



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

Bruno Piletti

**Análise da eficiência dos processos de fotólise e UV/H₂O₂ para o tratamento de
efluente de metodologia Kjeldahl**

Florianópolis

2026

Bruno Piletti

Análise da eficiência dos processos de fotólise e UV/H₂O₂ para o tratamento de efluente de metodologia Kjeldahl

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientador(a): Aline Alves Freitas, Dra.

Coorientador(a): Prof.(a) Maria Eliza Nagel Hassemer, Dra.

Florianópolis

2026

Piletti, Bruno

Análise da eficiência dos processos de fotólise e UV/H₂O₂ para o tratamento de efluente de metodologia Kjeldahl / Bruno Piletti ; orientadora, Aline Alves Freitas, coorientadora, Maria Eliza Nagel Hassemer, 2026. 65 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, 2026.

Inclui referências.

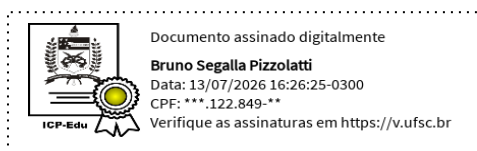
1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Resíduos Químicos Laboratoriais. 3. Tratamento in loco. 4. Remoção de corantes. 5. Processos Oxidativos Avançados. I. Freitas, Aline Alves. II. Hassemer, Maria Eliza Nagel. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. IV. Título.

Bruno Piletti

Análise da eficiência dos processos de fotólise e UV/H₂O₂ para o tratamento de efluente de metodologia Kjeldahl

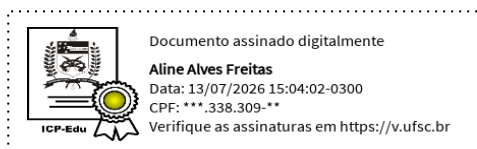
Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Florianópolis, 08 de julho de 2026.



Coordenação do Curso

Banca examinadora



Aline Alves Freitas, Dra.

Orientadora



Prof.(a) André Aguiar Battistelli, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina



Paula Adriana da Silva, Ma.
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Primeiramente aos meus pais, que me proporcionaram a oportunidade de seguir os meus sonhos, sempre com muita presença, carinho e apoio nos momentos difíceis. Aos meus avós, educadores, que me ensinaram da importância indiscutível das relações humanas para uma educação de qualidade.

Agradeço especialmente à minha orientadora, Aline Alves Freitas, que se mostrou muito presente em todas as etapas do desenvolvimento deste trabalho, e me orientou com muita dedicação, compreensão e gentileza. Você é um exemplo de profissional e de pessoa, que eu levarei comigo para sempre. À minha coorientadora, Maria Eliza Nagel Hassemer, pelas contribuições e apoio no desenvolvimento do trabalho, sempre com muita atenção e leveza. Sem as orientações e o acolhimento de vocês, este trabalho não teria sido possível. Muito Obrigado.

Ao Laboratório Integrado de Meio Ambiente (LIMA), e toda a sua equipe, que concedeu o espaço para o desenvolvimento deste trabalho e, desde muito cedo na graduação, também foi espaço para o meu desenvolvimento técnico, descontração e acolhimento. Um agradecimento especial também ao Laboratório de Toxicologia Ambiental (LABTOX) e toda a sua equipe, pela parceria e apoio no desenvolvimento dos testes ecotoxicológicos realizados. Em especial, ao meu colega Carlos Henrique Soldatti, pelo apoio na realização dos testes, acolhimento e amizade.

Às minhas colegas Giovanna Marques Burtet, Mariana de Souza Becker e Laura Bin Alcântara. A parceria e o carinho de vocês me permitiram continuar seguindo em frente nos momentos difíceis. A todas as amigas que desenvolvi no decorrer da graduação, dos estágios e projetos de extensão, pelas trocas de vivências, experiências e de conhecimento.

À Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), pelo acesso ao ensino público, gratuito e de qualidade. Em especial, deixo meu sincero agradecimento a todos os professores e à equipe técnica do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, pelos conhecimentos técnicos adquiridos e pelo apoio.

“Quando sabemos exatamente onde estamos, o mundo se reduz às dimensões de um mapa. Quando não sabemos, é como se ele não tivesse limites.”

— Liu Cixin, O Fim da Morte.

RESUMO

As atividades de ensino, pesquisa e extensão realizadas em instituições de ensino superior geram resíduos químicos laboratoriais com características diversas e, muitas vezes, potencialmente perigosas, tornando seu tratamento um importante desafio ambiental. Entre esses resíduos, destacam-se os efluentes contendo corantes e indicadores químicos utilizados em análises laboratoriais, como aqueles provenientes da metodologia de Kjeldahl, que apresentam em sua composição vermelho de metila e verde de bromocresol. Devido à elevada estabilidade molecular desses compostos, sua remoção por métodos convencionais pode ser limitada, exigindo tecnologias mais eficientes. Nesse contexto, os Processos Oxidativos Avançados (POAs) se destacam como alternativas promissoras para o tratamento de efluentes com corantes, pois geram espécies altamente reativas capazes de degradar compostos orgânicos complexos e reduzir a carga poluente. Sendo assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a eficiência dos processos de fotólise UV e UV/H₂O₂ no tratamento de um efluente laboratorial proveniente da metodologia de Kjeldahl. Inicialmente, o resíduo foi caracterizado por meio de análises de pH e espectroscopia UV-Vis, sendo identificada uma banda de absorção máxima em 615 nm, utilizada para o monitoramento da degradação dos corantes presentes. Os ensaios foram conduzidos em reator fotoquímico de bancada, utilizando diferentes concentrações de peróxido de hidrogênio (0, 30, 45 e 60 mg/L) e tempo de irradiação de até 60 minutos. A eficiência dos tratamentos foi avaliada por meio de análises espectrofotométricas, enquanto os efeitos ecotoxicológicos foram investigados por meio de ensaios com *Daphnia magna* e *Lactuca sativa*. Os resultados demonstraram elevada remoção dos compostos responsáveis pela coloração do efluente para todos os tratamentos avaliados, com a maior eficiência final de 96,57% para a fotólise após 60 minutos de irradiação. O processo UV/H₂O₂ com 60 mg/L de H₂O₂ apresentou maior velocidade inicial de degradação, alcançando 89,86% de remoção aos 20 minutos, enquanto a fotólise apresentou 86,31% no mesmo período. Ambos os processos apresentaram comportamento compatível com o modelo cinético de pseudo-primeira ordem. Ao final do tratamento, as diferenças entre os processos tornaram-se menos expressivas, com remoções variando entre 95,73% e 96,57%. Os ensaios ecotoxicológicos não evidenciaram redução da toxicidade após os tratamentos aplicados, indicando a possível presença de compostos remanescentes ou subprodutos de degradação com potencial tóxico. Os resultados indicam que os processos avaliados, com destaque para a fotólise, apresentam potencial de aplicação no tratamento de resíduos químicos laboratoriais contendo corantes indicadores *in loco*, e abrem perspectiva futura para o estudo de estratégias complementares para redução da toxicidade do efluente.

Palavras-chave: Resíduos Químicos Laboratoriais; Tratamento *in loco*; Corantes Indicadores; Processos Oxidativos Avançados; Toxicidade.

ABSTRACT

Teaching, research, and extension activities carried out in higher education institutions generate laboratory chemical waste with diverse characteristics and, often, potentially hazardous properties, making its treatment an important environmental challenge. Among these wastes, effluents containing dyes and chemical indicators used in laboratory analyses stand out, such as those derived from the Kjeldahl methodology, which contain methyl red and bromocresol green in their composition. Due to the high molecular stability of these compounds, their removal by conventional methods may be limited, requiring more efficient technologies. In this context, Advanced Oxidation Processes (AOPs) stand out as promising alternatives for the treatment of dye-containing effluents, as they generate highly reactive species capable of degrading complex organic compounds and reducing pollutant load. Therefore, the present study aimed to evaluate the efficiency of UV photolysis and UV/H₂O₂ processes in the treatment of laboratory effluent derived from the Kjeldahl method. Initially, the waste was characterized through pH measurements and UV-Vis spectroscopy, which identified a maximum absorption band at 615 nm, used to monitor the degradation of the present dyes. The experiments were conducted in a bench-scale photochemical reactor using different hydrogen peroxide concentrations (0, 30, 45, and 60 mg/L) and irradiation times of up to 60 minutes. Treatment efficiency was evaluated through spectrophotometric analyses, while ecotoxicological effects were assessed using tests with *Daphnia magna* and *Lactuca sativa*. The results demonstrated high removal of the compounds responsible for the effluent color in all treatments, with the highest final efficiency reaching 96.57% for UV photolysis after 60 minutes of irradiation. The UV/H₂O₂ process with 60 mg/L H₂O₂ exhibited the highest initial degradation rate, achieving 89.86% removal after 20 minutes, whereas UV photolysis achieved 86.31% under the same conditions. Both processes showed kinetic behavior consistent with a pseudo-first-order model. By the end of the treatment period, the differences between the processes became less pronounced, with removal efficiencies ranging from 95.73% to 96.57%. Ecotoxicological assays did not indicate a reduction in toxicity after the applied treatments, suggesting the possible presence of residual compounds or degradation by-products with toxic potential. The results indicate that the evaluated processes, particularly photolysis, show potential for application in the on-site treatment of laboratory chemical waste containing indicator dyes, and highlight the need for future studies on complementary strategies to reduce effluent toxicity.

Keywords: Chemical Laboratory Waste; In situ Treatment; Indicator Dye; Advanced Oxidation Processes; Toxicity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estruturas químicas bidimensionais dos corantes utilizados na metodologia Kjeldahl	19
Figura 2 - Principais resíduos químicos laboratoriais gerados na UFSC e respectivas formas de tratamento ou destinação final aplicáveis.....	21
Figura 3 - Classificação dos principais tipos de POAs.....	26
Figura 4 - Fluxograma metodológico	30
Figura 5 - Reator Fotoquímico de bancada	31
Figura 6 - Equipamento empregado na metodologia Kjeldahl (à esquerda) e efluente bruto (à direita).	32
Figura 7 - Soluções padrão (da esquerda para a direita): Ácido Bórico (AB), (VB + AB), (VM + AB) e Mistura (VM + VB + AB).....	33
Figura 8 - Soluções dos corantes (da esquerda para a direita): VM (pH=6,4 ± 0,01) Mistura (pH=4,0 ± 0,01), Mistura (pH=6,4 ± 0,01), VB (pH=6,4 ± 0,01) e Efluente Bruto (pH=6,4 ± 0,01).....	34
Figura 9 - Reator em funcionamento (esquerda) e alíquotas de efluente retiradas durante os ensaios (direita).	36
Figura 10 - Ensaio de toxicidade aguda com D. magna	39
Figura 11 - Teste de fitotoxicidade com sementes de Lactuca sativa.....	40
Figura 12 - Espectro de Varredura do Efluente Bruto (pH = 6,4).....	42
Figura 13 - Espectros de Varredura das soluções padrão de V.B e V.M (pH = 4,0 e pH = 6,4)	43
Figura 14 - Espectros de Varredura das soluções padrão de V.B e V.M (pH = 6,4) e Mistura (V.B + V.M) (pH = 6,4).....	44
Figura 15 - Espectro de Varredura: Efluente Bruto e soluções padrão de V.B e V.M (pH = 6,4).....	45
Figura 16 - Varredura Efluente Bruto x Mistura V.M + V.B (pH = 6,4)	45
Figura 17 - Aspecto visual do efluente antes e após o tratamento por fotólise.	46
Figura 18 - Comparativo das curvas médias do decaimento da absorvância do corante ($\lambda = 615 \text{ nm}$) para os tratamentos: Fotólise UV e UV/H ₂ O ₂ nas concentrações 30, 45 e 60 mg/L, respectivamente.	47

Figura 19 - Curvas médias individuais do decaimento da absorvância do corante ($\lambda = 615 \text{ nm}$) para os tratamentos: Fotólise UV e UV/H ₂ O ₂ nas concentrações 30, 45 e 60 mg/L, respectivamente.	47
Figura 20 - Curvas de porcentagem de remoção (%) em termos de absorvância no comprimento de onda máximo do corante ($\lambda = 615 \text{ nm}$) para cada método.	48
Figura 21 - Ajuste do modelo cinético de pseudo-primeira ordem para a degradação dos corantes sob fotólise e processo UV/H ₂ O ₂ , considerando a região linear dos primeiros 20 minutos de irradiação.	50
Figura 22 - Imobilidade de <i>D. magna</i> nas diluições das amostras analisadas. * indicam diferença significativa ($p < 0,05$) quando comparadas ao controle.	53
Figura 23 - Sementes no início do teste (à esquerda) e sementes germinadas pós teste (à direita).	54
Figura 24 - Resultados do comprimento médio das radículas das sementes germinadas de <i>L. sativa</i> expostas às amostras. * indicam diferença significativa ($p < 0,05$) quando comparados ao controle.	55
Figura 25 - Comparação entre as sementes expostas ao controle (C), a diferentes concentrações da amostra tratada por UV/H ₂ O ₂	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores médios de pH aferidos do efluente bruto e das alíquotas no tempo final (60 min).....	41
Tabela 2 - Porcentagens de remoção de corante para cada método nos tempos de 20 e 60 minutos de irradiação	49
Tabela 3 - Parâmetros cinéticos (k e R^2) obtidos para diferentes ordens de reação nos tratamentos por Fotólise UV e UV/H ₂ O ₂ em diferentes concentrações, para intervalos de tempo de 0 a 20 minutos de irradiação	49

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AB	Ácido Bórico
ANOVA	Análise de variância
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
FT	Fator de Toxicidade
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LABTOX	Laboratório de Toxicologia - UFSC
LIMA	Laboratório Integrado de Meio Ambiente - UFSC
VB	Verde de Bromocresol
VM	Vermelho de Metila
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
POA	Processo Oxidativo Avançado
RAS	Regras para Análise de Sementes
RQL	Resíduos Químicos Laboratoriais
RSS	Resíduos de Serviços de Saúde
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UV	Radiação Ultravioleta
UV/H ₂ O ₂	Processo oxidativo por meio de radiação UV e peróxido de hidrogênio
UV-Vis	Espectroscopia na Região do Ultravioleta e Visível

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
2	OBJETIVOS.....	16
2.1	OBJETIVO GERAL	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	RESÍDUOS QUÍMICOS LABORATORIAIS	17
3.1.1	Resíduos laboratoriais à base de corante	18
3.1.2	Metodologias de tratamento de RQL.....	20
3.1.2.1	Tratamento de resíduos químicos na UFSC	22
3.2	PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS	25
3.2.1	Fotólise UV	27
3.2.2	Processo UV/ H ₂ O ₂	27
3.2.3	Aplicações de POAs a resíduos contendo corantes	28
4	MATERIAIS E MÉTODOS	29
4.1	SISTEMA EXPERIMENTAL - REATOR DE BANCADA (UV E UV/H ₂ O ₂)...30	
4.2	EFLUENTE DO ESTUDO – METODOLOGIA KJELDAHL	31
4.2.1	Soluções padrão de corantes e ácido bórico	33
4.3	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	34
4.3.1	Delineamento experimental.....	34
4.3.2	Soluções de trabalho de peróxido de hidrogênio (H ₂ O ₂).....	34
4.3.3	Aplicação das técnicas de Fotólise UV e UV/ H ₂ O ₂	35
4.4	MÉTODOS ANALÍTICOS.....	36
4.4.1	Avaliação da degradação dos corantes	36
4.5	ENSAIOS TOXICOLÓGICOS	37
4.5.1	Teste de toxicidade aguda com <i>Daphnia magna</i>	38
4.5.2	Teste de toxicidade com <i>Lactuca sativa</i>	39
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	40
5.1	CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE	40
5.1.1	Medição do pH.....	40
5.1.2	Varredura UV-Vis.....	41
5.2	AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DOS CORANTES.....	46

5.3	RESULTADOS DOS ENSAIOS TOXICOLÓGICOS	51
5.3.1	Teste com <i>Daphnia magna</i>	51
5.3.2	Teste de germinação e crescimento com <i>L. sativa</i>	53
6	CONCLUSÃO	57
7	RECOMENDAÇÕES	58
	REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

As atividades de ensino, pesquisa e extensão desenvolvidas em instituições de ensino superior geram diferentes tipos de resíduos, dentre os quais se destacam os resíduos químicos laboratoriais. Esses resíduos apresentam composição variável e potencial periculosidade, podendo conter ácidos, bases, solventes orgânicos, metais e outros compostos capazes de representar riscos à saúde humana e ao meio ambiente. Além dos desafios relacionados à sua classificação, segregação e acondicionamento, a heterogeneidade de sua composição dificulta a definição de estratégias adequadas para seu tratamento e destinação final (Nascimento e Tenuta Filho, 2010; Kularatne, 2023; UFSC, 2024).

Entre os diferentes resíduos gerados em laboratórios, encontram-se aqueles que contêm corantes ou indicadores químicos colorimétricos em sua composição. Um exemplo é o resíduo proveniente da metodologia Kjeldahl, amplamente utilizada para a determinação de nitrogênio em diferentes matrizes ambientais e biológicas (Cruz, 2013; Hau et al., 2025). Durante a etapa de titulação desse método, são empregados os indicadores vermelho de metila e verde de bromocresol, compostos orgânicos aromáticos que apresentam grupos cromóforos responsáveis por sua intensa coloração (Ma e Zuazaga, 1942; Le et al., 2020; Anisuzzaman et al., 2022). A presença desses compostos em resíduos laboratoriais é relevante considerando principalmente seu descarte e destinação final, uma vez que substâncias coloridas podem persistir no meio ambiente, comprometer a qualidade visual dos corpos hídricos e apresentar efeitos tóxicos para organismos aquáticos (Anisuzzaman et al., 2022; Kularatne, 2023).

O tratamento de resíduos contendo corantes pode envolver diferentes abordagens físicas, biológicas e químicas. Entretanto, muitos desses compostos apresentam elevada estabilidade química e resistência à degradação, limitando a eficiência de métodos convencionais de tratamento (Anisuzzaman et al., 2022; Solayman et al., 2023). Além disso, estratégias tradicionalmente utilizadas para resíduos químicos laboratoriais, como incineração e disposição por empresas especializadas, podem estar associadas a elevados custos operacionais e desafios logísticos, especialmente em instituições de ensino e pesquisa (Fioreze et al., 2014; UFSC, 2024). Nesse contexto, o desenvolvimento de alternativas capazes de

promover a degradação desses compostos e o tratamento destes resíduos diretamente nos locais de geração é particularmente interessante.

Dentre as tecnologias investigadas para esse fim, destacam-se os Processos Oxidativos Avançados (POAs), que se baseiam na geração de espécies altamente oxidantes, principalmente os radicais hidroxila, capazes de degradar compostos orgânicos persistentes e recalcitrantes (Araújo et al., 2016; Nascimento et al., 2017). Dentre os POAs amplamente estudados encontram-se a fotólise UV e o processo UV/H₂O₂. Enquanto a fotólise utiliza exclusivamente a radiação ultravioleta para promover a degradação dos contaminantes, o processo UV/H₂O₂ combina a radiação UV com peróxido de hidrogênio, aumentando a geração de radicais hidroxila e o potencial oxidante do sistema (Teixeira e Jardim, 2004; Zambrano et al., 2024). Embora esses processos apresentem limitações relacionadas ao consumo energético e à utilização de reagentes, tais restrições tendem a ser menos significativas em aplicações de pequena escala, como aquelas associadas ao tratamento de resíduos laboratoriais (Zambrano et al., 2024).

A aplicação da fotólise UV e do processo UV/H₂O₂ para a degradação de corantes é amplamente reportada na literatura, com resultados promissores para diferentes compostos e condições operacionais (Djebbar et al., 2012; Joseph et al., 2017; Mohammed et al., 2021; Bhatti e Sugha, 2022). Entretanto, a maior parte dos estudos está relacionada ao tratamento de efluentes industriais ou soluções sintéticas, havendo menor número de investigações voltadas especificamente para resíduos químicos laboratoriais contendo indicadores ácido-base, por exemplo. Dessa forma, a avaliação dessas tecnologias no tratamento de resíduos provenientes da metodologia Kjeldahl pode contribuir para o desenvolvimento de alternativas de gerenciamento compatíveis com a realidade de laboratórios de ensino e pesquisa.

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar a eficiência dos processos de fotólise UV e UV/H₂O₂ no tratamento de efluente químico laboratorial proveniente da metodologia Kjeldahl, investigando sua capacidade de promover a remoção da coloração do resíduo e contribuir para o desenvolvimento de alternativas de tratamento in loco compatíveis com a realidade de laboratórios de ensino e pesquisa.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a eficiência dos processos de fotólise e UV/H₂O₂ aplicados ao tratamento de efluente proveniente da metodologia Kjeldahl

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1) Caracterizar o efluente proveniente da metodologia Kjeldahl por meio de análises de pH e espectroscopia UV-Vis;

2) Avaliar a eficiência dos processos na degradação dos indicadores presentes no efluente por meio de análises de espectrofotometria UV-Vis, empregando diferentes tempos de irradiação e concentrações de peróxido de hidrogênio;

3) Avaliar a toxicidade do efluente antes e após os tratamentos por meio de ensaios ecotoxicológicos com microcrustáceo *Daphnia magna* e sementes de alface *Lactuca sativa*.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 RESÍDUOS QUÍMICOS LABORATORIAIS

As atividades desenvolvidas em instituições de ensino e pesquisa, sobretudo aquelas que envolvem experimentos práticos, resultam na geração de resíduos químicos laboratoriais (RQL), abrangendo materiais como vidrarias quebradas, materiais contaminados, reagentes vencidos ou inutilizados, além de efluentes provenientes de análises e procedimentos experimentais. Esses resíduos podem se apresentar na forma sólida, semissólida ou líquida e que, devido às suas características, frequentemente não são passíveis de tratamento convencional, representando riscos à saúde humana e ao meio ambiente. São geralmente constituídos por compostos orgânicos ou inorgânicos tóxicos, ecotóxicos, corrosivos, inflamáveis, reativos, explosivos, patogênicos, teratogênicos etc. (Nascimento; Tenuta Filho, 2010; UFSC, 2024).

Embora os volumes gerados em laboratórios acadêmicos sejam geralmente inferiores aos observados em processos industriais, os resíduos produzidos nestes centros apresentam elevada diversidade química, composição frequentemente variável e, em muitos casos, alto potencial de periculosidade. Essa heterogeneidade dificulta a padronização dos procedimentos de gerenciamento e tratamento, exigindo estratégias específicas para sua classificação, segregação, acondicionamento, armazenamento e destinação final adequada (Silva, 2015; Dhenkula et al., 2024; UFSC, 2024, Kularatne, 2023).

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS - Lei nº 12.305/2010) inclui, em sua definição de resíduos sólidos, também os resíduos líquidos cujo descarte em rede coletora ou corpos hídricos seja inviável devido às suas características, no qual estão incluídos os RQL. O gerenciamento destes resíduos químicos deve priorizar ações preventivas em detrimento de medidas corretivas. Nesse contexto, a hierarquia de gerenciamento estabelecida pela PNRS orienta que a não geração, a redução na fonte, a reutilização e a reciclagem sejam priorizadas em relação ao tratamento e à disposição final.

Para que as estratégias de gerenciamento sejam implementadas de forma segura e eficiente, torna-se essencial a correta classificação dos resíduos gerados.

Nesse contexto, a norma NBR 1004:2024 da ABNT estabelece os critérios para classificação dos resíduos quanto à sua periculosidade, podendo os resíduos serem considerados como: perigosos (Classe I) ou não perigosos (Classe II).

O gerenciamento de RQL requer sua segregação ainda nas unidades geradoras, considerando suas características físico-químicas e seu grau de periculosidade, a fim de evitar incompatibilidades químicas e minimizar riscos ocupacionais e ambientais. Além disso, sempre que tecnicamente viável, esses resíduos devem ser submetidos a processos de tratamento que promovam a redução de sua periculosidade ou possibilitem sua recuperação (González et al., 2020; UFSC, 2024).

Entretanto, a diversidade de substâncias presentes nos resíduos químicos perigosos e a variabilidade de suas composições tornam seu tratamento uma tarefa complexa. Em função dessas características, diferentes estratégias podem ser empregadas, variando desde processos físico-químicos convencionais, como neutralização e precipitação, até tecnologias mais avançadas destinadas à degradação de compostos orgânicos recalcitrantes. Nesse contexto, destacam-se os resíduos contendo corantes e indicadores químicos, frequentemente presentes em atividades laboratoriais, cuja elevada estabilidade molecular e potencial toxicidade demandam métodos de tratamento capazes de promover sua degradação de forma eficiente (Nascimento e Tenuta Filho, 2010; Anisuzzaman et al., 2022; Kularatne, 2023; Solayman et al., 2023).

3.1.1 Resíduos laboratoriais à base de corante

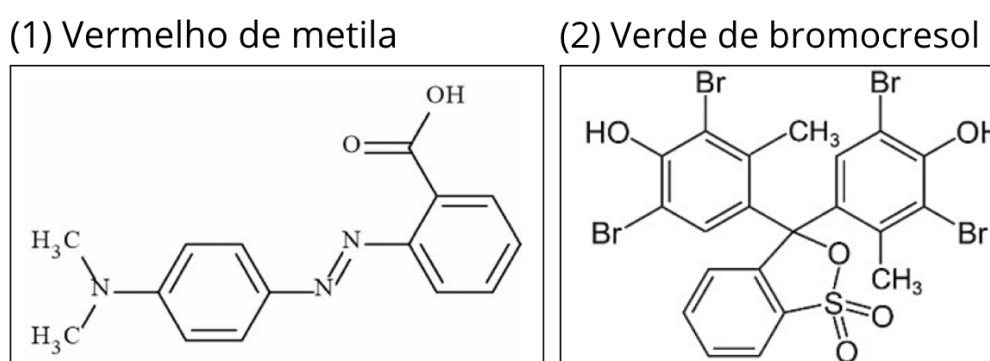
Em laboratórios de pesquisa e acadêmicos, geralmente é produzida uma grande quantidade de resíduos contaminados com corantes, especialmente durante aulas práticas e outras atividades de pesquisa. Os corantes mais usados em laboratórios acadêmicos incluem o violeta de cristal, a safranina e o azul de metileno, comumente utilizados em experimentos de coloração celular, além de fenolftaleína e alaranjado de metila, utilizados como indicadores em titulações ácido-base (Bankole et al. 2022; Kularatne, 2023; Rai e Paulson, 2025). Dentre as atividades que contribuem para a geração de resíduos contendo esses compostos destaca-se a aplicação do método Kjeldahl, amplamente empregado para a determinação de

nitrogênio orgânico e amoniacal por meio de etapas de destilação e titulação (Cruz, 2013; Hau et al., 2025).

Neste método, a amostra é digerida sob aquecimento em meio alcalino, liberando a amônia presente, que é destilada e condensada em fase líquida. Posteriormente, a amônia é capturada em uma solução de ácido bórico contendo indicadores ácido-base. Entre as misturas mais utilizadas como indicador estão aquelas compostas por verde de bromocresol e vermelho de metila, empregadas para facilitar a identificação do ponto final da titulação (Ma e Zuazaga, 1942; Hau et al., 2025). A mudança de coloração dessa solução permite identificar o ponto final da titulação e, conseqüentemente, determinar a concentração de nitrogênio presente na amostra.

Os corantes vermelho de metila e verde de bromocresol, cujas estruturas estão representadas na Figura 1, pertencem à classe dos compostos orgânicos aromáticos e apresentam grupos cromóforos responsáveis pela absorção da radiação eletromagnética na região do visível (Le et al., 2020; Anisuzzaman et al., 2022). Essas características conferem coloração intensa às soluções em que estão presentes e permitem sua detecção por técnicas espectrofotométricas, como a espectroscopia UV-Vis.

Figura 1 - Estruturas químicas bidimensionais dos corantes utilizados na metodologia Kjeldahl



Fonte: Adaptado de Fassi et al. (2012) e Rached et al. (2023).

O vermelho de metila é um corante da classe dos azo-corantes amplamente utilizado como indicador ácido-base, enquanto o verde de bromocresol pertence ao grupo dos corantes triarilmetanos, também empregado como indicador de pH em procedimentos analíticos (Rached et al., 2023; Le et al., 2020; Sen et al., 2024).

Compostos orgânicos coloridos podem reduzir a penetração de luz em corpos hídricos, interferir em processos fotossintéticos e contribuir para alterações estéticas da qualidade da água (Anisuzzaman et al., 2022). Além disso, dependendo de sua estrutura química e concentração, esses compostos podem apresentar efeitos tóxicos para organismos aquáticos (Kularatne, 2023). Em função dessas características, resíduos laboratoriais contendo corantes e indicadores demandam estratégias de tratamento capazes de promover não apenas a remoção da cor, mas também a degradação das estruturas orgânicas responsáveis por sua persistência no meio ambiente.

3.1.2 Metodologias de tratamento de RQL

O tratamento e a destinação de resíduos químicos laboratoriais podem envolver diferentes estratégias, incluindo incineração, blendagem para coprocessamento e disposição em aterros industriais (Figura 2), geralmente realizados por empresas especializadas (UFSC, 2024). Entretanto, alguns métodos amplamente empregados apresentam limitações. A incineração, por exemplo, está associada a elevados custos operacionais e à possibilidade de formação de subprodutos tóxicos, dependendo das características dos resíduos tratados (Fioreze et al., 2014).

Figura 2 - Principais resíduos químicos laboratoriais gerados na UFSC e respectivas formas de tratamento ou destinação final aplicáveis

Resíduos Químicos	
Identificação do resíduo	Tratamento/Destinação Final
Formol	Aterro industrial / Incineração
Resto de produto químico	Aterro industrial
Resto de produto químico	Aterro industrial
Reagente	Aterro industrial / Incineração
Sólidos contaminados com metais pesados (SCMP)	Aterro industrial
Sólidos contaminados com produtos químicos (SCPQ)	Aterro industrial
Vidraria	Aterro industrial
Solventes halogenados (SH)	Incineração
Solventes não halogenados (SNH)	Blendagem para coprocessamento

Adaptado de UFSC (2024).

Nesse contexto, abordagens voltadas ao tratamento in loco de resíduos laboratoriais representam alternativa complementar às estratégias convencionais de gerenciamento. O tratamento pode ser realizado junto aos procedimentos experimentais desenvolvidos nos laboratórios, permitindo a redução da periculosidade ou do volume dos resíduos gerados antes de seu encaminhamento para destinação final. Além dos benefícios ambientais associados à diminuição dos volumes destinados a tratamento externo, essas práticas podem contribuir para redução de custos e aumento da segurança operacional (Mooney, 2004; Nascimento, 2010; Silva, 2015; Goh et al., 2020).

Entre os diferentes tipos de resíduos químicos laboratoriais, destacam-se aqueles que contêm corantes e outros compostos orgânicos de difícil degradação. As tecnologias de tratamento aplicadas a esses resíduos são frequentemente discutidas na literatura voltada a efluentes da indústria têxtil, em função da elevada carga de compostos coloridos gerada por esse setor (Adewuyi et al., 2021; Rai e Paulson, 2025). Dessa forma, parte significativa do conhecimento disponível sobre tratamento de resíduos contendo corantes é proveniente de estudos voltados a efluentes têxteis,

havendo ainda uma lacuna significativa de investigações específicas sobre resíduos químicos laboratoriais, os quais apresentam matrizes distintas e condições operacionais particulares que podem influenciar sua tratabilidade.

Os métodos comumente empregados para tratamento de resíduos contendo corantes podem ser agrupados em processos físicos, biológicos e químicos. Dentre os processos físicos destacam-se a adsorção, coagulação-floculação e os processos de separação por membranas. Os processos biológicos incluem sistemas aeróbios e anaeróbios que utilizam microrganismos para promover a degradação de compostos orgânicos presentes nos efluentes. Já os processos químicos abrangem técnicas de oxidação e redução empregadas para transformar ou degradar contaminantes (Adewuyi et al., 2021; Solayman et al., 2023; Dhenkula et al., 2024; Rai e Paulson, 2025).

Dentro da categoria dos processos químicos, destacam-se os processos oxidativos convencionais, nos quais são utilizados agentes como ozônio e peróxido de hidrogênio para degradação de poluentes. Apesar de sua aplicação consolidada, esses processos podem apresentar eficiência limitada para o tratamento de efluentes com elevadas concentrações de contaminantes ou compostos de maior estabilidade química (Anisuzzaman et al., 2022; Solayman et al., 2023).

Como alternativa às limitações dos processos convencionais, os processos oxidativos avançados são amplamente investigados para o tratamento de resíduos contendo compostos orgânicos persistentes. Esses processos combinam radiação UV, oxidantes e/ou catalisadores para promover a formação de espécies altamente reativas, capazes de degradar estruturas aromáticas complexas e compostos resistentes aos tratamentos químicos e biológicos convencionais (González et al., 2020; Anisuzzaman et al., 2022).

3.1.2.1 *Tratamento de resíduos químicos na UFSC*

Embora os aspectos normativos e operacionais sejam fundamentais para o gerenciamento dos RQL, sua efetividade também depende da formação e da conscientização dos indivíduos envolvidos nas atividades laboratoriais. Em instituições de ensino e pesquisa, os laboratórios representam não apenas espaços de geração de resíduos, mas também ambientes privilegiados para a formação de

profissionais conscientes quanto às suas responsabilidades ambientais e sociais. É fundamental desenvolver uma cultura que envolva professores e alunos em ações que favoreçam a adoção de práticas mais seguras e sustentáveis em laboratórios acadêmicos (Oliveira et al., 2021).

Nesse contexto, a educação ambiental associada aos princípios da Química Verde assume papel estratégico. A Química Verde propõe o desenvolvimento e a aplicação de processos e produtos que reduzam ou eliminem o uso e a geração de substâncias perigosas, orientando-se por princípios como prevenção da poluição, redução da geração de resíduos e utilização mais eficiente dos recursos naturais. A integração desses conceitos à formação acadêmica permite que estudantes compreendam que a gestão de resíduos não deve ser encarada apenas como uma etapa posterior ao experimento, mas como um componente intrínseco ao planejamento e à execução das atividades laboratoriais (Kundu et al., 2026).

A Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) constitui um importante exemplo de instituição de ensino superior que vem consolidando ações voltadas à educação e gestão sustentável de resíduos químicos laboratoriais. A relevância dessas iniciativas torna-se evidente diante do volume de resíduos perigosos gerados pelas atividades de ensino, pesquisa e extensão desenvolvidas na instituição. Somente no ano de 2025, foram registrados 30.734,90 kg de resíduos químicos perigosos gerados no campus Florianópolis, evidenciando a necessidade de estruturas organizacionais e técnicas capazes de assegurar seu gerenciamento adequado (UFSC, 2026).

Diante desse cenário, a UFSC tem desenvolvido ações que integram gestão ambiental, formação acadêmica e responsabilidade institucional, buscando não apenas atender às exigências legais, mas também fomentar uma cultura de prevenção, minimização e tratamento dos resíduos gerados em seus laboratórios. Essas iniciativas incluem tanto atividades de capacitação e ensino voltadas à comunidade acadêmica quanto mecanismos institucionais destinados ao acompanhamento e aprimoramento contínuo das práticas de gerenciamento de resíduos químicos.

No âmbito do ensino, destaca-se a disciplina Segurança em Laboratório e Tratamento de Resíduos (QMC 5901), pertencente a grade curricular do curso de graduação em química, que aborda aspectos relacionados à segurança química,

gerenciamento de resíduos químicos, classificação, rotulagem, acondicionamento, armazenamento, métodos de tratamento, reutilização, reciclagem e disposição final. A oferta dessa disciplina evidencia a preocupação institucional em incorporar a temática da gestão de resíduos à formação dos estudantes, alinhando-se aos princípios da educação ambiental e da Química Verde (UFSC, 2021).

Além das ações de ensino formal, a universidade desenvolve desde 2017 no Departamento de Química o projeto de extensão “Sustentabilidade e Educação Ambiental na Geração e Tratamento de Resíduos Químicos”. O projeto tem como objetivo promover o compartilhamento de conhecimentos e tecnologias de gerenciamento e tratamento de resíduos químicos, incentivando o desenvolvimento de métodos que possam ser aplicados na própria unidade geradora. Entre suas ações destacam-se a adaptação de procedimentos simplificados de tratamento, a consultoria técnica para laboratórios, a capacitação de estudantes e servidores e a conscientização da comunidade acadêmica sobre a responsabilidade ambiental associada aos resíduos químicos gerados nas atividades de ensino e pesquisa (Rosenbrock, 2022).

Complementando essas ações, a UFSC institucionalizou a temática por meio da Portaria nº 705/2023/GR, de 3 de abril de 2023, que instituiu a Comissão Permanente de Tratamento Interno de Resíduos. A comissão tem como objetivo analisar, acompanhar, orientar e avaliar iniciativas relacionadas ao tratamento de resíduos químicos no âmbito da universidade, promovendo o desenvolvimento de soluções que priorizem o tratamento interno sempre que tecnicamente viável e ambientalmente seguro (UFSC, 2023).

A criação dessa comissão representa um importante avanço institucional, pois reconhece que o gerenciamento de resíduos químicos não deve se restringir à contratação de empresas especializadas para destinação externa, mas também envolver ações de prevenção, minimização, reaproveitamento e tratamento no próprio ambiente gerador. Essa abordagem está em consonância com os princípios de gestão estabelecida pela PNRS, que priorizam a redução da periculosidade dos resíduos na fonte e a adoção de soluções ambientalmente sustentáveis.

Dessa forma, as iniciativas desenvolvidas pela UFSC demonstram como instituições de ensino e pesquisa podem integrar ensino, gestão ambiental e responsabilidade institucional, contribuindo simultaneamente para a formação de

profissionais mais conscientes e para a redução dos impactos ambientais associados às atividades laboratoriais.

3.2 PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS

Os Processos Oxidativos Avançados (POAs) consistem em tecnologias baseadas na geração de espécies altamente oxidantes, principalmente os radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$), que apresentam elevado potencial de oxidação e capacidade de degradar compostos orgânicos recalcitrantes até sua mineralização em dióxido de carbono, água e íons inorgânicos (Araújo et al., 2016; Nascimento et al., 2017).

A formação desses radicais pode ocorrer por diferentes mecanismos, envolvendo agentes oxidantes fortes, como peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e ozônio (O_3), associados ou não à radiação UV, além de processos eletroquímicos (Araújo et al., 2016; Nascimento et al., 2017). Devido à sua elevada reatividade e baixa seletividade, esses radicais são capazes de degradar diferentes espécies tóxicas e compostos recalcitrantes, mesmo em baixas concentrações (Fioreze et al., 2014; Araújo et al., 2016).

Entre as principais vantagens associadas aos POAs destacam-se: a degradação de compostos resistentes a tratamentos convencionais, a elevada versatilidade operacional, a possibilidade de mineralização de poluentes orgânicos e a operação em condições relativamente brandas de temperatura e pressão. Além disso, muitos desses processos apresentam baixa geração de resíduos secundários, como lodo. (Araújo et al., 2016; Nascimento et al., 2017; Córdova, 2019; Zambrano et al., 2024).

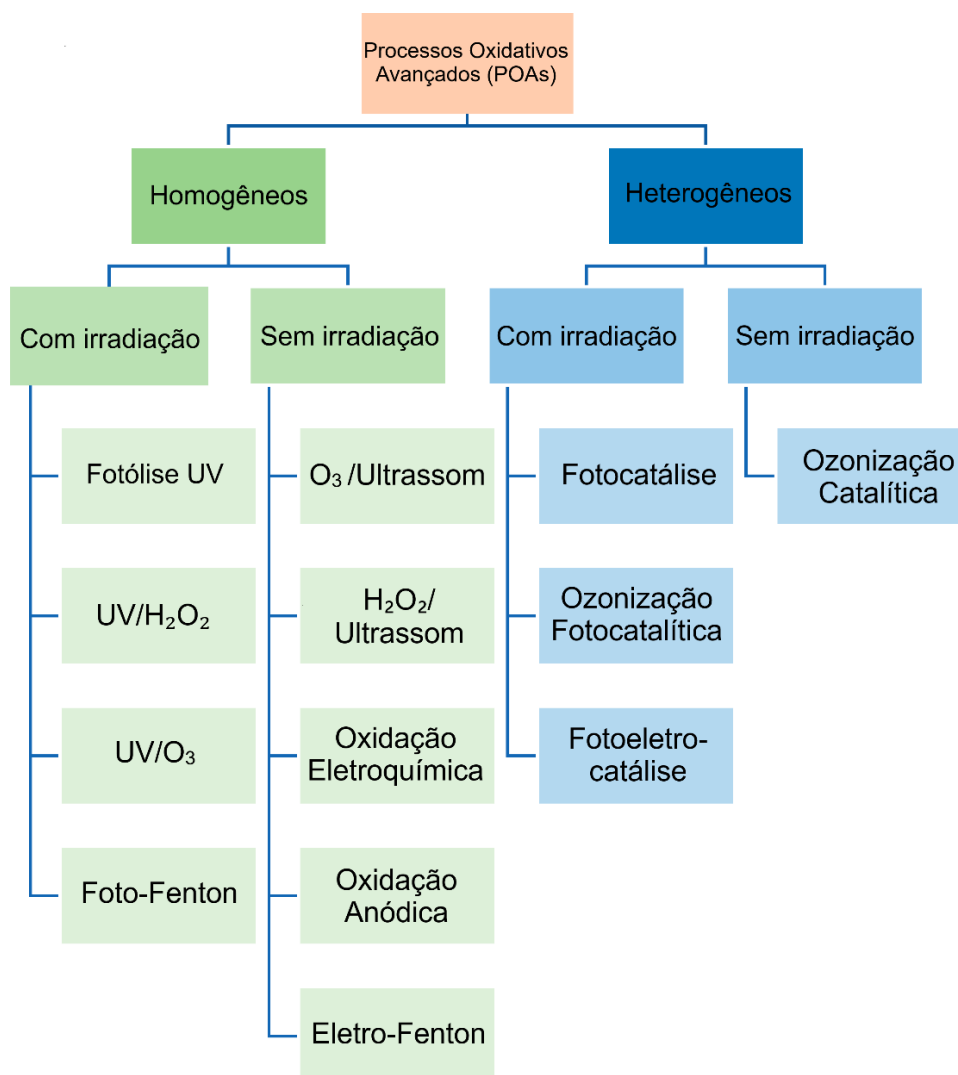
Esses processos podem ser aplicados em conjunto com tratamentos biológicos, promovendo a oxidação parcial de compostos recalcitrantes e aumentando sua biodegradabilidade. Dessa forma, os POAs podem atuar como etapa de pré-tratamento, convertendo moléculas complexas em compostos mais facilmente assimiláveis por microrganismos, reduzindo o tempo de tratamento necessário e aumentando a eficiência dos processos biológicos convencionais (Nagel-Hassemer et al., 2012; Fioreze et al., 2014; Nascimento et al., 2017; Boczkaj e Fernandes, 2017; Córdova, 2019).

Apesar de suas vantagens, os POAs também apresentam limitações, como elevados custos operacionais associados ao consumo energético e utilização de

agentes oxidantes, necessidade de mão de obra especializada e possibilidade de formação de subprodutos potencialmente tóxicos (Araújo et al., 2016; Nascimento et al., 2017; Zambrano et al., 2024).

Os POAs podem ser classificados em sistemas homogêneos e heterogêneos, e com base na presença ou ausência de irradiação, como demonstra a Figura 3. Os sistemas heterogêneos envolvem reações para as quais os reagentes se encontram em duas ou mais fases, com a possível utilização de óxidos ou metais fotoativos. Já os sistemas homogêneos envolvem reações que ocorrem em uma única fase, e incluem processos como: Fotólise, Fenton, Foto-Fenton, UV/O₃ e UV/H₂O₂ (Araújo et al., 2016; Nascimento et al., 2017, Anisuzzaman et al., 2022; Solayman et al., 2023).

Figura 3 - Classificação dos principais tipos de POAs



Adaptado de Khan e Yadav (2020).

Dentre os processos homogêneos com irradiação, a fotólise UV e o processo UV/H₂O₂ se destacam pela simplicidade operacional, pela não geração de lodo químico e pelo potencial de aplicação em pequena escala, sendo esses os processos avaliados no presente trabalho.

3.2.1 Fotólise UV

O processo de fotólise UV, ou fotólise direta, consiste na utilização de radiação ultravioleta sem o emprego de reagentes ou catalisadores para promover a degradação de compostos orgânicos. Nesse processo, a absorção da radiação pelo poluente pode resultar na quebra de ligações químicas e na formação de moléculas mais simples. Além da degradação direta dos contaminantes, a radiação UV também pode promover a quebra de ligações de outros compostos presentes na solução, gerando radicais que auxiliam indiretamente na oxidação. As lâmpadas de vapor de mercúrio de média e alta pressão estão entre as principais fontes de irradiação empregadas nesse processo (Teixeira e Jardim, 2004; Araújo et al., 2016; Córdova, 2019; Anisuzzaman et al., 2022; Oliveira, 2024).

Atualmente, além do processo de Fotólise com irradiação por meio de lâmpada UV, estudos têm se desenvolvido também para a aplicação da Fotólise Solar, como forma de reduzir os custos associados a gastos com energia elétrica e possibilitar a compreensão da degradação de micro poluentes em condições ambientais naturais (Lima, 2024).

3.2.2 Processo UV/ H₂O₂

O processo UV/H₂O₂ consiste em um POA no qual a geração de radicais hidroxila ocorre por meio da fotólise do peróxido de hidrogênio sob irradiação UV. Para cada molécula de H₂O₂ fotolisada, ocorre a formação de dois radicais hidroxila, devendo-se considerar também a possibilidade de recombinação desses radicais (Teixeira e Jardim, 2004; Araújo et al., 2016; Nascimento et al., 2017; Oliveira, 2024).

Ambos os caminhos de reação estão representados nas equações (1) e (2):



A associação entre peróxido de hidrogênio e radiação UV apresenta comportamento sinérgico, aumentando a geração de radicais hidroxila e, consequentemente, o potencial oxidante do processo quando comparado à aplicação isolada de cada componente (Teixeira e Jardim, 2004; Araújo et al., 2016).

A eficiência do processo UV/H₂O₂ é influenciada por diferentes fatores operacionais, incluindo a concentração de peróxido de hidrogênio, o tempo de irradiação, a intensidade da radiação UV e as características do efluente tratado. Dessa forma, a definição adequada dessas condições é fundamental para maximizar a geração de radicais hidroxila e o desempenho do processo (Miklos et al., 2018; Zambrano et al., 2024).

O processo UV/H₂O₂ apresenta algumas vantagens operacionais em relação a outros POAs, como Fenton, Foto-Fenton e Eletro-Fenton, destacando-se a ausência de geração de lodo e a possibilidade de operação em faixas de pH menos restritivas. Essas características podem simplificar a operação do sistema e reduzir a necessidade de etapas adicionais de tratamento (Araújo, 2016; Córdova, 2019; Imoski, 2023; Zambrano et al., 2024).

Entretanto, concentrações excessivas de H₂O₂ podem reduzir a eficiência do processo devido à recombinação e consumo não produtivo de radicais hidroxila, além de gerar toxicidade associada à presença de residual de peróxido de hidrogênio no efluente tratado. (Teixeira e Jardim, 2004; Boczkaj e Fernandes, 2017; Miklos et al., 2018; Zambrano et al., 2024).

3.2.3 Aplicações de POAs a resíduos contendo corantes

O uso de POAs no tratamento de resíduos e efluentes contendo corantes tem sido amplamente reportado na literatura. Djebbar et al. (2012) realizaram um estudo comparativo entre fotólise direta e diferentes POAs, incluindo a metodologia UV/H₂O₂ para a degradação do verde de bromocresol, obtendo 4,15% de remoção com fotólise direta e 85,4% com UV/H₂O₂, considerando 50 minutos de irradiação para ambas as técnicas.

Aplicações como as de Joseph et al. (2017) e Mohammed et al. (2021) avaliaram fotólise direta e UV/ H_2O_2 na remoção do corante azul de metileno, obtendo remoções do corante acima de 96,5%. Contudo, para atingir essa eficiência, a fotólise direta demandou um tempo de irradiação de 5 horas, enquanto o processo UV/ H_2O_2 alcançou o mesmo desempenho em apenas 60 minutos. Bhatti e Sugha (2022) obtiveram 15% de remoção por meio da fotólise direta e 91% para UV/ H_2O_2 , considerando 90 minutos de irradiação.

Estudos realizados por Galaviz (2024), buscaram avaliar a remoção do verde de bromocresol contido em efluente sintético por meio do processo Foto-Fenton, obtendo uma média de 86% de remoção para 16 testes realizados.

É importante ressaltar que a comparação da eficiência de remoção de corantes por fotólise e UV/ H_2O_2 não deve se basear exclusivamente nos percentuais de degradação obtidos, mas também considerar diferenças nos parâmetros operacionais, como potência da lâmpada, tempo de irradiação, concentração e consumo de reagentes, bem como a complexidade molecular dos corantes submetidos ao tratamento.

Apesar dos elevados percentuais de remoção reportados para diferentes corantes, grande parte desses estudos foi realizada com soluções sintéticas ou efluentes industriais. Ainda são escassos estudos que demonstrem elevada eficiência de descoloração em resíduos laboratoriais reais, cuja composição é mais complexa e variável.

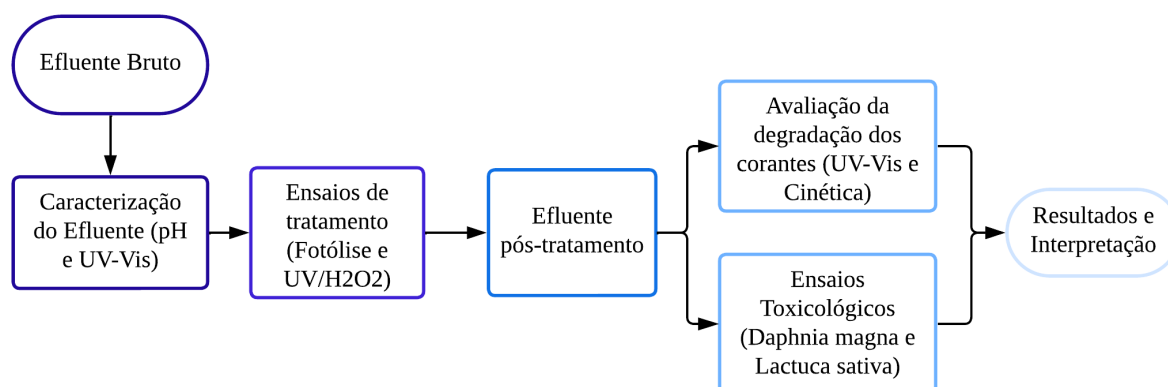
Dessa forma, a avaliação comparativa dos processos de fotólise UV e UV/ H_2O_2 aplicados ao tratamento de efluentes laboratoriais contendo corantes indicadores pode contribuir para a compreensão da influência dos parâmetros operacionais sobre a degradação desses compostos, bem como para a identificação de alternativas de tratamento compatíveis com a realidade de laboratórios de ensino e pesquisa.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho busca, por meio da aplicação de fotólise UV e UV/ H_2O_2 , verificar a eficiência desses processos no tratamento do efluente gerado pelo equipamento analítico denominado destilador Kjeldahl. Nesta seção, são

apresentados os reagentes e instrumentos utilizados nas análises, bem como os métodos adotados.

Figura 4 - Fluxograma metodológico



Fonte: Autor (2026).

4.1 SISTEMA EXPERIMENTAL - REATOR DE BANCADA (UV E UV/H₂O₂)

O reator fotoquímico de bancada, representado na Figura 5, é do tipo batelada, com dupla parede de vidro para refrigeração, e volume útil de 700 mL. A lâmpada UV policromática de vapor de mercúrio composta por um tubo de quartzo, com potência de 125W, é posicionada no interior do reator, imersa no efluente. O sistema contém uma chapa de agitação magnética (marca Thelga, modelo TMA 10-C), para homogeneização, e um sistema de refrigeração e recirculação de água (marca MyLabor, modelo SSDu-60L) responsável por manter a temperatura do sistema em 25°C, uma vez que a lâmpada UV promove aumento significativo da temperatura.

Figura 5 - Reator Fotoquímico de bancada



Fonte: Autor (2026).

4.2 EFLUENTE DO ESTUDO – METODOLOGIA KJELDAHL

O efluente alvo deste estudo é proveniente do equipamento da marca VELP Scientifica, modelo UDK159, empregado na determinação de nitrogênio amoniacal e orgânico em amostras aquosas pelo método Kjeldahl (Figura 6), o qual envolve etapas de digestão, destilação e titulação da amônia. Durante a etapa de destilação, a amônia liberada é absorvida em solução de ácido bórico, sendo posteriormente titulada com solução padrão de ácido clorídrico 0,1 N, na presença dos indicadores ácido-base vermelho de metila e verde de bromocresol. Dessa forma, com base nos reagentes utilizados ao longo do processo, o efluente avaliado é composto por: água, ácido bórico, amônia residual, corantes indicadores e o titulante ácido clorídrico.

Figura 6 - Equipamento empregado na metodologia Kjeldahl (à esquerda) e efluente bruto (à direita).



Fonte: Autor (2026).

O resíduo estudado foi gerado em atividades de pesquisa e ensino conduzidas no Laboratório Integrado de Meio Ambiente (LIMA), do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC. Este foi mantido acondicionado em bombona conectada aos tubos de saída do equipamento, abrigada da luz, e em temperatura ambiente.

É importante salientar que as soluções padrão de vermelho de metila e verde de bromocresol preparadas para o processo Kjeldahl, são descartadas na mesma bombona. Também cabe destacar que esta análise é realizada de forma sazonal no laboratório e, portanto, o efluente analisado encontrava-se acondicionado por um período de aproximadamente seis meses após a sua geração, o que pode ter ocasionado alterações em suas características.

Uma das formas de caracterização do efluente foi a medição inicial do pH, utilizando-se um pHmetro da marca Del Lab modelo DLA-PH. A medida desse parâmetro é essencial, uma vez que este interfere na forma em que as moléculas dos corantes se encontram dissociadas na amostra (protonada ou desprotonada).

Outro parâmetro fundamental de caracterização do efluente consistiu na realização da varredura UV-Vis, utilizando um espectrofotômetro da marca Bel Photonics modelo UV-M51, como forma de determinação do espectro de absorção dos corantes presentes na amostra. A varredura UV-Vis foi realizada na faixa de

comprimento de onda de 190-800 nm, uma vez que essa faixa engloba as bandas de absorção dos corantes vermelho de metila (VM) e verde de bromocresol (VB).

4.2.1 Soluções padrão de corantes e ácido bórico

Para as análises de varredura UV-Vis e caracterização do efluente, foram preparadas soluções padrão de Ácido Bórico (AB), Vermelho de Metila (VM) + Ácido Bórico (AB) e Verde de Bromocresol (VB) + Ácido Bórico (AB), bem como uma solução contendo a mistura dos três compostos (Figura 7). As soluções padrão foram submetidas à varredura UV-Vis e comparadas à varredura do efluente bruto.

A solução padrão de vermelho de metila foi preparada a partir de reagente padrão comercial da marca ANIDROL. A solução padrão de verde de bromocresol foi preparada a partir de reagente padrão comercial da marca NEON. A solução padrão de ácido bórico foi preparada a partir de reagente padrão comercial da marca NEON. O ajuste de pH das soluções foi feito com solução de NaOH 3M, e as soluções padrão dos corantes foram preparadas em etanol absoluto.

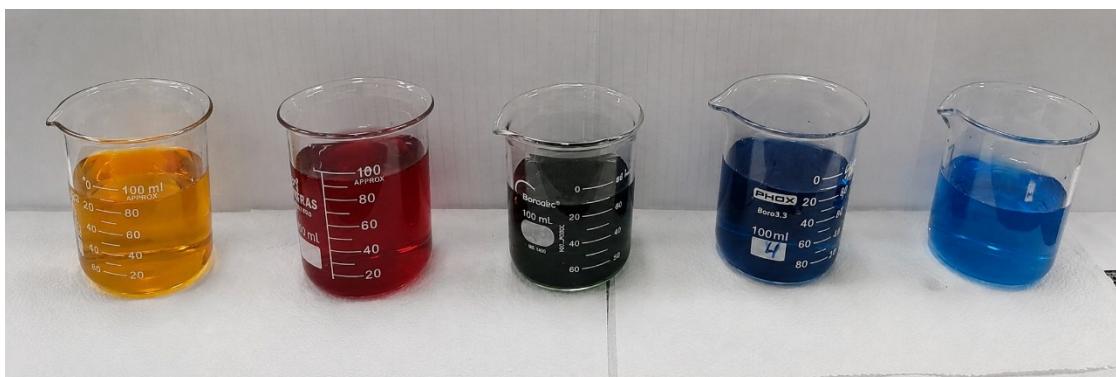
Figura 7 - Soluções padrão (da esquerda para a direita): Ácido Bórico (AB), (VB + AB), (VM + AB) e Mistura (VM + VB + AB)



Fonte: Autor (2026).

Em seguida, a solução contendo a mistura dos corantes e Ácido bórico, bem como a solução de Vermelho de Metila e Verde de Bromocresol tiveram o pH ajustado para um valor similar ao do efluente bruto ($\text{pH}=6,4 \pm 0,01$), sendo posteriormente realizada análise comparativa dos espectros UV-Vis desses analitos com o efluente bruto. As soluções ajustadas estão representadas na Figura 8.

Figura 8 - Soluções dos corantes (da esquerda para a direita): VM (pH=6,4 ± 0,01) Mistura (pH=4,0 ± 0,01), Mistura (pH=6,4 ± 0,01), VB (pH=6,4 ± 0,01) e Efluente Bruto (pH=6,4 ± 0,01)



Fonte: Autor (2026).

4.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.3.1 Delineamento experimental

Uma vez que a avaliação preliminar do pH do efluente apresentou valor próximo da neutralidade, optou-se por não realizar estudos envolvendo diferentes faixas de pH, visto que isso implicaria no gasto de reagentes para correção dos valores, e na geração de um novo tipo de resíduo, com características distintas.

Também não foram realizados testes de diluição, optando-se por trabalhar com o efluente bruto, para que não ocorresse o aumento dos volumes de resíduo gerados após o tratamento.

4.3.2 Soluções de trabalho de peróxido de hidrogênio (H₂O₂)

O peróxido de hidrogênio (H₂O₂) utilizado nos ensaios foi obtido em forma de solução aquosa com concentração de 35% (m/m), de grau analítico, da fabricante NEON. As soluções de trabalho foram preparadas a partir da solução comercial, em que os volumes requeridos de H₂O₂ foram calculados a partir da equação de diluição (3):

$$C1.V1 = C2.V2 \quad (3)$$

Onde, C1 equivale à concentração do reagente (solução comercial), V1 o volume requerido de reagente (solução comercial), C2 a concentração alvo da solução final (efluente + H₂O₂) e V2 o volume de solução desejada (efluente + H₂O₂).

Considerando o volume de trabalho do reator de 700 mL, os volumes de solução padrão de peróxido utilizados para o preparo das soluções utilizadas nos ensaios, de concentrações finais de 30, 45 e 60 mg/L foram, respectivamente, 60, 90 e 120 µL de H₂O₂.

4.3.3 Aplicação das técnicas de Fotólise UV e UV/ H₂O₂

Após a homogeneização inicial do efluente, aguardou-se um período de 10 minutos para a sedimentação de eventuais sólidos suspensos presentes na amostra. Esse procedimento foi realizado para minimizar interferências nas análises espectrofotométricas por UV-Vis do efluente tratado, uma vez que a presença de partículas em suspensão pode comprometer a qualidade da varredura espectral.

Posteriormente, uma alíquota do efluente foi retirada da bombona de acondicionamento para a determinação do pH. Em seguida, 700 mL do efluente foram medidos em uma proveta e transferidos para o reator. Após essa etapa, foram acionados o sistema de agitação magnética e o sistema de refrigeração.

Para o processo UV/H₂O₂, a partir da adição do volume de peróxido nas concentrações de estudo e da ativação da lâmpada UV, foi iniciado o cronômetro para o tempo de 1 hora de irradiação. Para o processo de fotólise, o cronômetro foi iniciado a partir da ativação da lâmpada UV, sem adição do H₂O₂.

Durante o ensaio, foram retiradas alíquotas de 10 mL do efluente nos intervalos de tempo: 2, 4, 6, 8, 10, 12, 15, 20, 30, 40, 50 e 60 minutos (Figura 9).

Figura 9 - Reator em funcionamento (esquerda) e alíquotas de efluente retiradas durante os ensaios (direita).



Fonte: Autor (2026).

4.4 MÉTODOS ANALÍTICOS

4.4.1 Avaliação da degradação dos corantes

O efluente bruto, bem como as alíquotas geradas pela execução dos ensaios de fotólise UV e para cada uma das concentrações de H_2O_2 , foram submetidas a varredura UV-Vis. A partir da análise das bandas de absorção dos corantes, foi possível avaliar a remoção destes analitos para cada combinação de parâmetros operacionais. O cálculo da eficiência de remoção foi realizado a partir das médias dos valores de absorvância medidos no comprimento de onda de 615 nm ($\lambda_{\text{máx}}$ dos corantes), obtidos em duplicata para os tempos avaliados (0-60 minutos), comparativamente ao efluente bruto. Para o cálculo da remoção, foi utilizada a Equação 4:

$$\text{Remoção (\%)} = \frac{A_0 - A_t}{A_0} \times 100 \quad (4)$$

Onde, Remoção (%) corresponde à remoção de corante calculada, A_0 corresponde à absorvância medida do efluente bruto ($\lambda = 615$ nm) e A_t corresponde ao valor da absorvância medida para a alíquota do tempo (t), também para $\lambda = 615$ nm (banda de absorção máxima do corante).

A cinética de reação foi determinada ajustando os dados experimentais de concentração do corante ao longo do tempo, para fotólise UV e UV/H₂O₂ nas concentrações de peróxido estudadas, a modelos cinéticos de diferentes ordens e verificou-se qual apresentou o melhor ajuste estatístico (coeficiente de determinação R^2),

Uma vez que, para trabalhos relacionados à aplicação de fotólise e foto catálise é comum observar comportamentos de pseudo-primeira ordem (Fassi, 2012), foram consideradas as Equações 5 e 6:

Cinética de ordem zero:

$$A_t = A_0 - kt \quad (5)$$

Cinética de pseudo-primeira ordem:

$$\ln\left(\frac{A_t}{A_0}\right) = -k_{ap}t \quad (6)$$

Onde A_0 corresponde à absorvância observada na varredura UV-Vis do efluente bruto ($\lambda = 615$ nm) e A_t corresponde ao valor da absorvância medida em UV-Vis para a alíquota do tempo (t), também para $\lambda = 615$ nm (banda de absorção máxima do efluente bruto). A constante k corresponde à inclinação da reta e t representa o tempo de irradiação.

4.5 ENSAIOS TOXICOLÓGICOS

Embora os processos oxidativos avançados tenham como objetivo a remoção dos corantes, sua aplicação pode resultar na formação de subprodutos intermediários com potencial toxicidade, decorrentes da quebra parcial das moléculas originais. Além

disso, no caso do processo UV/H₂O₂, a presença de peróxido de hidrogênio residual após o tratamento também pode contribuir para a toxicidade do efluente. Nesse contexto, a avaliação ecotoxicológica é fundamental para verificar não apenas a eficiência da remoção dos contaminantes, mas também os possíveis efeitos tóxicos associados aos produtos de degradação e reagentes remanescentes, além de constituir uma ferramenta complementar importante para a comparação entre os processos empregados.

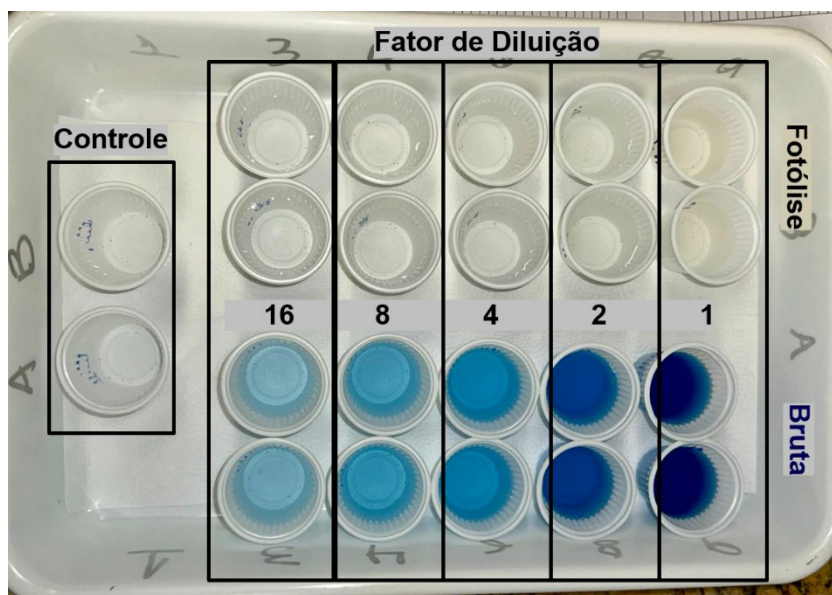
4.5.1 Teste de toxicidade aguda com *Daphnia magna*

Os organismos de *Daphnia magna* utilizados nos ensaios foram cultivados no Laboratório de Toxicologia (LABTOX/UFSC) de acordo com as normas ABNT NBR 12713 (2022) e ISO 6341 (2012), em meio M4, sob condições controladas de temperatura ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) e fotoperíodo (16h de luz). A qualidade dos organismos foi verificada periodicamente por meio de testes de sensibilidade utilizando dicromato de potássio (K₂Cr₂O₇).

Os ensaios de toxicidade aguda com *D. magna* foram realizados também de acordo com as normas ABNT NBR 12713 (2022) e ISO 6341 (2012). Neonatos com idade entre 2 e 26 h foram expostos, por 48 h, às concentrações de 6,25%, 12,5%, 25%, 50% e 100% das amostras (que correspondem, respectivamente, aos fatores de diluição: 16, 8, 4, 2 e 1), além do controle contendo apenas meio ISO. Os testes foram conduzidos em recipientes contendo 25 mL de solução-teste e 10 organismos por unidade experimental, em duplicata para cada concentração.

A Figura 10 apresenta um registro fotográfico dos ensaios de toxicidade aguda realizados com as amostras bruta e tratada por fotólise UV, incluindo as diferentes concentrações avaliadas e o controle.

Figura 10 - Ensaio de toxicidade aguda com *D. magna*



Fonte: Autor (2026).

Antes da exposição, o pH das soluções foi verificado para garantir conformidade com os critérios estabelecidos pelas normas (faixa tolerável entre 5 e 9). Para cada amostra, foram realizados dois ensaios independentes, sendo a toxicidade avaliada com base na imobilidade dos organismos ao final do período de exposição (quantificação de organismos imóveis).

Os resultados foram expressos por meio do Fator de Toxicidade (FT), definido como a menor diluição da amostra que não provoca efeito tóxico agudo aos organismos-teste nas condições e no período de exposição estabelecidos.

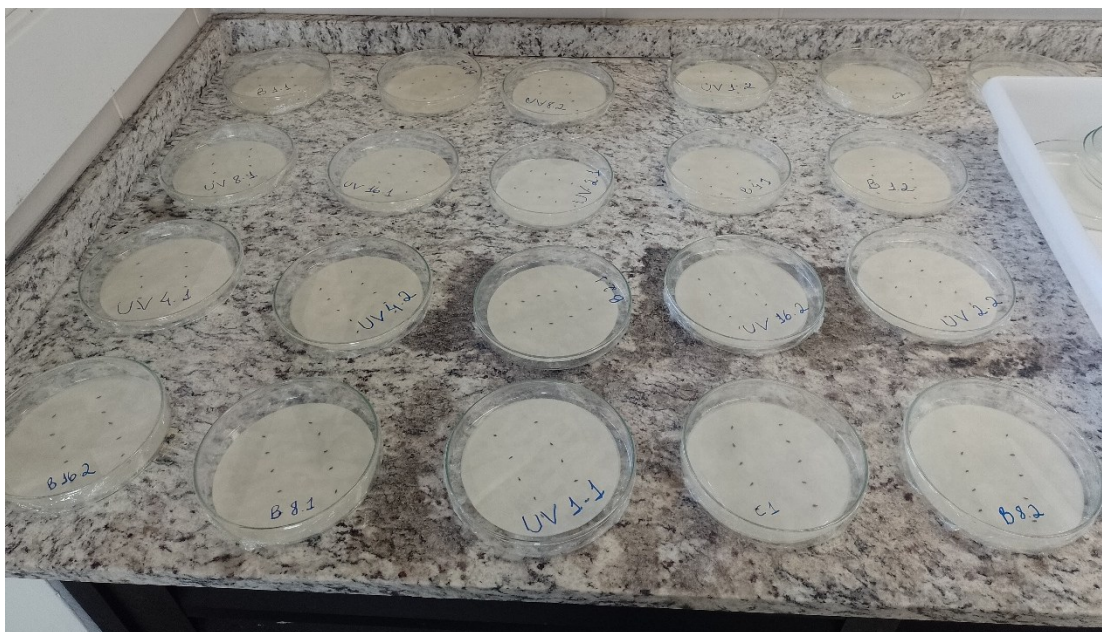
4.5.2 Teste de toxicidade com *Lactuca sativa*

Os ensaios de fitotoxicidade foram realizados com sementes de *Lactuca sativa*, seguindo as recomendações das Regras para Análise de Sementes (RAS) (BRASIL, 2009). As sementes foram dispostas em placas de Petri contendo duas folhas de papel filtro (porosidade de 8 μm) como substrato e expostas às amostras nas concentrações de 6,25%, 12,5%, 25%, 50% e 100%, além de um controle contendo apenas água de osmose reversa.

Os testes foram realizados em duplicata, com 10 sementes por réplica e 5 mL de solução por unidade experimental. As placas permaneceram em temperatura

ambiente (18–20 °C) durante sete dias, mantendo-se a umidade do substrato ao longo de todo o período experimental, conforme mostrado na Figura 11.

Figura 11 - Teste de fitotoxicidade com sementes de *Lactuca sativa*



Fonte: Autor (2026).

Ao final do ensaio, foram avaliados o percentual de germinação e o comprimento da radícula das plântulas. Os dados de comprimento radicular foram submetidos à análise de variância (ANOVA de uma via), considerando as diferentes concentrações avaliadas. O nível de significância adotado foi de 5% ($p < 0,05$).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERIZAÇÃO DO EFLUENTE

5.1.1 Medição do pH

As análises de pH, realizadas tanto no efluente bruto quanto nas alíquotas finais (60 min) dos ensaios, forneceram os valores apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores médios de pH aferidos do efluente bruto e das alíquotas no tempo final (60 min)

Amostra	Concentração de peróxido (mg/L)	pH
Bruta	-	6,49 ± 0,01
Fotólise	0 (duplicata)	6,39 ± 0,10
UV-H ₂ O ₂	30 (duplicata)	6,45 ± 0,05
	45 (duplicata)	6,37 ± 0,07
	60 (duplicata)	6,41 ± 0,01

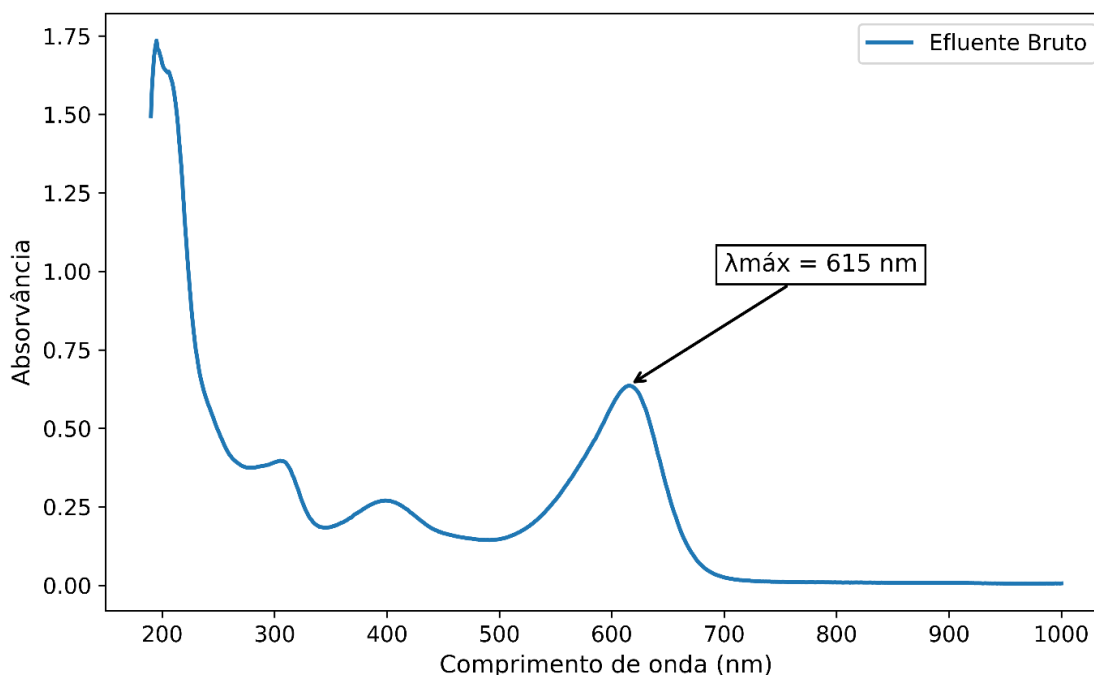
Fonte: Autor (2026).

Os valores da tabela indicam que o processo não promoveu alterações significativas no pH do sistema. Esse resultado é relevante, uma vez que variações de pH influenciam diretamente as bandas de absorção dos corantes vermelho de metila e verde de bromocresol, podendo interferir na interpretação dos processos de degradação. Nesse sentido, a manutenção do pH inicial após o tratamento reforça que a redução das espécies corantes observada está associada à eficiência dos processos oxidativos aplicados, e não a alterações nas condições do meio reacional.

5.1.2 Varredura UV-Vis

Com o objetivo de investigar o comportamento espectral do efluente bruto e identificar suas principais bandas de absorção, foi obtido o espectro de varredura na região do UV-Vis, apresentado na Figura 12.

Figura 12 - Espectro de Varredura do Efluente Bruto (pH = 6,4)



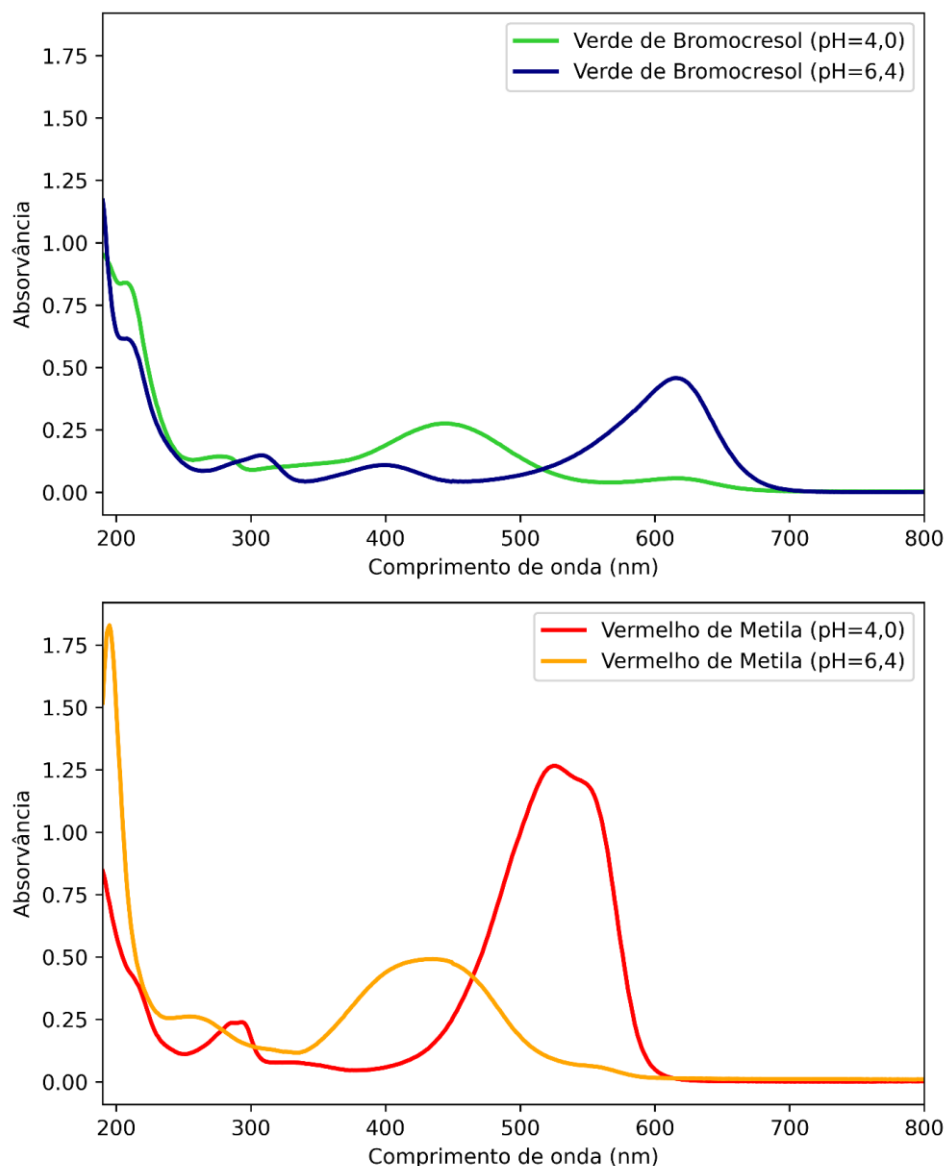
Fonte: Autor (2026).

A partir da verificação da presença de uma banda de absorção máxima em $\lambda=615$ nm para o efluente bruto, sendo essa mais pronunciada do que outras bandas características dos corantes, optou-se em escolher esse comprimento de onda para o monitoramento da remoção nas etapas posteriores.

Com o objetivo de avaliar a composição do resíduo, foi realizada a varredura espectrofotométrica de soluções padrão dos corantes vermelho de metila e verde de bromocresol, isoladamente e em mistura, preparadas em solução de ácido bórico (4% em água), de modo a simular a matriz empregada como indicador no método Kjeldahl. Todas as soluções foram avaliadas em seu pH natural e após ajuste para pH 6,4, correspondente ao pH do efluente bruto, com o objetivo de investigar a influência dessa condição nos espectros de absorção dos corantes.

A Figura 13 mostra que a banda de maior absorção do verde de bromocresol é de $\lambda_{\text{máx}} \approx 443$ nm para pH=4,0 e $\lambda_{\text{máx}} \approx 615$ nm para pH=6,4, em acordo com valores encontrados por Fassi et al. (2012). Por outro lado, a banda de maior absorção do vermelho de metila é equivalente a $\lambda_{\text{máx}} \approx 525$ nm para pH=4,0 e $\lambda_{\text{máx}} \approx 432$ nm para pH=6,4, comportamento que se assemelha ao encontrado por Zheng et al. (2016)

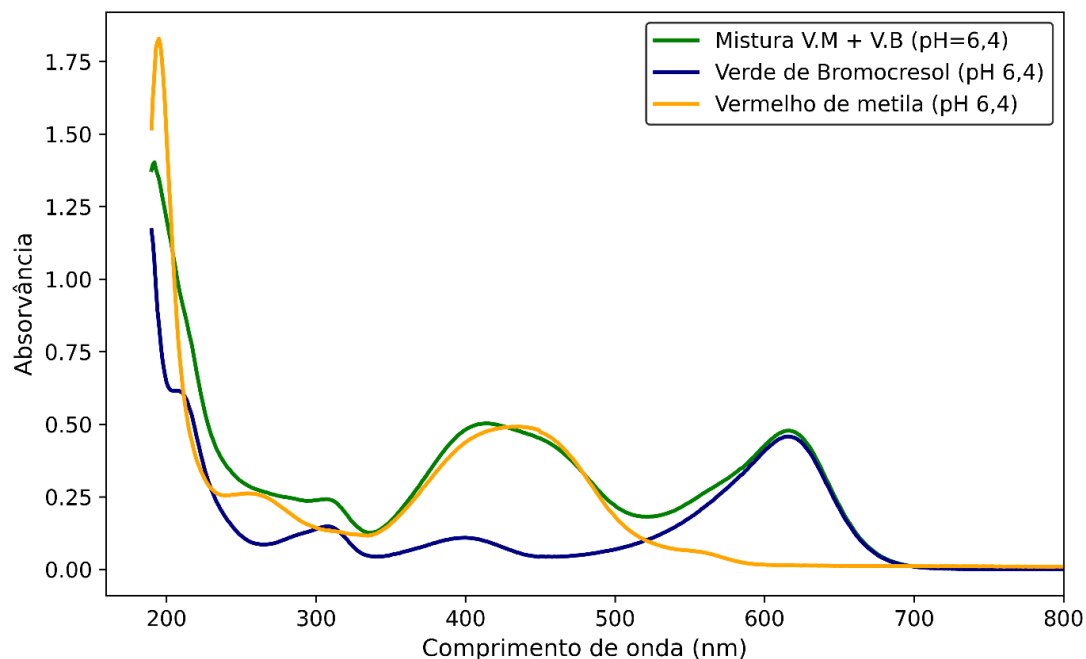
Figura 13 - Espectros de Varredura das soluções padrão de V.B e V.M (pH = 4,0 e pH = 6,4)



Fonte: Autor (2026).

De maneira complementar, a Figura 14 apresenta a comparação entre os espectros da mistura dos corantes (VM e VB) em ácido bórico (pH = 6,4) e os espectros das soluções padrão individuais, igualmente ajustadas para o pH do efluente bruto. A partir dessa sobreposição espectral, observa-se que as bandas presentes na mistura correspondem às regiões de absorção características de cada corante isoladamente, permitindo identificar a contribuição individual de cada espécie para o espectro global da solução.

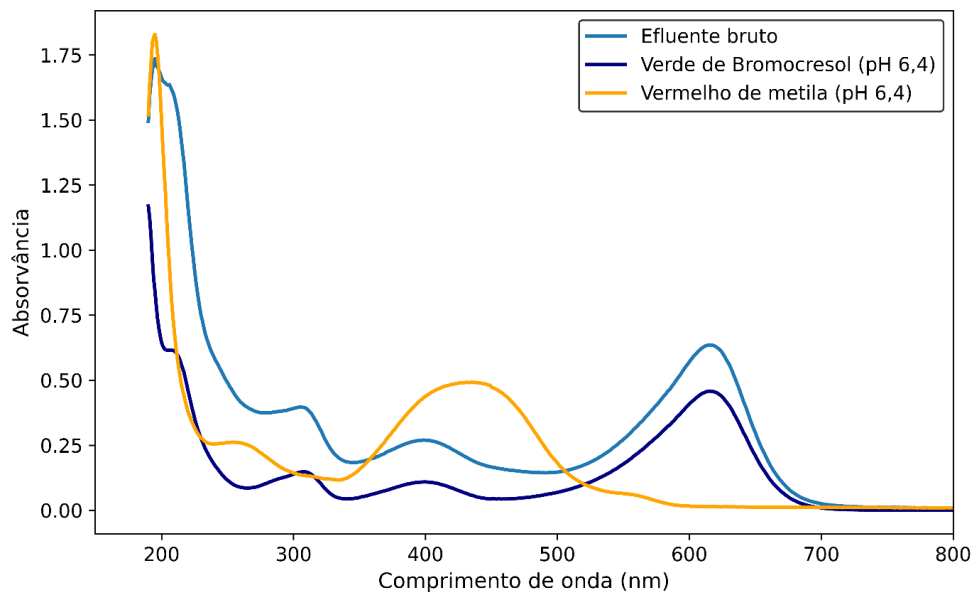
Figura 14 - Espectros de Varredura das soluções padrão de V.B e V.M (pH = 6,4) e Mistura (V.B + V.M) (pH = 6,4)



Fonte: Autor (2026).

A análise comparativa entre as bandas de absorção dos corantes e o espectro de varredura do efluente bruto, apresentada na Figura 15, sugere a possível ocorrência de degradação parcial do vermelho de metila. Isso se deve ao fato da banda de absorção máxima do efluente bruto ($\lambda_{\text{máx}} = 615 \text{ nm}$) se aproximar da banda predominante do verde de bromocresol em pH ajustado para 6,4, indicando uma maior contribuição deste corante no espectro observado, além da ausência da banda alargada característica do vermelho de metila ($\lambda_{\text{máx}} = 432 \text{ nm}$).

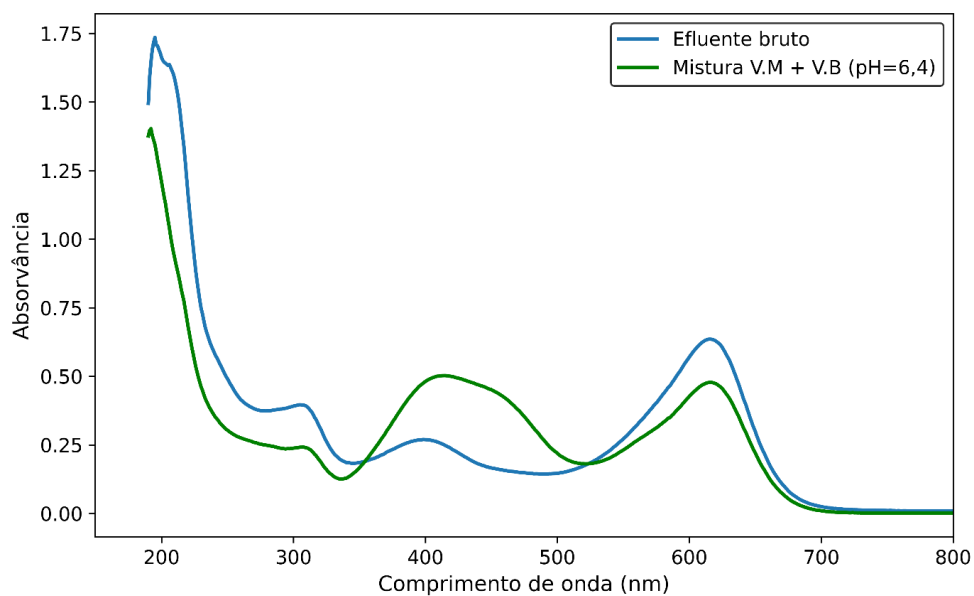
Figura 15 - Espectro de Varredura: Efluente Bruto e soluções padrão de V.B e V.M (pH = 6,4)



Fonte: Autor (2026).

Os resultados foram reforçados por meio da análise comparativa entre o espectro de varredura do efluente bruto e o espectro da solução padrão da mistura dos corantes (VM e VB) em ácido bórico, ajustada para pH 6,4, correspondente ao mesmo valor do efluente bruto. Essa comparação é apresentada na Figura 16.

Figura 16 - Varredura Efluente Bruto x Mistura V.M + V.B (pH = 6,4)



Fonte: Autor (2026).

A análise conjunta das Figuras 15 e 16 reforça a ideia de que a banda de absorção associada ao vermelho de metila encontra-se ausente no efluente bruto. Considerando-se que o efluente permaneceu acondicionado por cerca de seis meses antes das análises, devido à sazonalidade da utilização do equipamento, a ausência da banda de absorção do vermelho de metila é um indicativo de que ele esteja parcialmente degradado no efluente bruto. Sendo assim, os ensaios de degradação posteriores foram conduzidos considerando predominantemente os mecanismos associados à remoção do verde de bromocresol.

5.2 AVALIAÇÃO DA DEGRADAÇÃO DOS CORANTES

A avaliação da degradação dos corantes presentes no efluente foi realizada por espectroscopia UV-Vis, para o comprimento de onda de 615 nm, correspondente à banda de absorção máxima identificada durante a caracterização do resíduo bruto. O monitoramento da absorvância ao longo do tempo permitiu acompanhar a remoção dos corantes indicadores e comparar a eficiência dos processos de fotólise UV e UV/H₂O₂. A comparação visual do efluente bruto e tratado é mostrada na Figura 16.

Figura 17 - Aspecto visual do efluente antes e após o tratamento por fotólise.

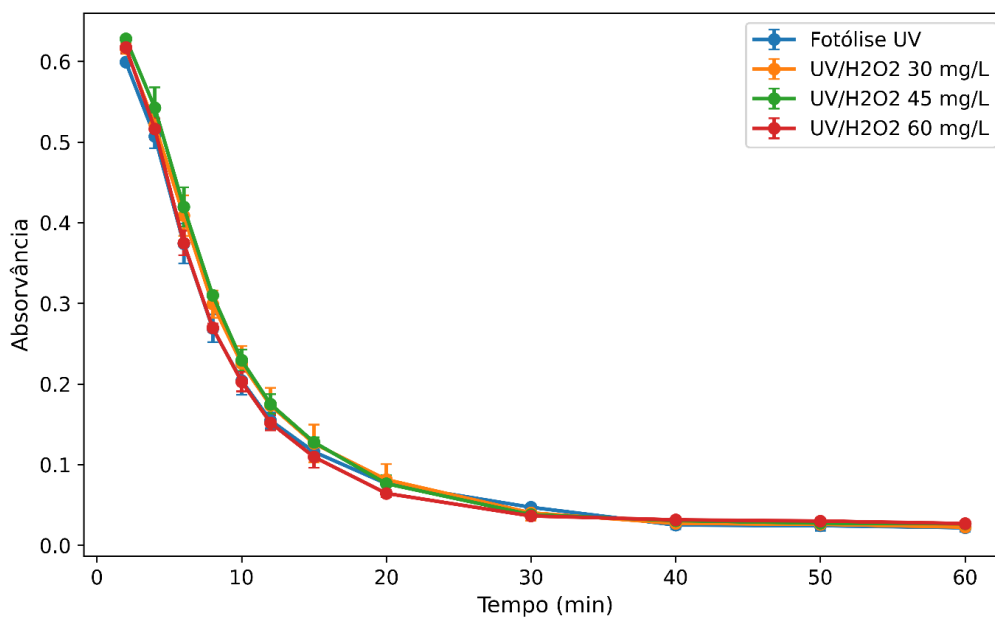


(Da esquerda para a direita: Efluente bruto, alíquotas retiradas de 2 a 60 min e efluente pós-tratamento)

Fonte: Autor (2026).

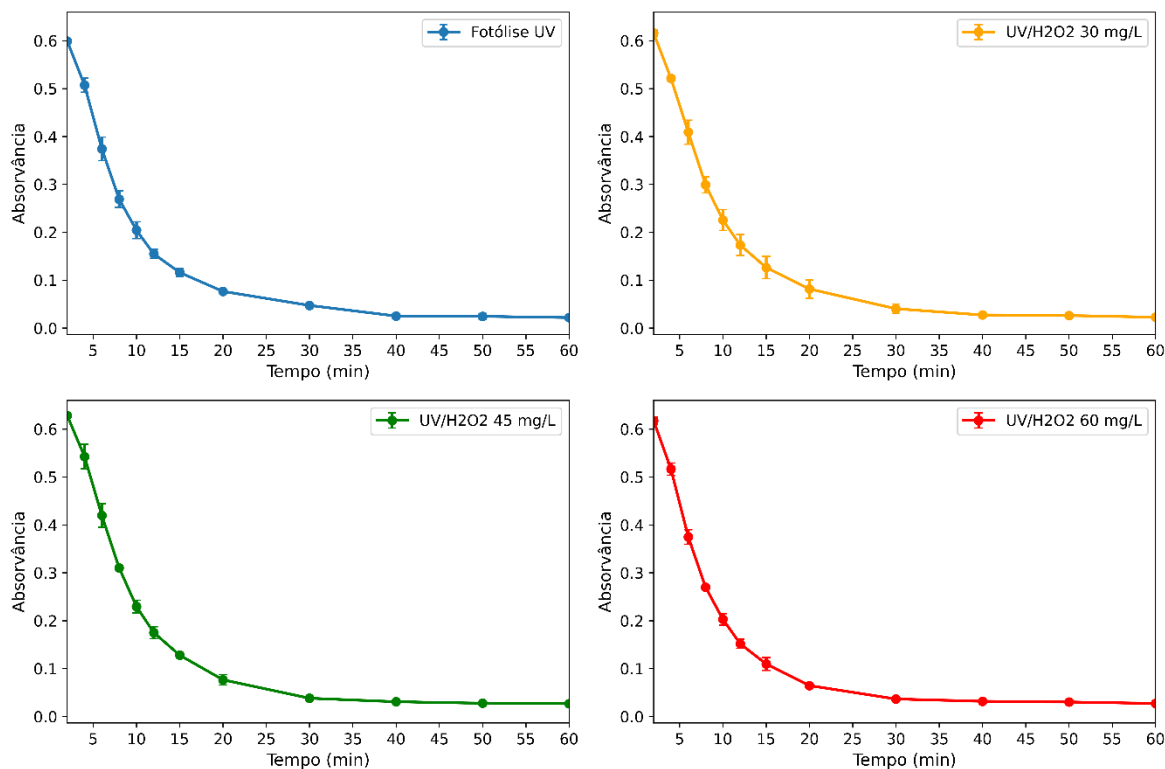
A partir das Figuras 18 e 19, é possível observar que as curvas de remoção do corante se assemelham para os tratamentos de fotólise UV e UV/H₂O₂, sendo notável um decaimento ligeiramente mais acentuado para o UV/H₂O₂ na concentração de 60 mg/L, aos 20 minutos, e aproximação de todas as curvas a partir dos 35 minutos.

Figura 18 - Comparativo das curvas médias do decaimento da absorvância do corante ($\lambda = 615$ nm) para os tratamentos: Fotólise UV e UV/H₂O₂ nas concentrações 30, 45 e 60 mg/L, respectivamente.



Fonte: Autor (2026).

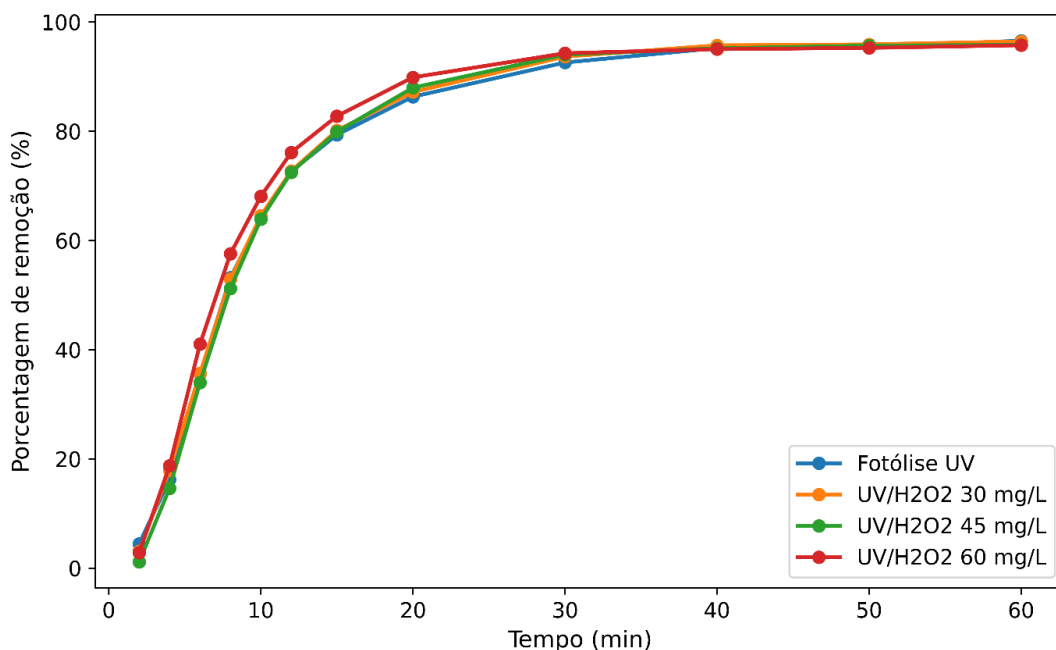
Figura 19 - Curvas médias individuais do decaimento da absorvância do corante ($\lambda = 615$ nm) para os tratamentos: Fotólise UV e UV/H₂O₂ nas concentrações 30, 45 e 60 mg/L, respectivamente.



Fonte: Autor (2026).

A Figura 20 representa as porcentagens de remoção em termos de absorvância para a banda de absorção máxima do efluente bruto ($\lambda_{\text{máx}} = 615 \text{ nm}$).

Figura 20 - Curvas de porcentagem de remoção (%) em termos de absorvância no comprimento de onda máximo do corante ($\lambda = 615 \text{ nm}$) para cada método.



Fonte: Autor (2026).

Em concordância com os resultados apresentados na Figura 18, a Figura 20 evidencia que o processo UV/H₂O₂, na concentração de 60 mg/L de peróxido de hidrogênio, apresentou a maior porcentagem de remoção durante os 20 minutos iniciais de reação. Em seguida, as demais concentrações de peróxido e a fotólise alcançam o mesmo platô ao redor de 40 minutos de reação. A partir do comportamento da curva, pôde-se concluir que o aumento do tempo de irradiação não promoveria maiores porcentagens de remoção.

A Tabela 2 apresenta uma síntese dos principais resultados obtidos para cada condição experimental, permitindo comparar a remoção observada nos tempos intermediários e ao final do tratamento.

Tabela 2 - Porcentagens médias de remoção de corante para cada método nos tempos de 20 e 60 minutos de irradiação (n=2)

Processo	Remoção aos 20 min (%)	Remoção aos 60 min (%)
Fotólise (0 mg/L H ₂ O ₂)	86,31%	96,57%
UV/H ₂ O ₂ (30 mg/L H ₂ O ₂)	87,18%	96,44%
UV/H ₂ O ₂ (45 mg/L H ₂ O ₂)	87,96%	95,80%
UV/H ₂ O ₂ (60 mg/L H ₂ O ₂)	89,86%	95,73%

Fonte: Autor (2026).

Dessa forma, nas condições avaliadas, a adição de peróxido de hidrogênio promoveu uma aceleração da degradação dos compostos cromóforos durante os minutos iniciais do processo, porém não resultou em aumento expressivo da remoção final após 60 minutos de tratamento.

A partir da análise da cinética (Figura 21), cujos resultados estão sintetizados na Tabela 3, observou-se que todos os modelos apresentaram comportamento compatível com o modelo cinético de pseudo-primeira para a faixa de tempo que apresenta comportamento linear (0 a 20 minutos), considerando o melhor ajuste matemático (R^2).

Tabela 3 - Parâmetros cinéticos (k e R^2) obtidos para diferentes ordens de reação nos tratamentos por Fotólise UV e UV/H₂O₂ em diferentes concentrações, para intervalos de tempo de 0 a 20 minutos de irradiação

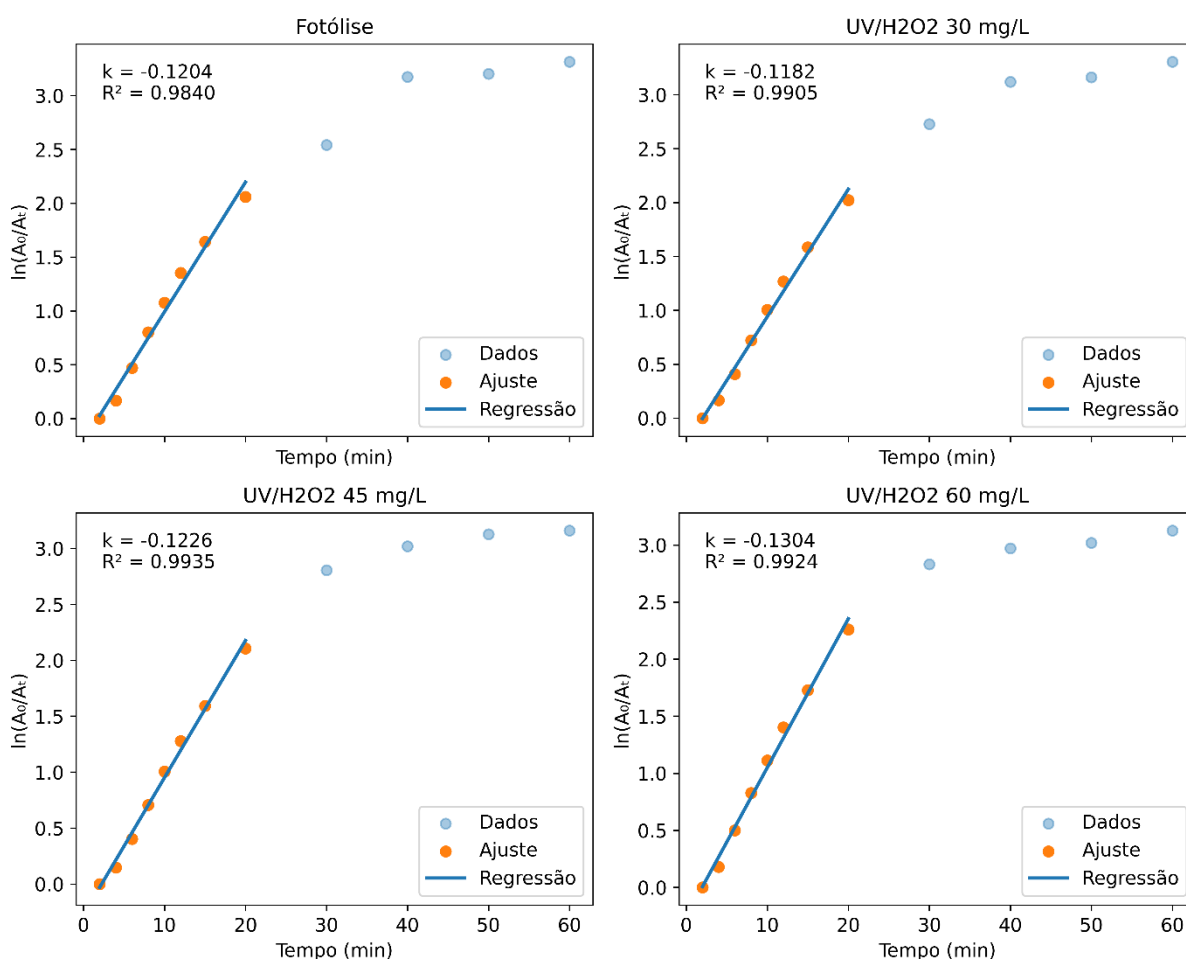
Processo	Modelo testado	k (min ⁻¹)	R ²
Fotólise UV	Ordem zero	0,0297	0,8667
	Pseudo-primeira ordem	0,1204	0,9840
UV/H ₂ O ₂ 30 mg/L	Ordem zero	0,0306	0,8914
	Pseudo-primeira ordem	0,1182	0,9905
UV/H ₂ O ₂ 45 mg/L	Ordem zero	0,0318	0,8969
	Pseudo-primeira ordem	0,1226	0,9935
UV/H ₂ O ₂ 60 mg/L	Ordem zero	0,0311	0,8697
	Pseudo-primeira ordem	0,1304	0,9924

Fonte: Autor (2026).

O ajuste dos dados experimentais ao modelo cinético de pseudo-primeira ordem para os processos de fotólise UV e UV/H₂O₂ indica que as velocidades de degradação foram predominantemente dependentes da concentração do corante presente no efluente. Esse comportamento sugere que a taxa de reação foi mais elevada nos estágios iniciais do tratamento, quando a concentração do corante era maior, diminuindo gradativamente à medida que essas moléculas foram consumidas.

Na fotólise UV, esse resultado está associado à disponibilidade de moléculas capazes de absorver a radiação incidente, enquanto no processo UV/H₂O₂ está relacionado à oxidação dos corantes por espécies reativas geradas pela fotólise do peróxido de hidrogênio. Assim, embora os mecanismos de degradação sejam distintos, ambos os processos apresentaram comportamento cinético semelhante, característico de reações em que a velocidade é proporcional à concentração dos compostos-alvo presentes no meio reacional.

Figura 21 - Ajuste do modelo cinético de pseudo-primeira ordem para a degradação dos corantes sob fotólise e processo UV/H₂O₂, considerando a região linear dos primeiros 20 minutos de irradiação.



Fonte: Autor (2026).

O comportamento de pseudo-primeira ordem para os processos de Fotólise UV e UV/H₂O₂ é frequentemente reportado na literatura, conforme levantado por Anisuzzaman et al. (2022). Dessa forma, apesar das diferenças de parâmetros

operacionais e composição do efluente, os resultados observados são consistentes com o comportamento cinético encontrado em estudos anteriores.

Os resultados dessa etapa também evidenciam uma vantagem relevante da fotólise UV frente ao processo UV/H₂O₂. Apesar de apresentar uma taxa inicial de degradação ligeiramente inferior ($k=0,1204 \text{ min}^{-1}$) as demais, a fotólise UV destacou-se por sua maior simplicidade operacional e atingiu a maior eficiência de remoção ao final de 60 minutos de irradiação (96,57%). Esse comportamento sugere que a adição de peróxido de hidrogênio não contribuiu de forma significativa para o desempenho final do processo, visto que a fotólise isolada foi capaz de alcançar resultados superiores ao término do tratamento. Esse resultado destaca o potencial da fotólise como uma alternativa suficientemente eficiente para promover a descoloração do efluente.

Sob a perspectiva da Química Verde, a utilização exclusiva da radiação UV elimina a necessidade de reagentes auxiliares, reduzindo o consumo de insumos químicos, os custos operacionais e a geração de resíduos secundários. Além disso, a ausência de peróxido de hidrogênio simplifica o controle operacional do processo e dispensa o monitoramento de oxidante residual no efluente tratado, minimizando riscos ambientais associados ao descarte. Tais características tornam a fotólise UV particularmente interessante para aplicações in loco em laboratórios de ensino e pesquisa, onde soluções de tratamento simples, seguras e de fácil implementação são altamente desejáveis.

5.3 RESULTADOS DOS ENSAIOS TOXICOLÓGICOS

5.3.1 Teste com *Daphnia magna*

Além da avaliação da remoção dos corantes, estudos envolvendo POAs frequentemente empregam ensaios ecotoxicológicos para investigar os efeitos dos tratamentos sobre organismos vivos. Essa abordagem fornece informações sobre possíveis alterações na toxicidade do efluente após o processo de tratamento. Nesse contexto, foram realizados ensaios com *Daphnia magna*, organismo amplamente utilizado na avaliação da toxicidade aguda de efluentes e amostras ambientais.

Os resultados dos ensaios de toxicidade aguda com *Daphnia magna* são apresentados na Tabela 4 e na Figura 22. O efluente bruto apresentou fator de toxicidade (FT) igual a 16, não sendo observado efeito de imobilidade dos organismos na concentração de 6,25%. Na concentração de 12,5%, foi observada imobilidade de aproximadamente 50% dos organismos, enquanto nas concentrações de 25%, 50% e 100%, ocorreu imobilidade total após 48h de exposição.

Tabela 4 – Resultados de toxicidade aguda em *Daphnia magna* exposta às amostras

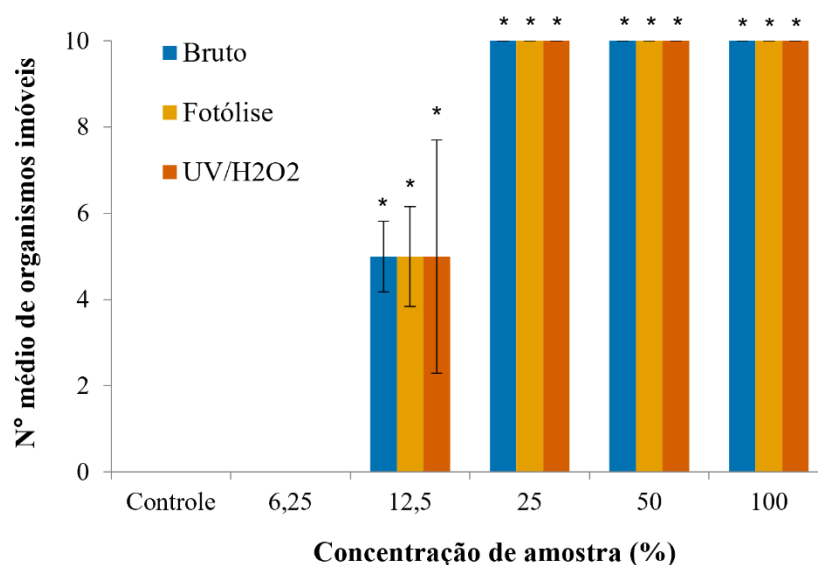
Amostra	Fator de Toxicidade
Bruto	16
Fotólise	16
UV/H ₂ O ₂	16

Fonte: Autor (2026).

As amostras submetidas aos tratamentos por fotólise UV e UV/H₂O₂ apresentaram comportamento análogo ao observado para o efluente bruto, resultando também em FT igual a 16 (Tabela 4). Em ambas as condições, não foi observada imobilidade na concentração de 6,25%, enquanto cerca de 50% dos organismos apresentaram imobilidade na concentração de 12,5%. Nas concentrações iguais ou superiores a 25%, foi observada 100% de imobilidade dos organismos.

A Figura 22 mostra a similaridade entre as respostas obtidas para as amostras bruta, tratada por fotólise e tratada por UV/H₂O₂, indicando que os processos de tratamento avaliados não promoveram alterações detectáveis na toxicidade aguda do efluente nas condições experimentais empregadas.

Figura 22 - Imobilidade de *D. magna* nas diluições das amostras analisadas. * indicam diferença significativa ($p < 0,05$) quando comparadas ao controle.

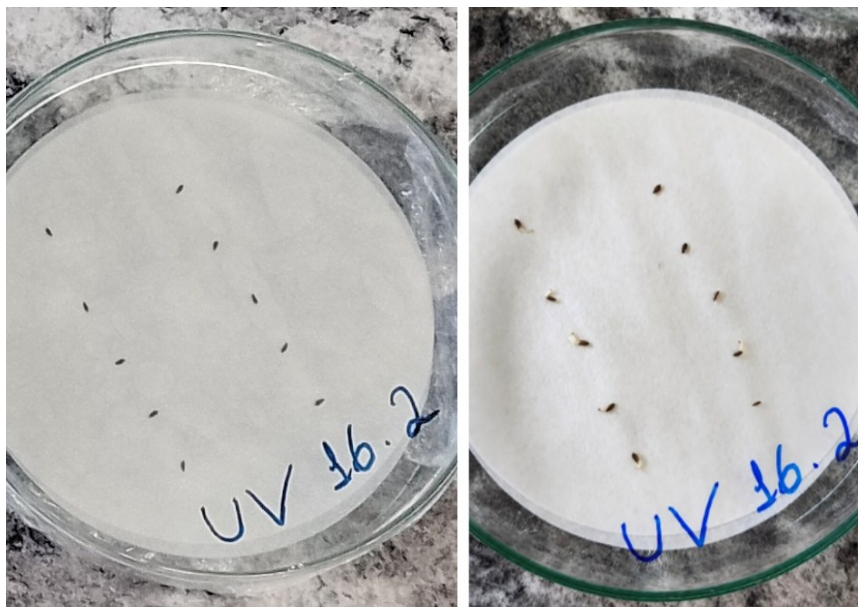


Fonte: Autor (2026).

5.3.2 Teste de germinação e crescimento com *L. sativa*

Além dos ensaios com *Daphnia magna*, foram realizados testes com *Lactuca sativa*, organismo amplamente empregado na avaliação de fitotoxicidade. Essa análise complementar permitiu investigar os efeitos dos tratamentos sobre a germinação e o desenvolvimento radicular, parâmetros frequentemente utilizados para avaliar a toxicidade de efluentes e amostras ambientais. A germinação das sementes é exemplificada na Figura 23.

Figura 23 - Sementes no início do teste (à esquerda) e sementes germinadas pós teste (à direita).



Fonte: Autor (2026).

O controle apresentou germinação de 95% para as amostras bruta e tratada por fotólise, enquanto para a amostra tratada por UV/H₂O₂ foi observada germinação de 90%. O comprimento médio das radículas nos respectivos controles foi de 0,75 cm e 0,43 cm.

Os resultados de germinação evidenciaram uma resposta dependente da concentração para todos os tratamentos avaliados. Para o efluente bruto, a germinação manteve-se semelhante ao controle na concentração de 6,25%, com 95% das sementes germinadas. Entretanto, na concentração de 12,5% ocorreu redução para 35%, não sendo observada germinação nas concentrações de 25%, 50% e 100%.

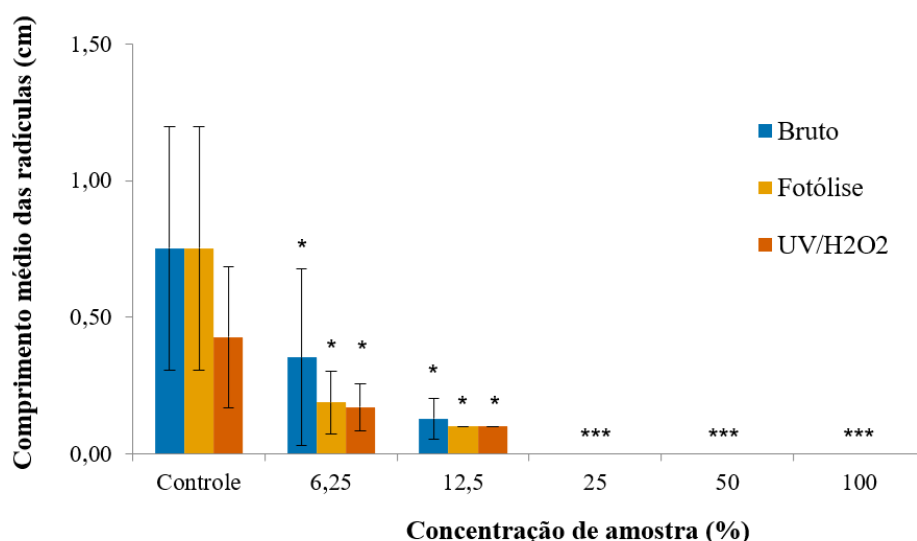
A amostra submetida à fotólise seguiu um padrão semelhante, apresentando germinação de 80% na concentração de 6,25% e de apenas 10% na concentração de 12,5%. Para a amostra tratada por UV/H₂O₂, as germinações observadas foram de 85% e 20% nas concentrações de 6,25% e 12,5%, respectivamente. Assim como observado para os demais tratamentos, não ocorreu germinação nas concentrações iguais ou superiores a 25%.

É importante destacar que os resultados de germinação foram afetados pela formação de biofilme nos efluentes pós-tratamento acondicionados para a análise de

toxicidade, que promoveu a proliferação de fungos que impediram a germinação de algumas sementes para ambos os testes das amostras de fotólise UV e UV/H₂O₂.

O crescimento radicular reproduziu o comportamento observado anteriormente para a germinação, porém com maior sensibilidade aos tratamentos avaliados (Figura 24). Para o efluente bruto, o comprimento médio das radículas reduziu de 0,75 cm no controle para 0,35 cm e 0,13 cm nas concentrações de 6,25% e 12,5%, respectivamente.

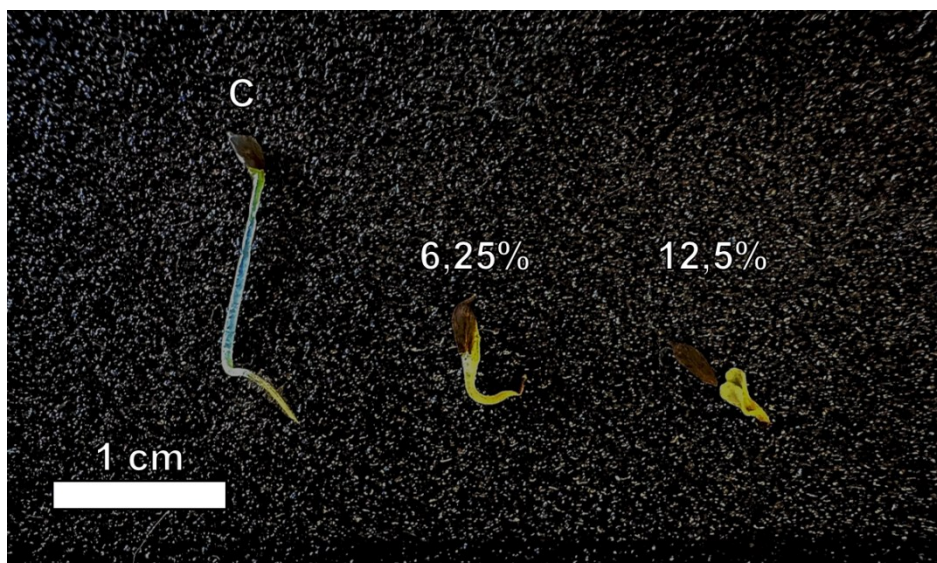
Figura 24 - Resultados do comprimento médio das radículas das sementes germinadas de *L. sativa* expostas às amostras. * indicam diferença significativa ($p < 0,05$) quando comparados ao controle.



Fonte: Autor (2026).

Na amostra tratada por fotólise, os comprimentos médios das radículas foram de 0,19 cm e 0,10 cm nas concentrações de 6,25% e 12,5%, respectivamente. Para a amostra tratada por UV/H₂O₂, foram observados comprimentos médios de 0,17 cm e 0,10 cm nas mesmas concentrações. Em todos os tratamentos, verificou-se redução expressiva do crescimento radicular em comparação aos respectivos controles, mesmo nas concentrações em que a germinação permaneceu elevada. A Figura 25 ilustra esse comportamento, evidenciando a redução do desenvolvimento das plântulas expostas à amostra tratada por UV/H₂O₂ em relação ao controle.

Figura 25 - Comparação entre as sementes expostas ao controle (C), a diferentes concentrações da amostra tratada por UV/H₂O₂.



Fonte: Autor (2026).

Nos ensaios com *Daphnia magna*, todas as amostras apresentaram o mesmo fator de toxicidade (FT = 16), indicando ausência de redução da toxicidade aguda após os tratamentos. De forma semelhante, os ensaios de fitotoxicidade com *Lactuca sativa* evidenciaram a persistência dos efeitos tóxicos, observando-se redução da germinação e do crescimento radicular mesmo após a aplicação dos processos oxidativos.

Os ensaios ecotoxicológicos indicaram a manutenção da toxicidade após os tratamentos, sugerindo a presença de compostos tóxicos remanescentes no efluente. Esse resultado evidencia a necessidade de estudos futuros voltados à avaliação de estratégias complementares para redução da toxicidade, as quais poderão ser empregadas em conjunto com os Processos Oxidativos Avançados.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho demonstrou que ambos os tratamentos foram altamente eficientes na descoloração do efluente, alcançando remoções de até 96,57%, ao final do período de irradiação avaliado. Além disso, os dados experimentais apresentaram bom ajuste ao modelo cinético de pseudo-primeira ordem, comportamento frequentemente reportado na literatura para processos de fotólise UV e UV/H₂O₂.

Embora o processo UV/H₂O₂ tenha apresentado maior velocidade de descoloração nos tempos iniciais de tratamento, essa vantagem foi reduzida ao longo da irradiação, de modo que ambos os processos alcançaram eficiências finais muito semelhantes após 60 minutos. Esse comportamento demonstra que, embora a adição de peróxido de hidrogênio acelere a degradação inicial dos corantes, ela não resultou em ganho expressivo na eficiência final de remoção.

Neste contexto, destaca-se o desempenho da fotólise UV, que alcançou maior eficiência na remoção dos corantes ao final de 60 minutos de irradiação (96,57%), sem a necessidade de adição de reagentes químicos. Esse resultado evidencia o potencial da técnica como uma alternativa simples e eficiente para a descoloração de resíduos laboratoriais, especialmente em aplicações que priorizem a simplificação operacional, a redução do consumo de reagentes e a eliminação da preocupação com oxidantes residuais após o tratamento.

Os ensaios ecotoxicológicos complementaram a avaliação dos processos ao demonstrar que, embora a elevada eficiência de descoloração tenha sido alcançada, a toxicidade do efluente permaneceu após os tratamentos. Esse resultado evidencia que a remoção da coloração, embora constitua um importante indicativo da degradação dos corantes e tenha atendido ao objetivo principal deste estudo, não implica necessariamente na eliminação dos efeitos tóxicos do resíduo, reforçando a importância de avaliações ecotoxicológicas na investigação da eficiência global de tecnologias de tratamento.

Por fim, este trabalho evidencia a relevância do desenvolvimento de tecnologias voltadas ao tratamento in loco de resíduos químicos laboratoriais, uma vez que esses resíduos apresentam características específicas e ainda são pouco contemplados na literatura científica. Nesse sentido, os resultados obtidos contribuem para ampliar a discussão sobre alternativas de tratamento aplicáveis ao ambiente

acadêmico, fornecendo subsídios para o aprimoramento das práticas de gerenciamento de resíduos em instituições de ensino e pesquisa. A adoção de estratégias dessa natureza pode favorecer a redução dos impactos ambientais associados à disposição desses efluentes e estimular a implementação de soluções mais sustentáveis, simples e compatíveis com os princípios da Química Verde.

7 RECOMENDAÇÕES

Uma vez que os processos da fotólise UV e se mostraram UV/H₂O₂ promissores na remoção de corantes do resíduo químico laboratorial da metodologia Kjeldahl, é recomendada a avaliação desses processos para o tratamento de outros tipos de resíduos laboratoriais à base de corante.

Também se recomenda que estudos futuros investiguem estratégias complementares aos processos de fotólise UV e UV/H₂O₂ com o objetivo de promover a redução da toxicidade residual do efluente tratado. Entre as possibilidades, destacam-se a combinação dos POAs com outras tecnologias de tratamento, bem como a identificação e caracterização dos compostos remanescentes e dos possíveis subprodutos formados durante a oxidação, visando ao desenvolvimento de tratamentos mais eficazes para a descontaminação completa desses resíduos.

REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12713: Ecotoxicologia aquática - Toxicidade aguda - Método de ensaio com *Daphnia spp* (*Crustacea, Cladocera*). Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ANISUZZAMAN, S. M. *et al.* Current Trends in the Utilization of Photolysis and Photocatalysis Treatment Processes for the Remediation of Dye Wastewater: A Short Review. **ChemEngineering**, v. 6, n. 4, p. 58, 2022.

ARAÚJO, Karla S. *et al.* Processos oxidativos avançados: uma revisão de fundamentos e aplicações no tratamento de águas residuais urbanas e efluentes industriais. **Revista Ambiente & Água**, v. 11, 2016. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1862>. Acesso em: 14 set. 2025.

BANKOLE, Anifat A. *et al.* Comparative Study of the Selective Sorption of Organic Dyes on Inorganic Materials—A Cost-Effective Method for Waste Treatment in Educational and Small Research Laboratories. **Separations**, v. 9, n. 6, p. 144, 2022.

BOCZKAJ, Grzegorz; FERNANDES, André. Wastewater treatment by means of advanced oxidation processes at basic pH conditions: A review. **Chemical Engineering Journal**, v. 320, p. 608–633, 15 jul. 2017.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Regras para Análise de Sementes (RAS). Brasília: MAPA/ACS, 2009.

ÇOBANOĞLU, Kübra; DEĞERMENCI, Nejdet. Comparison of reactive azo dye removal with UV/H₂O₂, UV/S₂O₈²⁻ and UV/HSO₅⁻ processes in aqueous solutions. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 194, n. 4, p. 302, 28 mar. 2022.

CÓRDOVA, Rolando N. **Otimização do processo UV/H₂O₂ aplicado ao tratamento de lixiviado de aterro sanitário pré-tratado biologicamente**. 2019. 322 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico,

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/214432>. Acesso em: 15 fev. 2026.

CRUZ, Gregorio. Boric Acid in Kjeldahl Analysis. **Journal of Chemical Education**, v. 90, n. 12, p. 1645–1648, 10 dez. 2013.

DEL MORO, Guido *et al.* Comparison of UV/H₂O₂ based AOP as an end treatment or integrated with biological degradation for treating landfill leachates. **Chemical Engineering Journal**, v. 218, p. 133–137, 15 fev. 2013.

FASSI, S.; BOUSNOUBRA, I.; SEHILI, T.; DJEBBAR, K. Degradation of Bromocresol Green by direct UV photolysis, acetone/UV and advanced oxidation processes (AOP's) in homogeneous solution (H₂O₂/UV, S₂O₈²⁻/UV): comparative study. **Journal of Materials and Environmental Science**, v. 3, n. 4, p. 732–743, 2012.

IOREZE, Mariele; SANTOS, Eliane P.; SCHMACHTENBERG, Natana. PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS: FUNDAMENTOS E APLICAÇÃO AMBIENTAL. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 79–91, 7 abr. 2014.

Gestão de resíduos químicos: uma revisão sistemática das práticas adotadas em instituições de ensino. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, [S. l.], v. 19, n. 2, p. 287–304, 2025. [DOI:10.19180/2177-4560.v19n22025p287-304](https://doi.org/10.19180/2177-4560.v19n22025p287-304).

HASSEMER, Maria Eliza Nagel. **Oxidação fotoquímica – UV/H₂O₂ – para degradação de poluentes em efluentes da indústria têxtil**. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Florianópolis, 2006. Disponível em: <http://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/88994>. Acesso em: 14 set. 2025.

HASSEMER, Maria Eliza Nagel *et al.* Processo UV/H₂O₂ como pós-tratamento para remoção de cor e polimento final em efluentes têxteis. **Química Nova**, v. 35, 2012.

ISO. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 6341: Water quality — Determination of the inhibition of the mobility of *Daphnia magna* Straus (Cladocera, Crustacea) Acute toxicity test. Geneva: ISO, 2012.

KHAN, Samreen Heena; YADAV, Virendra Kumar. Advanced Oxidation Processes for Wastewater Remediation: An Overview. *In*: SHAH, Maulin P. (Org.). **Removal of Emerging Contaminants Through Microbial Processes**. Singapore: Springer Singapore, 2021. p. 71–93.

KUNDU, A. K.; HABIB, M.; MANDAL, M. Sustainable management of chemistry laboratory wastewater in undergraduate colleges: A review and way forward. **Journal of Environmental Science, Health & Sustainability**, v. 2, n. 2, p. 137-146, 2026.

KULARATNE, Ranil K. A. A mini review of hazardous wastes generated by environmental analytical laboratories: a perspective from Sri Lanka as an economically developing country. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 195, n. 11, p. 1380, 27 out. 2023.

MA, T. S.; ZUAZAGA, G. Micro-Kjeldahl determination of nitrogen: a new indicator and an improved rapid method. **Industrial and Engineering Chemistry, Analytical Edition**, v. 14, n. 3, p. 280–282, 1942.

MARMITT, Sandro; PIROTTA, Lilian V.; STÜLP, Simone. Aplicação de fotólise direta e UV/H₂O₂ a efluente sintético contendo diferentes corantes alimentícios. **Química Nova**, v. 33, 2010.

MARTINS, Leonardo Madeira *et al.* Aplicação de Fenton, foto-Fenton e UV/H₂O₂ no tratamento de efluente têxtil sintético contendo o corante Preto Biozol UC. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 16, 2011.

MOONEY, Dana. Effectively minimizing hazardous waste in academia: The Green Chemistry approach. **Chemical Health & Safety**, v. 11, n. 3, p. 24–28, 1 maio 2004.

NASCIMENTO, Elizabeth de Souza; TENUTA FILHO, Alfredo. Chemical waste risk reduction and environmental impact generated by laboratory activities in research and teaching institutions. **Brazilian Journal of Pharmaceutical Sciences**, v. 46, 2010.

OLIVEIRA, D. B. et al. Development of environmental education concepts concerning chemical waste management and treatment: the training experience of undergraduate students. **Chemistry Education Research and Practice**, v. 22, p. 653-661, 2021.

PALUDO, Mateus Bergamin. **Estudo da utilização de peróxido de hidrogênio e luz ultravioleta visando a prevenção da formação de cloraminas no tratamento de água de abastecimento**. 2020. 54 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Bioprocessos e Biotecnologia, Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Bento Gonçalves, 2020. Disponível em: <https://repositorio.uergs.edu.br/xmlui/handle/123456789/1340>. Acesso em: 15 abr. 2026.

Processos oxidativos avançados: fundamentos e aplicações em matrizes ambientais. [S.l.]: Imprensa Universitária - Universidade Federal do Ceará, 2023.

ROSENBROCK, Ligia Cleia C. **Sustentabilidade e educação ambiental na geração e tratamento de resíduos químicos**. Projeto de Extensão nº 201704678. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Química, 2022. Disponível em: [Projeto GRP-PTRQ \(PDF\)](#). Acesso em: 23 jun. 2026.

SALGADO, Bruno César B. et al. Descoloração de efluentes aquosos sintéticos e têxtil contendo corantes índigo e azo via processos Fenton e foto-assistidos (UV e UV/H₂O₂). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, 2009.

SALIMI, M. et al. Contaminants of emerging concern: a review of new approach in AOP technologies. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 189, n. 8, 2017.

SILVA, Samuel F. D. **Avaliação do co-tratamento da mistura de água impactada com drenagem ácida de minas e efluente têxtil seguido por processo UV/H₂O₂**. 2024. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/256567>. Acesso em: 15 fev. 2026.

SOUZA, Renata Cristina *et al.* Tratamento de efluentes de lavanderia hospitalar por processo oxidativo avançado: UV/H₂O₂. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, 2019.

THAN, Van Hau et al. Analytical Methods for Determination of Total Nitrogen Content in the Process of Synthesizing Chemically Modified Rubber Materials. **Engineering and Technology For Sustainable Development**, [S. l.], v. 35, n. 1, p. 51–58, 2025. DOI: 10.51316/jst.180.etsd.2025.35.1.7. Disponível em: <https://jst.vn/index.php/etsd/article/view/407>. Acesso em: 20 jun. 2026.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Bacharelado em Química Tecnológica: ementas das disciplinas – currículo 2021.1. Florianópolis: UFSC, 2021. Disponível em: [Ementas do Bacharelado em Química Tecnológica \(UFSC\)](#). Acesso em: 23 jun. 2026.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Portaria nº 705/2023/GR, de 3 de abril de 2023. Institui a Comissão Permanente de Tratamento Interno de Resíduos. Boletim Oficial da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, n. 68, 11 abr. 2023. Disponível em: [Boletim nº 68/2023 da UFSC](#). Acesso em: 23 jun. 2026.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. *Manual de Gerenciamento de Resíduos Laboratoriais*. Florianópolis: UFSC, 2024.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Coordenadoria de Gestão Ambiental. **Dados de geração dos resíduos químicos – Florianópolis: resíduos**

químicos 2025. Florianópolis: UFSC, 2026. Disponível em: [Dados de geração dos resíduos químicos – Florianópolis](#). Acesso em: 23 jun. 2026.

ZAMBRANO, Aranea Jennifer et al. Advanced oxidation processes by UV/H₂O₂ for the removal of anionic surfactants in a decentralized wastewater treatment plant in Ecuador. **Water Science and Technology**, v. 90, n. 8, p. 2340–2351, 23 set. 2024. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2024.311>. Acesso em: 15 set. 2025.

ZHANG, Yuanna; SUN, Wenjun; YIN, Wenxuan. Precise regulation of UV/H₂O₂ processes: •OH generation/reaction and DOM transformation as the main free radical scavenger. **Water Research**, v. 277, p. 123282, 1 jun. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123282>. Acesso em: 17 set. 2025.

ZHENG, Dong; YUAN, Xiang-Ai; MA, Jing. Rationalization of pH-dependent absorption spectrum of o-methyl red in aqueous solutions: TD-DFT calculation and experiment study. **Acta Physico-Chimica Sinica**, Beijing, v. 32, n. 1, p. 290–300, 2016. DOI: 10.3866/PKU.WHXB201512072.

ZUORRO, Antonio; LAVECCHIA, Roberto. Evaluation of UV/H₂O₂ advanced oxidation process (AOP) for the degradation of diazo dye Reactive Green 19 in aqueous solution. **Desalination and Water Treatment**, v. 52, n. 7, p. 1571–1577, 1 fev. 2014.

4500-H₂O₂ HYDROGEN PEROXIDE (RESIDUAL) (PROPOSED). *In*: **Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater**. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. [S.l.]: American Public Health Association, 2017.

4500-Norg NITROGEN (ORGANIC). *In*: **Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater**. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. [S.l.]: American Public Health Association, 2017.