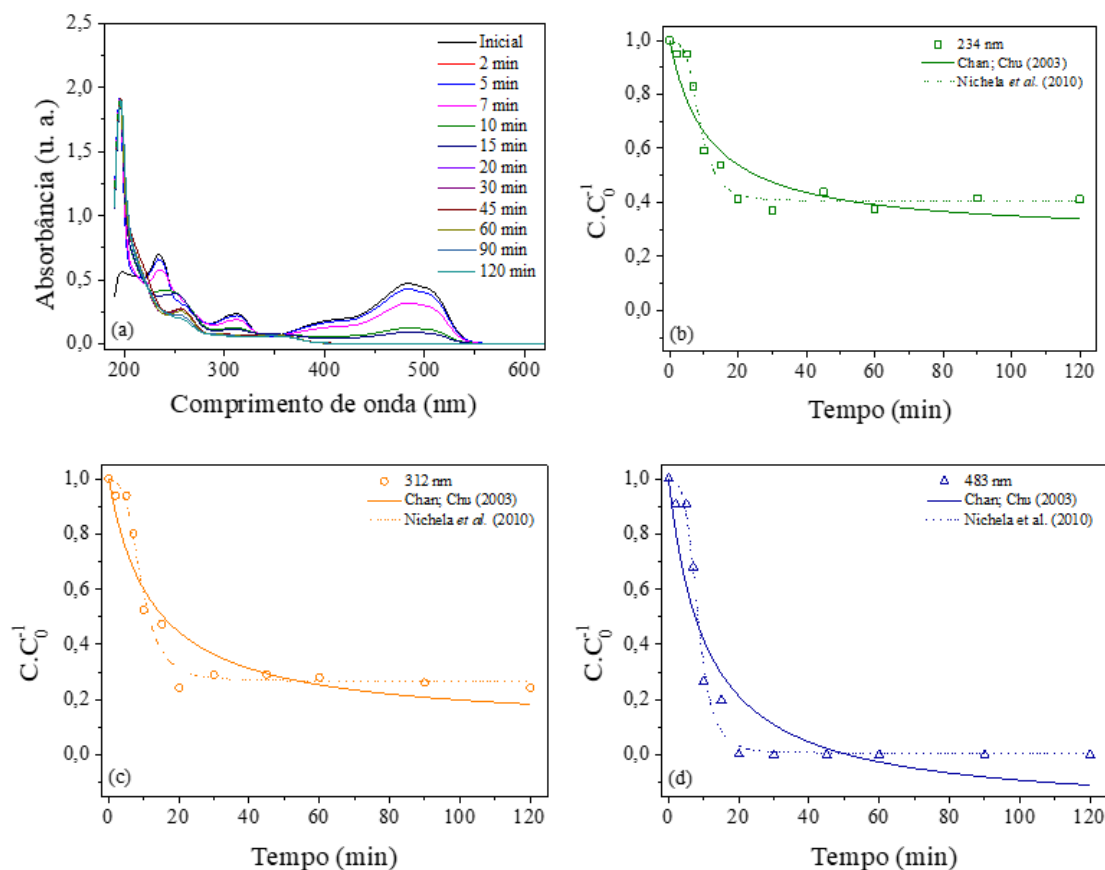


Figura 4: (a) Varredura espectral da cinética de degradação. Avaliação cinética da degradação do corante amarelo crepúsculo para os modelos cinéticos Chan; Chu (2003) e Nichela et al. (2010) para: (b) 234 nm, (c) 483 nm, e (d) 624 nm. Condições operacionais: $[C_0] = 10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ cada, $V = 500 \text{ mL}$, $t = 120 \text{ min}$, $p = 1 \text{ atm}$, $T = 35 \pm 1^\circ\text{C}$.

A Figura 4 (a) apresenta a redução da intensidade das absorvâncias especificamente nas regiões dos λ estudados. Nas Figuras 4(b), 4(c) e 4(d), os percentuais de degradação foram 58,84; 75,70 e 100 % para o 234, 312 e 483 nm, respectivamente. Para o $\lambda = 483$ nm, observa-se degradação completa a partir dos 45 min.

Diante da Figura 4, nota-se que os perfis de degradação foram semelhantes para os λ avaliados. Além disso, tem-se que a degradação do contaminante ocorre mais rapidamente nos 20 min, para todos os λ , atingindo o



equilíbrio é atingido em 60 min. Além disso, os dados obtidos do ajuste cinético referente aos modelos de [9] e [10] (Tabela 2), corroboram com o perfil cinético obtido nas Figuras 4(b), 4(c) e 4(d).

Os dados do ajuste cinético referente aos modelos de [9] e [10] estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros cinéticos relativos à degradação do corante AC via oxidação eletroquímica. Condições operacionais: $[C_0] = 10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ cada, $V = 500 \text{ mL}$, $t = 120 \text{ min}$, $p = 1 \text{ atm}$, $T = 35 \pm 1^\circ\text{C}$.

Modelos	Parâmetro	Comprimento de onda (nm)		
		234	312	483
Chan; Chu (2003)	R^2	0,8614	0,8753	0,8685
	ρ (min)	15,7475 \pm 1,5138	1,1093 \pm 0,0115	0,8271 \pm 0,0832
	σ	1,3815 \pm 0,0147	13,8586 \pm 0,3724	8,8656 \pm 0,2463
Nichela <i>et al.</i> (2010)	R^2	0,9762	0,9720	0,9827
	a (min^{-1})	0,0330 \pm 0,0015	0,0040 \pm 0,0002	0,0074 \pm 0,0002
	b (min)	9,0194 \pm 0,1414	9,4548 \pm 0,1835	8,6044 \pm 0,1028
	c	3,7984 \pm 0,1006	3,4655 \pm 0,0942	4,1601 \pm 0,0992
	d	0,4052 \pm 0,0177	0,2675 \pm 0,0025	0,0070 \pm 0,0002

Diante da Tabela 2, verificou-se que para o modelo proposto por [10] obteve-se um valor de $R^2 \geq 0,9720$, para os 3 λ . Este comportamento foi semelhante ao obtido para os corantes amarelo ácido 36 e azul ácido 80 utilizados em indústria de sanitizantes via degradação eletroquímica [13].

CONCLUSÕES

Os ensaios de degradação do sistema eletroquímico conduzido utilizando alimentação energética fotovoltaica, barras de grafite e utilizando NaCl e Na₂SO₄, demonstraram que o eletrólito clorado evidenciou maior eficiência de degradação. Com isso, foi possível a otimização das condições operacionais ($[\text{NaCl}] = 0,025 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, distância entre os eletrodos de 2 cm e sem agitação no sistema) e realização de estudos cinéticos em 500 mL de solução do corante AC de acordo com estudo de volume do sistema.

Observou-se com o acompanhamento da evolução cinética que independente do comprimento de onda avaliado, a cinética reacional segue um modelo de pseudo primeira ordem para os 3 λ característicos. Sendo assim, o modelo proposto por [10] demonstrou melhor adequação aos dados experimentais.

Desse modo, evidenciou-se a eficiência da oxidação eletroquímica na degradação do corante alimentício AC. Por fim, pode-se afirmar que o uso de alimentação fotovoltaica possibilita uso de técnica sustentável no tratamento de contaminantes orgânicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. KAYA, S. I.; CETINKAYA, A.; OZKAN, S. A. Latest advances on the nanomaterials- based electrochemical analysis of azo toxic dyes Sunset Yellow and Tartrazine in food samples. Food and Chemical Toxicology, v. 156, n. August, p. 112524, 2021.
2. PRIYADARSHINI, M. et al. Advanced oxidation processes: Performance, advantages, and scale-up of emerging technologies. Journal of Environmental Management, v. 316, n. May, p. 115295, 2022.
3. LEBRON, Y. A. R. et al. Integrated photo-Fenton and membrane-based techniques for textile effluent reclamation. Separation and Purification Technology, v. 272, n. May, p. 118932, 2021.
4. BELAL, R. M.; ZAYED, M. A.; EL-SHERIF, R. M.; GRANY, N. A. A. Advanced electrochemical degradation of basic yellow 28 textile dye using IrO₂/Ti meshed electrode in different supporting electrolytes. Journal of Electroanalytical Chemistry, v. 882, p. 114979, 2021.
5. QU, C.; LIANG, D. W. Novel electrochemical advanced oxidation processes with H₂O₂ generation cathode for water treatment: A review. Journal of Environmental Chemical Engineering, v. 10, n. 3, p. 107896, 2022.



6. MURRIETA, M. F. et al. Mineralization of Acid Red 1 azo dye by solar photoelectro-Fenton-like process using electrogenerated HClO and photogenerated Fe(II). *Chemosphere*, v. 246, p. 1–9, 2020.
7. MA, Q.; YAN, C.; LV, W.; MEI, Y.; PENG, H.; DU, J.; ZHENG, B.; GUO, Y. Coexisting Chloride Ion for Boosting the Photoelectrocatalytic Degradation Efficiency of Organic Dyes. *Catalysis Letters*, v. 153, n. 2, p. 378–387, 2023.
8. TAJIK, S.; BEITOLLAHI, H. Hydrothermal synthesis of CuFe₂O₄ nanoparticles for highly sensitive electrochemical detection of sunset yellow. *Food and Chemical Toxicology*, v. 165, p. 113048, 2022.
9. CHAN, K. H.; CHU, W. Modeling the reaction kinetics of Fenton's process on the removal of atrazine. *Chemosphere*, v. 51, n. 4, p. 305–311, 2003.
10. NICHELA, D. et al. Degradation kinetics of hydroxy and hydroxynitro derivatives of benzoic acid by fenton-like and photo-fenton techniques: A comparative study. *Applied Catalysis B: Environmental*, v. 98, n. 3–4, p. 171–179, 2010.
11. NEVES, N. S. C. S. et al. Application of renewable energy in sanitizer industry wastewater treatment through combined photo-Fenton and electro-Fenton processes. *Catalysis Communications*, p. 106828, 2024.
12. KOTHARI, M. S.; SHAH, K. A. Electrochemical oxidation for decolorization of Rhodamine-B dye using mixed metal oxide electrode: Modeling and optimization. *Water Science and Technology*, v. 81, n. 4, p. 720–731, 2020.
13. NEVES, N. S. C. S. et al. Optimization of Photo-electrochemical Treatments for the Degradation of Complex Organic Compounds and Prediction of Degradation via Artificial Neural Networks. *Water, Air, and Soil Pollution*, v. 234, n. 1, p. 1–14, 2023.