ISSN: 2358-8829

FOTODEGRADAÇÃO DE AZUL DE METILENO POR ÓXIDO DE ZINCO (ZnO) SOB RADIAÇÃO UV

Rodrigo Dias da Silva [1]
Emanuel Elias Maia Feitosa [2]
Deoclécio Ferreira de Brito [3]
Luzia Maria Castro Honório [4]

INTRODUÇÃO

Mundialmente, estima-se que mais de 100 mil corantes sintéticos são comercialmente empregados em indústrias têxteis, cosméticos, papéis, farmacêuticas e outras, correspondendo a uma produção anual de mais de 7×10^5 toneladas e gerando riscos de contaminação ambiental (Bora et al. 2026; Rao et al. 2026). Dentre os inúmeros poluentes, os corantes são considerados vilões das águas, pois não são facilmente destruídos diante dos tratamentos convencionais, exigindo o desenvolvimento de tecnologias remediadoras capazes de mineralizar estes compostos considerados não-biodegradáveis (Dutta et al. 2024; Bora et al. 2026). Além de causarem poluição visual e prejuízos à biota aquática, representam riscos à saúde pública, em função de sua toxicidade, efeitos carcinogênicos e mutagênicos (Dutta et al. 2024).

Por definição, os corantes sintéticos são substâncias de estrutura complexa que apresentam cores, podendo ser obtidas de forma natural ou sintética (Khan et al. 2024; Katheresan et al. 2018). Estruturalmente uma molécula de corante é composta por dois grupos principais: o cromóforo (azo, antraquinona, nitro, carbonila) e os auxocromo (amina, carboxila, sulfonato). O primeiro é responsável pela cor e absorção de luz, e o segundo responsável pela fixação e afinidade nas fibras dos materiais (Zanoni; Yamanaka, 2016; Shishir et al. 2025).

Entre os corantes, o azul de metileno também conhecido como cloreto de tetrametiltionina é um corante catiônico que apresenta estrutura aromática heterocíclica e

[1]Graduando do curso de Bacharelado em Química da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, Bolsista do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica, rodrigo956421@gmail.com;
[2]Graduando do curso de Bacharelado em Química da Universidade Federal da Paraíba - UFPB, elijahelias221b@gmail.com;
[3]Professor colaborador: Doutor, Universidade Estadual da Paraíba - UEPB, deocleciofb@servidor.uepb.edu.br;
[4]Professora orientadora do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica: Doutora, Universidade Federal da Paraíba - UFPB, luzia.honorio@cca.ufpb.br.

fórmula estrutural $C_{16}H_{18}ClN_3S.XH_2O$ (Lobo, 2016; Zuhaela et al, 2021). É amplamente usado como corante modelo em estudos de fotocatálise devido à sua estabilidade química e facilidade de detecção em $\lambda = 664$ nm (Zuhaela et al, 2021; Sahu, e Das, 2026).

Frente às implicações ambientais atuais, os processos oxidativos avançados (POAs) têm se mostrado eficientes na destruição dos corantes em sistemas aquosos, sendo à fotocatálise heterogênea um tipo de POA, eficaz no processo de descontaminação (Rocha et al. 2022; Aina et al. 2025; Thennarasu et al. 2025; Rao et al. 2026). Seu mecanismo acontece quando um material semicondutor/fotocatalisador, ao ser exposto à luz apropriada, gera a formação de pares de elétrons/buracos que interagem com o meio reacional, impulsionando em reações de oxirredução (Equação 1) capazes de promover a degradar diversas classes de contaminantes (Rocha et al. 2022; Yang e Wang, 2018).

$$\text{Semicondutor} + h\nu \rightarrow e^- + h^+ \quad \textbf{(1)}$$
$$h^+ + H_2O \rightarrow {}^{\bullet}OH + H^+ \quad \textbf{(2)}$$
$$h^+ + OH^- \rightarrow {}^{\bullet}OH + H^+ \quad \textbf{(3)}$$
$$h^+ + \text{Poluente} \rightarrow (\text{Poluente})^+ \quad \textbf{(4)}$$
$$e^- + O_2 \rightarrow O_2^{\bullet-} \quad \textbf{(5)}$$
$$O_2^{\bullet-} + H^+ \rightarrow HO_2^{\bullet} \quad \textbf{(6)}$$
$$HO_2^{\bullet} \rightarrow O_2 + H_2O_2 \quad \textbf{(7)}$$
$$H_2O_2 + O_2^{\bullet-} \rightarrow {}^{\bullet}OH + OH^- + O_2 \quad \textbf{(8)}$$
$$H_2O_2 + h\nu \rightarrow 2{}^{\bullet}OH \quad \textbf{(9)}$$
$$\text{Poluente} + ({}^{\bullet}OH,\ h^+,\ HO_2^{\bullet} \text{ ou } O_2^{-}) \rightarrow \text{Poluente Degradado}$$

Para Batra et al. (2022), o princípio da fotocatálise as seguintes etapas de absorção de luz para gerar pares de elétrons/buracos (e^-/h^+), separação dos portadores de carga, transferência dos portadores para a superfície do semicondutor e utilização das cargas superficiais em reações oxi-redox. Já Nath e colaboradores (2016) descrevem a tecnologia fotocatalítica por termos fotoquímicos, envolvendo a catálise e as etapas de fotoindução, fotoativação e fotoexcitação de uma molécula a ser absorvida (Nath et al. 2016).

Impulsionado pelo crescente interesse na degradação de corantes, o levantamento a seguir mostra o aumento expressivo de publicações em diversas áreas que exploram o uso do ZnO e suas aplicações ambientais. A pesquisa foi feita pela base de dados *Science Direct* (pesquisa avançada) e avaliados os anos entre 2020 a 2025, considerando artigos que continham em seus títulos e/ou palavras-chave "*ZnO and methylene blue and*

degradation". Foram encontrados 16.111 artigos, os quais envolvem revisões (4.326), pesquisas (9.387), capítulos de livros (1.400), resumos de conferências (18) e outros. Do ponto de vista fotocatalítico, a literatura aborda diversas estratégias estruturais a partir da dopagem com íons metálicos, deposição, incorporação, heterojunções e modificações de superfície.

No campo ambiental, o óxido de zinco (ZnO) é promissor na degradação de corantes, apresentando aspectos importantes, como o baixo custo, não toxicidade e propriedades ópticas (Freitas et al. 2022; Osajima et al. 2023; Sá et al. 2021; Rao et al. 2026). Além disso, trata-se de um semicondutor com band gap em torno de 3.37 eV e sua fase cristalina mais comum do ZnO é a estrutura de wurtzita (hexagonal) em temperatura ambiente (Baig et al. 2025; Freitas et al. 2022).

Pantoja-Espinoza et al. (2025) avaliaram nanocompósitos gC_3N_4/ZnO aplicados na degradação do azul de metileno (MB). Os dados experimentais mostraram que gC_3N_4/ZnO atingiu cerca de 85% de degradação após 100 min sob luz visível. Ainda foram avaliados testes de reutilização e estabilidade do material, comprovando boa estabilidade. Os dados experimentais mostraram que gC_3N_4/ZnO atingiu cerca de 85% de degradação após 100 min sob luz visível. Ainda foram avaliados testes de reutilização e estabilidade do material, comprovando boa estabilidade.

Em outro estudo, foi avaliada a eficiência fotocatalítica de nanopartículas de ZnO na degradação do corante azul de metileno sob exposição à luz visível. Os experimentos revelaram que o material atingiu eficiência de degradação de 94,5% em 90 minutos sob luz intensa. Para os autores, o desempenho foi atribuído ao pequeno tamanho das nanopartículas, ao bandgap (3.1 eV) e à baixa taxa de recombinação entre elétron-lacuna, facilitando a geração e utilização eficaz de radicais oxidativos (Mohamed et al. 2025).

Portanto, sabendo do potencial fotocatalítico deste composto, objetivamos avaliar a degradação do azul de metileno frente a utilização de ZnO puro comercial sob irradiação luminosa no intuito de tratar efluentes aquáticos proveniente de atividades residuais.

METODOLOGIA

Os ensaios fotocatalíticos foram conduzidos utilizando óxido de zinco (ZnO) comercial adquirido pela marca Synth - modelo P.A. Os reagentes, equipamentos e fabricantes utilizados no estudo são aqui apresentados: azul de metileno (Dinâmica

Química Contemporânea LTDA), balança analítica (Marte), agitador/aquecedor (Even), centrífuga (Famen), Estufa (Ethik Technology) e Espectrofotômetro UV-Vis (Thermo Scientific).

Para as medidas de ensaios fotocatalíticos foi confeccionada uma caixa de irradiação de material MDF com dimensões 50 x 50 x 50 cm^3, contendo uma lâmpada da marca Ourolux tipo mista com potência de 160W posicionada na parte superior, com orifícios nas laterais para acesso de facilitar a retirada de alíquotas através do uso de mangueira e seringa. Os testes foram conduzidos em um reator de borossilicato com capacidade para 250 mL, mantido sob agitação constante. A cada 15 minutos, ao longo de um período de 90 minutos, foram retiradas alíquotas de 7 mL de amostra, as quais foram centrifugadas e analisadas em espectrofotômetro UV-Vis. Inicialmente, realizaram-se ensaios preliminares para determinar a dosagem adequada do fotocatalisador. Definida a concentração ideal de 0,25 g/L, fixou-se a massa de 0,05 g de ZnO para o volume reacional de 200 mL adotado nos testes subsequentes. Para avaliar a influência da concentração inicial do corante no processo de degradação, foram avaliadas soluções nas concentrações de 5 ppm, 10 ppm e 15 ppm a partir de uma solução estoque de 100 ppm.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Química Analítica da Universidade Federal da Paraíba - Campus II. O percentual de fotodegradação foi calculado usando a Equação 2:

$$\text{Fotodegradação (\%)} = (Ci - Cf)/Ci)*100 \qquad \text{(Equação 2)}$$

Em que: Ci = concentração inicial do corante ; Cf = concentração final do corante

Além dos ensaios fotocatalíticos, foram também avaliados os processos de fotólise e adsorção. Todos os processos foram testados nas mesmas condições experimentais descritas com a finalidade de comparar a influência de cada parâmetro e suas interações.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A eficiência fotocatalítica do ZnO (0,25 g/L) na degradação do azul de metileno foi monitorada por espectrofotometria no UV-Vis (λ = 664 nm) ao longo de 90 minutos de

irradiação. A partir do monitoramento espectral, determinaram-se as curvas e os percentuais de degradação ao longo do tempo reacional para as concentrações de 5 ppm, 10 ppm e 15 ppm. De acordo com os dados, os ensaios experimentais apresentaram ótimos resultados do ponto de vista fotocatalítico para o corante avaliado, confirmando o papel estratégico do ZnO para aplicações ambientais.

Os percentuais de degradação alcançados ao final de 90 min para as concentrações de 5, 10 e 15 ppm foram de 100%, 94% e 90% respectivamente. Sabendo-se que a concentração do poluente é um parâmetro importante no tratamento de águas residuais, observou-se que o aumento na concentração inicial do corante resultou em uma discreta diminuição da taxa de eficiência. Essa relação pode ser explicada pela adsorção na superfície de ZnO (saturação dos sítios ativos), isto é, enquanto um número menor de fótons fica disponível para atingir a superfície do fotocatalisador (efeito de blindagem), menos espécies reativas de oxigênio são formadas, dificultando o processo e consequentemente a degradação do corante em água (Rauf et al. 2009; Rauf et al.2011).

Quanto aos dados do processo fotolítico (sem a presença de ZnO), uma baixa eficiência de degradação foi encontrada (8%), indicando que a irradiação isolada não é suficiente para promover a degradação significativa do corante nas mesmas condições analisadas (Umukoro et al., 2025). No teste de adsorção (no escuro) verificou-se ausência uma redução significativa em relação à fotocatálise, na qual pode ser atribuída por apenas adsorção física/adsorção superficial junto as etapas de adsorção dessorção e também pela interação entre o contaminante e a natureza semicondutora do ZnO (Massaroli, 2019).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A atividade fotocatalítica de ZnO comercial foi determinada utilizando o corante orgânico azul de metileno. Os resultados mostraram que o ZnO é mais eficiente em menores concentrações do corante, sendo degradado em 100% em 90 minutos pelo ZnO (5 ppm), 94 % em ZnO (10 ppm) e 90 % em ZnO (15 ppm). Apesar da pequena variação percentual catalítica, foi observada uma cinética elevada nos primeiros tempos de reação na concentração de 5 ppm. Esse comportamento pode ser explicado pela adsorção entre as moléculas do corante e as espécies reativas de oxigênio (como os radicais •OH) geradas na superfície do ZnO, resultando em maior taxa de remoção. Assim, ZnO ganha atenção

especial por ser empregado ser empregado como fotocatalisador eficiente na degradação de corantes orgânicos tóxicos.

AGRADECIMENTOS: À Universidade Federal da Paraíba (UFPB), ao Centro de Ciências Agrárias (CCA) e ao Departamento de Química e Física (DQF) pelo suporte institucional e infraestrutura, bem como à Universidade Estadual da Paraíba (UEPB) pela parceria firmada para a execução desta pesquisa. O presente trabalho também foi realizado com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), por meio da concessão de bolsa de Iniciação Científica.

REFERÊNCIAS

Aina, A. R. N.; Patel, H.; Aich, S.; Roy, B.; Samanta, N. S.; Pal, B. **Recent advances in ZnO based photocatalysts for industrial dye degradation.** Discover Applied Sciences, v. 7, n. 9, p. 977, 2025. 11 out. 2026.

Baig, A., Siddique, M., Panchal, S. **A review of visible-light-active zinc oxide photocatalysts for environmental application**. Catalysts, v. 15, n. 2, p. 100, 2025. 16 out. 2026. 11 out. 2026.

Batra, V.; Kaur, I.; Pathania, D.; Chaudhary, V. **Efficient dye degradation strategies using green synthesized ZnO-based nanoplatforms: a review.** Applied Surface Science Advances, v. 11, p. 100314, 2022. 11 out. 2026.

Bora, N., Joshi, D. P., Sharma, R. **Contamination toxicity and remediation of stable dyes and oils in aquatic wastewater systems.** Discover Environment, v. 4, n. 1, p. 166, 2026. 11 out. 2026.

Dutta, S., Adhikary, S., Bhattacharya, S., Roy, D., Chatterjee, S., Chakraborty, A., Rajak, P Contamination of textile dyes in aquatic environment: **Adverse impacts on aquatic ecosystem and human health, and its management using bioremediation.** Journal of Environmental Management, v. 353, p. 120103, 2024. 11 out. 2026.

Freitas, W. A.; Soares, B. E.; Rodrigues, M. S.; Trigueiro, P.; Honorio, L. M.; Pena-Garcia, R.; Osajima, J. **A. Facile synthesis of ZnO-clay minerals composites using an ultrasonic approach for photocatalytic performance.** Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, v. 429, p. 113934, 2022. 14 out. 2026.

Khan, S.; Noor, T.; Iqbal, N.; Yaqoob, L. **Photocatalytic dye degradation from textile wastewater: a review.** ACS Omega, v. 9, n. 20, p. 21751–21767, 2024. 14 out. 2026.

Lobo, T. M. Obtenção do $SrSnO_3$ e do $SrSnO_3$: **Para o tratamento fotocatalítico da água de lavagem do biodiesel.** Tese de Doutorado, 2016. 16 out. 2026.

Massaroli, C. R. **Síntese e caracterização de TiO_2 e aplicação na degradação fotocatalítica do corante amarelo reativo BF-4G**. **Trabalho de Conclusão de Curso**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco, 2019.

Mohamed, E. A., Altalhi, A. A., Ahmed, H. M., Negm, N. A. **High-performance photocatalytic degradation of methylene blue from industrial wastewater using bio-inspired ZnO nanoparticles under visible light. Desalination and Water Treatment**, p. 101539, 2025. 16 out. 2026.

Nath, R. K.; Zain, M. F. M.; Jamil, M. An **environment-friendly solution for indoor air purification by using renewable photocatalysts in concrete: a review. Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 62, p. 1184–1194, 2016. 16 out. 2026.

Osajima, J. A.; Sá, A. S. Feitosa, R. Furtini, M. B.; Honório, L. M.; Fonseca, M. G. Silva-Filho, E. C. **Improved remediation of contaminated water using ZnO systems via chemical treatment: applications, implications and toxicological mitigation. Sustainable Water Resources Management**, v. 9, n. 1, p. 42, 2023. 16 out. 2026.

Pantoja-Espinoza, J. C., DelaCruz-Alderete, G. A., Paraguay-Delgado, F. **Photocatalytic degradation of methylene blue dye with g-C_3N_4/ZnO nanocomposite materials using visible light. Catalysts,** v. 15, n. 9, p. 851, 2025. 16 out. 2026.

Rao, A., Thakur, P., Thakur, A. **Recent Advances in Photocatalytic Degradation for Dye-Contaminated Wastewater: A Review on Kinetic Insights and Metal Oxide Nanoparticle Approaches.** Inorganic Chemistry Communications, p. 116562, 2026. 16 out. 2026.

Rauf, M. A., Meetani, M. A., Hisaindee, S. An **overview on the photocatalytic degradation of azo dyes in the presence of TiO_2 doped with selective transition metals.** Desalination, v. 276, n. 1-3, p. 13-27, 2011. 16 out. 2026.

Rauf, M. A.; Ashraf, S. Salman. **Fundamental principles and application of heterogeneous photocatalytic degradation of dyes in solution**. Chemical engineering journal, v. 151, n. 1-3, p. 10-18, 2009. 16 out. 2026.

Rocha, R. L. P.; Honorio, L. M. C.; Bezerra, R. D. D. STrigueiro, P.Duarte, T. M. Fonseca, M. G.; Osajima, J. A. **Light-activated hydroxyapatite photocatalysts: new environmentally-friendly materials to mitigate pollutants. Minerals**, v. 12, n. 5, p. 525, 2022. 16 out. 2026.

Sá, A.S.; Feitosa, R.P., Honorio, L.M; Peña-Garcia, R.; Almeida, L. C. Dias, J. S. Da Silva-Filho, E.C. **A brief photocatalytic study of ZnO containing cerium towards ibuprofen degradation. Materials,** v. 14, n. 19, p. 5891, 2021. 16 out. 2026.

Sahu, P., Das, D. Dark **degradation of methylene blue dye by ZnO/Ag_2O/rGO heterostructure reactant catalyst**. Next Materials, v. 13, p. 103435, 2026. 16 out. 2026.

Shishir, M. K. H.; Akand, M. S.; Maola, M.; Monira, M. F.; Rifat, M.; Sayeem, N. R. Khan, G. M. A. **Photocatalytic removal of textile dyes: analytical strategies for post-degradation evaluation**. Desalination, p. 119437, 2025. 16 out. 2026.

Thennarasu, G.; Rajendran, S.; Kalairaj, A.; Rathore, H. S.; Panda, R. C.; Senthilvelan, T. **A comprehensive review on semiconductor nanometal oxides photocatalysts for wastewater treatment.** Clean Technologies and Environmental Policy, v. 27, n. 2, p. 495–516, 2025. 16 out. 2026.

Umukoro, E. H. Akintunde, T. A.; Jeje, S. O. Shongwe, M. B.; Afolabi, O. R.; Adekunle, A. S. Oluwafemi, **O. S. Photocatalytic removal of eosin yellow dye using Ag-NiO/ZnO nanocomposite**. Next Materials, v. 8, p. 100896, 2025. 16 out. 2026.

Yang, X.; Wang, D. **Photocatalysis: from fundamental principles to materials and applications.** ACS Applied Energy Materials, v. 1, n. 12, p. 6657–6693, 2018.16 out. 2026.

Zanoni, M. V. B.; Yamanaka, H. *C***orantes: caracterização química, toxicológica, métodos de detecção e tratamento**. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2016. 16 out. 2026.

KATHERESAN, V. et al. Remediation of textile dye wastewater using various technologies: a review. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 25, n. 25, p. 24326–24341, 2018. 16 out. 2026.