



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
CAMPUS ACADÊMICO DO AGreste - CAA

MARIA CLARA DA ROCHA DOS SANTOS SILVA

**ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DO PROCESSO DE FOTOCATÁLISE
HETEROGÊNEA IRRADIADO POR LUZ SOLAR PARA TRATAMENTO DE
EFLUENTE INDUSTRIAL DE LAVANDERIA DE BENEFICIAMENTO DE JEANS**

CARUARU

2025



MARIA CLARA DA ROCHA DOS SANTOS SILVA

**ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DO PROCESSO DE FOTOCATÁLISE
HETEROGÊNEA IRRADIADO POR LUZ SOLAR PARA TRATAMENTO DE
EFLUENTE INDUSTRIAL DE LAVANDERIA DE BENEFICIAMENTO DE JEANS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental - PPGECAM da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Centro Acadêmico do Agreste - CAA, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental. Área de concentração: Recursos Naturais e Meio Ambiente. Linha de Pesquisa: Saneamento Ambiental

CARUARU

2025



Catalogação de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Silva, Maria Clara da Rocha Dos Santos.
Análise do ciclo de vida do processo de fotocatálise heterogênea irradiado por luz solar para tratamento de efluente industrial de lavanderia de beneficiamento de jeans / Maria Clara da Rocha Dos Santos Silva. - Caruaru, 2025.
142f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro Acadêmico do Agreste, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental - PPGECAM, 2025.
Orientação: Dr. Gilson Lima da Silva.
Coorientação: Dr. Rogério Ferreira da Silva.

1. Análise de ciclo de vida; 2. Efluentes têxteis; 3. Fotocatálise heterogênea; 4. Irradiação solar; 5. POA. I. Silva, Gilson Lima da. II. Silva, Rogério Ferreira da. III. Título.



MARIA CLARA DA ROCHA DOS SANTOS SILVA

**ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DO PROCESSO DE FOTOCATÁLISE
HETEROGÊNEA IRRADIADO POR LUZ SOLAR PARA TRATAMENTO DE
EFLUENTE INDUSTRIAL DE LAVANDERIA DE BENEFICIAMENTO DE JEANS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental - PPGECAM da Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Centro Acadêmico do Agreste - CAA, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental. Área de concentração: Recursos Naturais e Meio Ambiente. Linha de Pesquisa: Saneamento Ambiental.

Aprovado em: 25 de Setembro de 2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 GILSON LIMA DA SILVA
Data: 13/10/2025 14:44:06-0300
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Prof. Dr. Gilson Lima da Silva (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Documento assinado digitalmente
 Rogério Ferreira da Silva
Data: 14/10/2025 11:25:28-0300
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Profº Dr. Rogério Ferreira da Silva (Coorientador)
Instituto Federal de Pernambuco (IFPE)

Documento assinado digitalmente
 ERIKA PINTO MARINHO
Data: 13/10/2025 15:17:33-0300
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Prof. Dra. Érika Pinto Marinho (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco (UFPE)

Documento assinado digitalmente
 ROMILDO MORANT DE HOLANDA
Data: 14/10/2025 08:17:25-0300
Verifique em <https://validar.itd.gov.br>

Prof. Dr. Romildo Morant de Holanda (Examinador Externo)
Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)



Aos meus pais, Isabella Rocha e Josenildo Santos, por todo amor, virtudes e valores ensinados.



AGRADECIMENTOS

Primeiramente à Deus, o único digno de toda honra e glória, pelo amor incondicional doado a minha vida e pelas doses diárias de ânimo, consolo e determinação em meio aos momentos difíceis que permearam não só o processo de elaboração deste trabalho, mas como em toda a pós-graduação.

Aos meus pais, Isabella Rocha e Josenildo Santos, à minha vó, Marluce Rocha, à minha tia-avó, Graça Rocha e ao meu irmão, João Maximiano por me apoiarem incansavelmente na minha formação e não medirem esforços para que eu conseguisse chegar até aqui. Essa conquista é nossa!

Ao meu noivo, Jackson Fernandes, pelo seu amor, paciência e compreensão, além de todo o apoio e torcida para a concretização dos meus sonhos.

Aos meus amigos, pelo carinho e suporte, especialmente a Matheus Henrique, Willan Nascimento, Isaac Rodrigues e Érika Menezes, que adotaram meus sonhos como seus próprios, sempre me incentivando, fortalecendo e acreditando no meu potencial, e por estarem presentes nos momentos mais turbulentos do mestrado e da vida, tornando-os mais leves.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Gilson Lima da Silva, ao meu coorientador Profº Dr. Rogério Ferreira da Silva e ao meu supervisor Msc. José Vitor Silva de Aragão, nos quais admiro e estimo muito pelo seu caráter, inteligência e comprometimento, agradeço pela confiança, parceria, estímulo e total apoio com o meu trabalho, pela paciência e apoio nas dificuldades que me apareceram, pela disponibilidade em sanar minhas dúvidas, servindo de exemplo e motivação por sua excelência profissional.

Expresso também aqui minha profunda gratidão à Universidade Federal de Pernambuco – UFPE, instituição de grande prestígio, reconhecida por seu compromisso com a excelência acadêmica e por fomentar, por meio de suas pesquisas, contribuições notáveis à sociedade. Agradeço igualmente ao GAMA – Grupo de Gestão Ambiental Avançada da UFPE, bem como à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco – FACEPE, pelo apoio essencial ao desenvolvimento deste trabalho.

Às coordenadoras dos Laboratórios de Química – LQ, e do Laboratório de Engenharia Ambiental – LEA, as docentes Erika e Quênia e demais integrantes, por todo o acolhimento e ensinamentos que me foram passados ao longo do tempo, e aos técnicos Manu e Henrique.

No mais, sou grata a todos os professores, desde os da infância até os da pós-graduação, pelos conhecimentos transmitidos e inspiração gerada. Por fim, agradeço a todos que contribuíram de alguma forma para que essa etapa da minha vida pudesse ser alcançada.



*“Ninguém pode voltar atrás e mudar o ontem,
mas, sem dúvida, todos podemos começar agora a
fazer um novo hoje e amanhã.”*



RESUMO

A indústria têxtil, especialmente no beneficiamento de jeans, gera efluentes com alta cor, turbidez e demanda química de oxigênio (DQO), cujo descarte inadequado pode causar eutrofização e toxicidade em corpos hídricos. Os Processos Oxidativos Avançados (POA) mostram potencial para tratar esses poluentes, mas são raros os estudos sobre seus impactos ambientais no ciclo de vida, sobretudo para a fotocatálise heterogênea irradiada por luz solar. Este trabalho avaliou a eficiência e os impactos ambientais da fotocatálise heterogênea solar (TiO_2/H_2O_2) aplicada a efluentes de lavanderia de jeans em Toritama-PE. Os efluentes bruto e tratado pela ETE foram caracterizados e submetidos à fotocatálise por diferentes tempos. Avaliaram-se pH, cor, turbidez e DQO. A Análise de Ciclo de Vida (ACV), conduzida no SimaPro 10.20.1 com os métodos CML-IA e ReCiPe 2016, considerou quatro cenários: (i) efluente bruto; (ii) efluente tratado pela ETE da lavanderia; (iii) fotocatálise aplicada diretamente ao efluente bruto; e (iv) fotocatálise como etapa complementar ao tratamento convencional. A fotocatálise no efluente bruto apresentou maiores remoções, e como etapa complementar elevou significativamente a eficiência, garantindo melhor qualidade final. A ACV apontou maiores impactos no cenário ii e menores quando a fotocatálise foi integrada ao tratamento. O TiO_2 foi identificado como principal responsável pelos impactos residuais do processo fotocatalítico. Conclui-se que a fotocatálise solar associada ao tratamento físico-químico convencional é técnica e ambientalmente viável, favorecendo o reuso e reduzindo impactos potenciais.

Palavras-chaves: Análise de Ciclo de Vida. Efluentes Têxteis. Fotocatálise Heterogênea. Irradiação Solar. POA.



ABSTRACT

The textile industry, especially denim processing, generates effluents with high color, turbidity, and chemical oxygen demand (COD), whose improper disposal can cause eutrophication and toxicity in water bodies. Advanced Oxidative Processes (AOPs) show potential for treating these pollutants, but studies on their lifecycle environmental impacts are rare, particularly for heterogeneous solar photocatalysis. This study evaluated the efficiency and environmental impacts of solar heterogeneous photocatalysis (TiO_2/H_2O_2) applied to denim laundry effluents in Toritama, Pernambuco. The raw and treated effluents from the ETE were characterized and subjected to photocatalysis for varying durations. pH, color, turbidity, and COD were evaluated. The Life Cycle Analysis (LCA), conducted in SimaPro 10.20.1 using the CML-IA and ReCiPe 2016 methods, considered four scenarios: (i) raw effluent; (ii) effluent treated by the laundry's WWTP; (iii) photocatalysis applied directly to the raw effluent; and (iv) photocatalysis as a complementary step to conventional treatment. Photocatalysis on the raw effluent resulted in greater removals and, as a complementary step, significantly increased efficiency, ensuring better final quality. The LCA indicated greater impacts in scenario ii and lower impacts when photocatalysis was integrated into the treatment. TiO_2 was identified as the main contributor to the residual impacts of the photocatalytic process. It is concluded that solar photocatalysis combined with conventional physical-chemical treatment is technically and environmentally viable, favoring reuse and reducing potential impacts.

Keywords: Life Cycle Analysis. Textile Effluents. Heterogeneous Photocatalysis. Solar Irradiation. POA.



LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-------------|---|----|
| Figura 1 - | Quantidade de Água para Confecção de uma Calça Jeans | 25 |
| Figura 2 - | Localização APLCAPE | 30 |
| Figura 3 - | Localização do Rio Capibaribe em Relação ao APLCAPE | 35 |
| Figura 4 - | Descarte de Efluentes Têxteis no Rio Capibaribe | 35 |
| Figura 5 - | Trecho do Rio Capibaribe em Toritama | 35 |
| Figura 6 - | Comparação entre Tratamento Biológico Aeróbio e Anaeróbio | 41 |
| Figura 7 - | Coagulação – Floculação – Decantação de Efluente Bruto | 43 |
| Figura 8 - | Esquema Representativo Simplificado dos POAs para a mineralização da matéria orgânica | 44 |
| Figura 9 - | Fases de Análise do Ciclo de Vida | 50 |
| Figura 10 | Fluxograma da Metodologia PRISMA | 51 |
| Figura 11 - | Resultado Metodologia PRISMA na Plataforma <i>Scopus</i> | 52 |
| Figura 12 - | Rede Bibliométrica de Coautoria entre os Autores na Plataforma <i>Scopus</i> | 54 |
| Figura 13 - | Rede Bibliométrica de Citação dos Artigos na Plataforma <i>Scopus</i> | 55 |
| Figura 14 - | Rede Bibliométrica da Coocorrência dos Artigos na Plataforma <i>Scopus</i> | 55 |
| Figura 15 - | Evolução Cronológica da Análise Bibliométrica dos Artigos na Plataforma <i>Scopus</i> (2015-2025) | 56 |
| Figura 16 - | Resultado Metodologia PRISMA na Plataforma <i>Web of Science</i> | 56 |
| Figura 17 - | Rede Bibliométrica de Coautoria entre os Autores da <i>Web of Science</i> | 58 |
| Figura 18 - | Rede Bibliométrica de Citação entre os Autores da <i>Web of Science</i> | 59 |
| Figura 19 - | Rede Bibliométrica de Coocorrência de Citação da <i>Web of Science</i> | 59 |
| Figura 20 - | Evolução Cronológica da Análise Bibliométrica dos Artigos na Plataforma <i>Web of Science</i> (2015-2025) | 60 |
| Figura 21 - | Fluxograma Metodológico | 61 |
| Figura 22 - | Mapa de Localização Geográfica do Município De Toritama - PE | 62 |
| Figura 23 - | Descrição do Sistema de Tratamento dos Efluentes Industriais da Lavanderia em Estudo | 62 |
| Figura 24 - | Fluxograma da ETE da Lavanderia em Estudo | 63 |
| Figura 25 - | Efluentes Bruto e Tratado após armazenamento e ajuste de pH | 65 |
| Figura 26 - | Amostras em Agitação Contínua e Expostas à Luz Solar | 66 |
| Figura 27 - | Filtragem das Amostras | 66 |
| Figura 28 - | Fluxograma da Caracterização das Amostras | 67 |
| Figura 29 - | Preparação Amostras para Teste de Ecotoxicidade | 69 |
| Figura 30 - | Espectros de Absorção no UV-vis do Efluente Bruto e Efluente Tratado da Lavanderia | 74 |
| Figura 31 - | Correlação Iluminância (Lx) com o Tempo de Exposição (horas) | 76 |
| Figura 32 - | Amostras T1 a T4 após Fotocatálise Heterogênea Irradiada por Luz Solar por 2h no Efluente Bruto | 77 |
| Figura 33 - | Amostras T5 a T8 após Fotocatálise Heterogênea Irradiada por Luz Solar por 4h no Efluente Bruto | 77 |



| | | |
|-------------|---|-----|
| Figura 34 - | Amostra Turva após ser colocada na Cubeta de Quarto para Determinação de DQO | 78 |
| Figura 35 - | Espectro de absorção UV-vis do Efluente Bruto após Fotocatálise Heterogênea por Luz Solar | 80 |
| Figura 36 - | Amostras T1 a T4 após Fotocatálise Heterogênea Irradiada por Luz Solar por 2h no Efluente Tratado | 81 |
| Figura 37 - | Amostras T5 a T8 após Fotocatálise Heterogênea Irradiada por Luz Solar por 4h no Efluente Tratado | 81 |
| Figura 38 - | Espectro de absorção UV-vis do Efluente Tratado após Fotocatálise Heterogênea por Luz Solar | 83 |
| Figura 39 - | Resultados das Categorias de Impacto para o Cenário 1 - Efluente Real Bruto da Lavanderia para 30 Anos pelo Método CML-IA | 88 |
| Figura 40 - | Resultados das Categorias de Impacto para o Cenário 1 - Efluente Real Bruto da Lavanderia Para 30 Anos pelo Método ReCiPe 2016 | 88 |
| Figura 41 - | Resultados das Categorias de Impacto para o Cenário 2 - Efluente Real Tratado pela ETE da Lavanderia para 30 Anos pelo Método CML-IA | 91 |
| Figura 42 - | Resultados das Categorias de Impacto para o Cenário 2 - Efluente Real Tratado pela ETE da Lavanderia para 30 Anos pelo Método ReCiPe 2016 | 91 |
| Figura 43 - | Resultados das Categorias de Impacto para o Cenário 3 - Efluente Real Bruto Submetido ao Processo de Fotocatálise Heterogênea sob Irradiação Solar para 30 anos pelo Método CML-IA (Pior Tratamento) | 94 |
| Figura 44 - | Resultados das Categorias de Impacto para o Cenário 3 - Efluente Real Bruto Submetido ao Processo de Fotocatálise Heterogênea sob Irradiação Solar para 30 Anos pelo Método CML-IA (Melhor Tratamento) | 95 |
| Figura 45 - | Resultados das Categorias de Impacto para o cenário 3 - Efluente Real Bruto Submetido ao Processo de Fotocatálise Heterogênea sob Irradiação Solar para 30 Anos pelo Método ReCiPe 2016 (Pior Tratamento) | 96 |
| Figura 46 - | Resultados das Categorias de Impacto para o Cenário 3 - Efluente Real Bruto Submetido ao Processo de Fotocatálise Heterogênea sob Irradiação Solar para 30 Anos pelo Método ReCiPe 2016 (Melhor Tratamento) | 96 |
| Figura 47 - | Resultados das Categorias de Impacto para o Cenário 4 - Efluente Real Tratado Complementado com Fotocatálise Heterogênea Irradiada por Luz Solar para 30 Anos pelo Método CML-IA (Pior Tratamento) | 99 |
| Figura 48 - | Resultados das Categorias de Impacto para o cenário 4 - Efluente Real Tratado Complementado com Fotocatálise Heterogênea Irradiada por Luz Solar para 30 anos pelo Método CML-IA (Melhor Tratamento) | 99 |
| Figura 49 - | Resultados das Categorias de Impacto para o cenário 4 - Efluente Real Bruto Submetido ao Processo de Fotocatálise Heterogênea sob | 100 |



| | | |
|-------------|---|-----|
| Figura 50 - | Irradiação Solar para 30 Anos pelo Método ReCiPe 2016 (Pior Tratamento) | |
| | Resultados das Categorias de Impacto para o Cenário 4 - Efluente Real Bruto Submetido ao Processo de Fotocatálise Heterogênea sob Irradiação Solar para 30 Anos pelo Método ReCiPe 2016 (Melhor Tratamento) | 100 |
| Figura 51 - | Comparação dos Cenários pelo Método CML-IA | 102 |
| Figura 52 - | Comparação dos Cenários pelo Método ReCiPe 2016 | 102 |



LISTA DE TABELAS

| | | |
|-------------|---|-----|
| Tabela 1 - | Planejamento Fatorial 2^{2+1} para a Aplicação do POA | 66 |
| Tabela 2 - | Características Físico-Químicas dos Efluentes Coletados na Lavanderia | 72 |
| Tabela 3 - | Características Físico-Químicas após Fotocatálise Heterogênea Irradiada por Luz Solar no Efluente Bruto | 78 |
| Tabela 4 - | Características Físico-Químicas após Fotocatálise Heterogênea Irradiada por Luz Solar no Efluente Tratado | 81 |
| Tabela 5 - | Resultados Testes de Ecotoxicidade com <i>Lactuca Sativa</i> (alface) e <i>Allium Cepa</i> (cebola) | 84 |
| Tabela 6 - | ICV Cenário 1: Efluente Real Bruto da Lavanderia para 30 Anos | 87 |
| Tabela 7 - | Resultados das Categorias de Impacto para o Cenário 1 - Efluente Real Bruto da Lavanderia para 30 Anos pelo Método CML-IA | 87 |
| Tabela 8 - | Resultados das Categorias de Impacto para o Cenário 1 - Efluente Real Bruto da Lavanderia para 30 Anos pelo Método ReCiPe 2016 | 88 |
| Tabela 9 - | ICV Cenário 2: Efluente Real Tratado pela ETE da Lavanderia para 30 Anos | 90 |
| Tabela 10 - | Resultados das Categorias de Impacto para o Cenário 2 - Efluente Real Tratado da Lavanderia para 30 Anos pelo Método CML-IA | 90 |
| Tabela 11 - | Resultados das Categorias de Impacto para o Cenário 2 - Efluente Real Tratado da Lavanderia para 30 Anos pelo Método ReCiPe 2016 | 90 |
| Tabela 12 - | ICV Cenário 3: Efluente Real Bruto Submetido ao Processo de Fotocatálise Heterogênea sob Irradiação Solar para 30 Anos | 91 |
| Tabela 13 - | Resultados das Categorias de Impacto para o Cenário 3 - Efluente Real Bruto Submetido ao Processo de Fotocatálise Heterogênea sob Irradiação Solar para 30 Anos pelo Método CML-IA | 93 |
| Tabela 14 - | Resultados das Categorias de Impacto para o Cenário 3 - Efluente Real Bruto Submetido ao Processo de Fotocatálise Heterogênea sob Irradiação Solar para 30 Anos pelo Método ReCiPe 2016 | 94 |
| Tabela 15 - | ICV Cenário 4: Efluente Real Tratado pela Lavanderia Complementado com Fotocatálise Heterogênea Irradiada por Luz Solar para 30 Anos | 98 |
| Tabela 16 - | Resultados das Categorias de Impacto para o Cenário 4 - Efluente Real Tratado Complementado com Fotocatálise Heterogênea Irradiada por Luz Solar para 30 Anos pelo Método CML-IA | 98 |
| Tabela 17 - | Resultados das Categorias de Impacto para o Cenário 4 - Efluente Real Tratado Complementado com Fotocatálise Heterogênea irradiada por Luz Solar para 30 Anos pelo Método ReCiPe 2016 | 98 |
| Tabela 18 - | Comparação dos resultados obtidos na fotocatálise heterogênea irradiada por luz solar com os resultados obtidos pela ACV | 103 |



LISTA DE QUADROS

| | | |
|------------|--|----|
| Quadro 1 - | Tipos de Reuso da Água e sua Associação aos Riscos à Saúde | 28 |
| Quadro 2 - | Condições e Padrões para o Descarte de Efluentes Conforme Resolução CONAMA 430/2011 | 36 |
| Quadro 3 - | Condições de Lançamento de Reuso de Efluentes Conforme Instrução Normativa 003/2022 - CPRH | 37 |
| Quadro 4 - | Sistemas Típicos de Processos Oxidativos Avançados | 45 |
| Quadro 5 - | Comparação da Eficiência de Tratamentos de Efluentes Têxteis por Diferentes Processos | 46 |
| Quadro 6 - | Concentrações e Tempos Comumente Utilizados para Tratar Efluentes por POA | 48 |
| Quadro 7 - | Trabalhos Encontrados na Plataforma <i>Scopus</i> | 52 |
| Quadro 8 - | Trabalhos Encontrados na Plataforma <i>Web of Science</i> | 57 |



LISTA DE EQUAÇÕES

| | |
|--|----|
| Equação 1 - Índice Relativo de Crescimento (ICR) | 70 |
| Equação 2 - Índice de Germinação (IG) | 70 |



LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-----------------|--|
| ABIT | Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecções |
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ACV | Análise do Ciclo de Vida |
| AEA | Agência Europeia do Ambiente |
| APAC | Agência Pernambucana de Águas e Climas |
| APHA | <i>American Public Health Association</i> |
| APL | Arranjo Produtivo Local |
| APLCAPE | Arranjo Produtivo Local do Agreste Pernambucano |
| CBHSF | Comitê de Bacias Hidrográficas do Rio São Francisco |
| CETEA | Centro de Tecnologia de Embalagem |
| CNRH | Conselho Nacional de Recursos Hídricos |
| CONMETRO | Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial |
| CONAMA | Conselho Nacional do Meio Ambiente |
| CPRH | Agência Estadual de Meio Ambiente |
| CRA | Crescimento da Radícula na Amostra |
| CRC | Crescimento da Radícula no Controle Negativo |
| DBO | Demanda Bioquímica de Oxigênio |
| DQO | Demanda Química de Oxigênio |
| ESG | <i>Environmental, Social and Governance</i> |
| ETE | Estação de Tratamento de Esgoto |
| IBICT | Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia |
| ICR | Índice Relativo de Crescimento |
| ICV | Inventário de Ciclo de Vida |
| IG | Índice de Germinação |
| INMETRO | Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia |
| ITAL | Instituto de Tecnologia de Alimentos |
| LCA | <i>Life Cycle Assessment</i> |
| OAP | <i>Advanced Oxidative Process</i> |
| ODS | Objetivos de Desenvolvimento Sustentável |
| ONU | Organização das Nações Unidas |
| PBACV | Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida |
| POA | Processos Oxidativos Avançados |



| | |
|-----------------|---|
| PRISMA | Principais Itens para Relatar Revisões Sistemáticas e Meta-Análises |
| REDESIST | Rede de Pesquisa em Sistemas Produtivos e Inovativos Locais |
| RMR | Região Metropolitana do Recife |
| SEBRAE | Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas |
| SETAC | <i>Society of Environmental Toxicology and Chemistry</i> |
| SGA | Número de sementes que germinaram na amostra |
| SGC | Número de sementes que germinaram no controle negativo |
| TDS | Sólidos Totais Dissolvidos |
| TSS | Sólidos Totais em Suspensão |
| UNT | Unidade de Turbidez |



SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 19 |
| 2 | OBJETIVOS | 22 |
| 2.1 | OBJETIVO GERAL | 22 |
| 2.2 | OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 22 |
| 3 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 23 |
| 3.1 | INDÚSTRIA TÊXTIL, DEMANDA E REUSO DE ÁGUA | 23 |
| 3.1.1 | Demanda de Água | 24 |
| 3.1.2 | Reuso de Água | 26 |
| 3.2 | ARRANJO PRODUTIVO LOCAL DO AGreste PERNAMBUCANO – APLCAPE | 29 |
| 3.3 | POLUIÇÃO INDUSTRIAL | 32 |
| 3.3.1 | Poluição Hídrica | 33 |
| 3.4 | EFLUENTES TÊXTEIS | 37 |
| 3.5 | TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAS/TÊXTEIS | 40 |
| 3.5.1 | Biológicos | 41 |
| 3.5.1.1 | Tratamentos Anaeróbios | 41 |
| 3.5.1.2 | Tratamentos Aeróbios | 42 |
| 3.5.2 | Tratamento Físico-químicos | 42 |
| 3.5.2.1 | Coagulação e Floculação | 43 |
| 3.6 | PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS – POA | 44 |
| 3.7 | ANÁLISE DE CICLO DE VIDA | 48 |
| 3.8 | ESTADO DA ARTE – REVISÃO SISTEMÁTICA E BIBLIOMÉTRICA | 51 |
| 4 | MATERIAIS E MÉTODOS | 52 |
| 4.1 | ETAPA 1 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO | 56 |
| 4.2 | ETAPA 2 - COLETA DE EFLUENTES E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL | 61 |
| 4.2.1 | Coleta, Transporte e Armazenamento | 64 |
| 4.2.2 | Delineamento Experimental | 64 |
| 4.2.3 | Caracterização das Amostras | 64 |
| 4.2.4 | Teste de Ecotoxicidade | 69 |
| 4.3 | ETAPA 3 – AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS - ACV | 70 |
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES | 72 |



| | | |
|----------|--|------------|
| 5.1 | ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS | 72 |
| 5.1.1 | Características dos Efluentes Real Bruto e Tratados da Lavanderia | 72 |
| 5.1.2 | Fotocatálise Heterogênea Irradiada por Luz Solar | 76 |
| 5.1.2.1 | Fotocatálise Heterogênea Irradiada por Luz Solar no Efluente Real Bruto | 77 |
| 5.1.2.2 | Fotocatálise Heterogênea Irradiada por Luz Solar no Efluente Real Tratado | 81 |
| 5.1.3 | Teste de Ecotoxicidade | 84 |
| 5.2 | AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS GERADOS NOS CENÁRIOS CONSIDERADOS | 87 |
| 5.2.1 | Efluente real bruto da lavanderia | 87 |
| 5.2.2 | Efluente real tratado pela ETE na lavanderia | 90 |
| 5.2.3 | Efluente real bruto submetido ao processo de fotocatálise heterogênea sob irradiação solar | 93 |
| 5.2.4 | Efluente real tratado complementado com fotocatálise heterogênea irradiada por luz solar | 97 |
| 5.2.5 | Comparação dos cenários | 101 |
| 6 | CONCLUSÕES | 106 |
| | REFERÊNCIAS | 108 |
| | APÊNDICES | 122 |
| | APÊNDICE A – TRABALHOS UTILIZADOS NA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA | 122 |
| | APÊNDICE B – CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS APÓS FOTOCATÁLISE HETEROGÊNEA IRRADIADA POR LUZ SOLAR NO EFLUENTE BRUTO | 141 |
| | APÊNDICE C - CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS APÓS FOTOCATÁLISE HETEROGÊNEA IRRADIADA POR LUZ SOLAR NO EFLUENTE BRUTO | 142 |

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem-se observado um agravamento e aumento na frequência dos problemas ambientais. Esse cenário é resultado do crescimento populacional excessivo e do aumento das atividades industriais. As ações humanas têm desempenhado um papel significativo na ocorrência de mudanças catastróficas na qualidade do solo, do ar e da água (Rocha, 2021).

Ferreira (2024) afirma que a maioria das indústrias, independentemente de seu ramo de atuação, utiliza água em seus processos produtivos. Consequentemente, essas indústrias acabam lançando uma grande quantidade de poluentes no meio ambiente, especialmente nos corpos d'água. Essa contaminação afeta direta e indiretamente os organismos ao longo da cadeia alimentar, incluindo seres humanos.

Nesse contexto, o setor da indústria têxtil, de maneira geral, é amplamente reconhecido por ser um dos grandes parques industriais consumindo 93 trilhões de litros de água, o que significa 4% da captação mundial de água doce anual (Tavares, 2022). Além disto, é considerada como uma das principais fontes de poluição dos corpos d'água. A liberação de compostos químicos, tanto orgânicos quanto inorgânicos, nos canais hídricos representa um exemplo típico de poluição industrial. Se esses resíduos não forem tratados de maneira adequada, podem causar sérios problemas de poluição ambiental (Santos, 2023).

O Agreste pernambucano é amplamente reconhecido como um importante polo industrial, com destaque especial para a indústria têxtil. Nessa região, anualmente, são produzidas aproximadamente 800 milhões de peças de vestuário. Em 2018, o faturamento do polo atingiu cerca de R\$ 3,5 bilhões anualmente, proporcionando emprego direto para 120 mil pessoas (Ceci, 2018). Atualmente, o setor industrial têxtil na região gera um faturamento anual médio de aproximadamente R\$ 1,1 bilhão de reais. O rendimento bruto médio dos trabalhadores varia de R\$ 583,72 a R\$ 1.419,50, dependendo da área de atuação do funcionário. Além disso, o faturamento anual das empresas desse setor varia entre R\$ 1 milhão e R\$ 3 milhões, dependendo da capacidade de produção anual. Isso destaca a significativa importância econômica da indústria têxtil no Agreste de Pernambuco, contribuindo significativamente para a geração de empregos e renda na região (Lima, 2022).

De acordo com Ramos (2020a), o efluente proveniente da indústria têxtil é uma mistura complexa de resíduos, contendo corantes, eletrólitos, ajustadores de pH, agentes tensoativos, sais, metais, entre outros. Esses efluentes apresentam alta coloração, pois os corantes não se fixam nas fibras durante o processo de tingimento. Além disso, são considerados altamente perigosos devido à sua alta toxicidade e taxa de degradação (Rocha, 2020).

Conforme mencionado por Tassi (2022), os corantes possuem uma ampla variedade de reatividade, solubilidade, volatilidade e estabilidade, devido à presença de diferentes grupos funcionais. Portanto, não é possível generalizar suas características. O descarte inadequado desses efluentes têxteis não apenas causa problemas estéticos, mas também afeta a penetração da luz solar, interfere nos processos fotossintéticos, reduz as concentrações de oxigênio dissolvido e prejudica a qualidade da água, fazendo com que o esgoto da indústria têxtil seja considerado o mais poluente dos setores industriais em termos de volume e composição dos efluentes (Marques e Da Conceição, 2022). Além disso, pode causar efeitos tóxicos agudos na fauna e flora (Chaves, De Carvalho e Oliveira, 2022).

A adequada gestão dos efluentes na indústria têxtil assume um papel crucial, uma vez que a falta de tratamento apropriado pode resultar na contaminação de reservatórios e estações de tratamento de água, apresentando uma séria ameaça ao meio ambiente e à saúde pública (Rodrigues, 2022).

Estabelecidos em 2012 pela Organização das Nações Unidas (ONU), os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) servem como orientação para as políticas ambientais (McArthur & Rasmussen, 2018) abrangendo diversas áreas, como Saúde e Bem-Estar (ODS-3), Água Potável e Saneamento (ODS-6), Consumo e Produção Responsável (ODS-12), Vida na Água (ODS-14) e Vida Terrestre (ODS-15), os quais são pilares essenciais abordados neste estudo.

Segundo essas políticas, o reuso de água industrial está se tornando uma prática sustentável cada vez mais adotada pelas indústrias, com o objetivo de reduzir o impacto ambiental de suas atividades. Além dos benefícios que trazem ao ecossistema, as técnicas de reaproveitamento e reuso de água industrial também oferecem vantagens significativas para as próprias empresas. Essas práticas contribuem para a redução dos custos de produção em setores como indústria química, têxtil, sucroenergética, entre outros (Moura *et al.*, 2020).

Alguns tipos de tratamento de efluentes, dentre eles os biológicos (aeróbios e anaeróbios) e os físico-químicos, são amplamente utilizados pela indústria têxtil. Em especial, os processos biológicos têm se consolidado como tratamento secundário, frequentemente associados a etapas físico-químicas, devido à sua eficiência e ao menor custo operacional. No contexto brasileiro, estudos destacam a expressiva aplicação de sistemas combinados anaeróbio-aeróbio em polos têxteis de Santa Catarina e São Paulo, principais centros de produção do setor (Araújo *et al.*, 2022). Em escala internacional, a China também se sobressai pelo uso dessas tecnologias, em razão da viabilidade econômica e ambiental que oferecem (Wang *et al.*, 2022). Dessa forma, a presente proposta se insere nesse cenário, buscando analisar

e adaptar tais processos ao contexto regional do polo têxtil do Agreste Pernambucano, onde a pressão sobre os recursos hídricos e a necessidade de soluções sustentáveis tornam urgente a aplicação de alternativas eficientes de tratamento de efluentes.

Buscando adotar cada vez mais o reuso de água, os métodos físico-químicos, como coagulação e floculação, desempenham um papel importante na indústria têxtil. Eles são amplamente utilizados na indústria têxtil para remover sólidos suspensos, fósforo, redução da demanda química de oxigênio (DQO) e cor. A coagulação envolve a adição de um coagulante, como o sulfato de alumínio - $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, que forma flocos com as partículas presentes no efluente. Em seguida, ocorre a floculação, em que um agente floculante, como um polímero, aglomera os flocos para facilitar sua remoção. Esses processos promovem a remoção de impurezas e ajudam a atender aos padrões ambientais. Eles também contribuem para a sustentabilidade, permitindo o reuso da água e reduzindo o impacto ambiental da indústria (De Souza Schorr, 2022).

Contudo, outros métodos vêm sendo estudados com o objetivo de melhorar o processo de tratamento de efluentes. Entre eles, destacam-se os processos oxidativos avançados (POAs), que se baseiam na geração de radicais livres, especialmente o radical hidroxila ($\cdot\text{OH}$), altamente oxidante. Esses radicais atuam degradando compostos químicos, como os corantes, sendo, portanto, mais eficazes quando comparados às práticas comumente utilizadas, como os processos físico-químicos e biológicos. Isso ocorre porque promovem a degradação completa de compostos recalcitrantes, a exemplo de corantes, fármacos e pesticidas (Araújo, 2021).

Além disso, os POAs apresentam outras vantagens: reduzem a geração de resíduos secundários, como o lodo; tornam o tratamento mais rápido; e não dependem de microrganismos ou de etapas adicionais. Outro ponto relevante é que, além da rapidez, esses métodos podem exigir menos recursos financeiros e têm a capacidade de degradar substratos de diferentes naturezas químicas, mesmo em baixas concentrações de poluentes, muitas vezes sem gerar resíduos (Chaves; De Carvalho; Oliveira, 2022).

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é uma técnica que permite mensurar os impactos ambientais de produtos, serviços ou processos em todas as suas etapas (Silva *et al.*, 2021). Globalmente, o software Simapro® se destaca como principal ferramenta para esses estudos, sendo amplamente utilizado também no meio acadêmico. Conforme a norma ISO 14040 (ABNT, 2011), a ACV auxilia no desempenho ambiental ao fornecer indicadores, medir impactos, apoiar decisões e facilitar a rotulagem ambiental.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar, por meio da análise de ciclo de vida (ACV), os impactos ambientais do processo de fotocatálise heterogênea irradiada por luz solar aplicado ao tratamento de efluente de lavanderia de beneficiamento de jeans.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Realizar a caracterização físico-química dos efluentes reais bruto e tratado gerados numa lavanderia de beneficiamento de jeans da cidade de Toritama;
- b) Avaliar a eficiência do POA por fotocatálise heterogênea, utilizando luz solar como fonte de irradiação, no tratamento de efluente real proveniente da lavanderia estudada, visando sua reutilização;
- c) Avaliar os impactos ambientais gerados pelo POA aplicado.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 INDÚSTRIA TÊXTIL, DEMANDA E REUSO DE ÁGUA

A indústria têxtil abrange uma vasta área da fabricação que engloba a conversão de fibras em fios, a transformação destes em tecidos e, por fim, a obtenção de produtos finais prontos para uso. O termo "têxtil" deriva da palavra latina "*textilis*", que remete à ideia de "tecer". Originalmente, esse termo se referia principalmente a tecidos de origem natural. No entanto, à medida que as técnicas evoluíram ao longo do tempo, o âmbito dos têxteis foi ampliado para incluir materiais sintéticos (Ferreira, 2024).

Na prática, esses tecidos passam por processos de tingimento, estamparia e são transformados em uma variedade de produtos, como vestuário e diversos itens. Durante esse ciclo, diversas fibras são empregadas, sendo o algodão um exemplo de fibra natural, enquanto também existem fibras artificiais e sintéticas. Essa diversidade de fibras é utilizada na produção dos tecidos, permitindo a criação de uma ampla gama de produtos finais (Narimatsu *et al.*, 2020).

O estudo da Agência Europeia do Ambiente (AEA) de 2023 informa que a indústria têxtil requer quantidades significativas de água e áreas de cultivo para a produção de fibras como o algodão. De acordo com estimativas globais, em 2015, o setor têxtil e de vestuário consumiu cerca de 79 bilhões de m³ de água, enquanto as necessidades totais da economia da União Europeia foram de aproximadamente 266 bilhões de m³ em 2017 (Parlamento Europeu, 2023).

Ainda de acordo com o Parlamento Europeu (2023) em 2020, a indústria têxtil classificou-se como a terceira maior responsável pela degradação da água e pela utilização de terras. Nesse mesmo ano, foram utilizados em média 9 m³ de água, 400 m² de terras e 391 kg de matérias-primas para suprir as demandas de vestuário e calçados de cada cidadão da União Europeia. Esses números destacam a extensa pegada ambiental associada ao setor têxtil no que diz respeito ao consumo de recursos naturais.

No cenário atual, o Brasil figura como a quinta maior potência na indústria têxtil global, além de ocupar o quarto lugar no setor de vestuário. Sua média de produção é substancial, com cerca de 1,3 milhões de toneladas de têxteis e 6,71 milhões de peças de vestuário. O país também se destaca por sua autossuficiência na produção de algodão e é reconhecido como a mais completa cadeia têxtil do hemisfério ocidental, abrangendo desde a produção da fibra até o comércio varejista. Ademais, há a perspectiva de se tornar um proeminente exportador mundial de fibras sintéticas, impulsionada pela descoberta do pré-sal (Souza Neto, 2024).

De acordo com a Associação Brasileira da Indústria Têxtil e de Confecção - ABIT, o Brasil desempenha um papel significativo no mercado de trabalho, possuindo mais de 25 mil companhias têxteis que geram cerca de 1,5 milhões de empregos diretos e aproximadamente 8 milhões de postos indiretos, sendo o segundo maior empregador na indústria de transformação, ficando atrás apenas do setor de alimentos e bebidas. Essa posição ressalta a importância do segmento têxtil na economia nacional, não somente pelo uso intensivo de mão de obra, mas também pelo impacto positivo na geração de renda e empregos (Cavalcanti e dos Santos, 2022).

3.1.1 Demanda de Água

A indústria têxtil emerge como um dos principais demandantes de água doce global, englobando um consumo anual de aproximadamente 93 bilhões de metros cúbicos, equivalente a 4% do total mundial de captação de água doce por ano. Esse substancial dispêndio hídrico na esfera têxtil abrange um espectro abrangente, desde a etapa de cultivo das fibras até uma série de processos fabris, como alvejamento, tingimento, curtimento, desengomagem, tinturaria e outras operações (Fundação Ellen MacArthur, 2022).

Na indústria têxtil, a água desempenha um papel fundamental, sendo empregada como meio de transporte para os produtos químicos que são introduzidos no processo, além de ser utilizada para eliminar o excesso desses produtos considerados indesejáveis no substrato têxtil. Grande parte da carga de poluentes presente nos efluentes aquosos provém de impurezas inerentes à matéria-prima, como os produtos adicionados para facilitar as etapas de fiação e tecelagem, produtos químicos auxiliares e corantes que são eliminados durante as diversas fases do acabamento. A quantidade e a qualidade dessa carga poluente estão intrinsecamente ligadas às fibras empregadas na produção dos tecidos brutos (Rytchyskyi *et al.*, 2021).

De acordo com o CBHSF – Comitê de Bacias Hidrográficas do Rio São Francisco (2019) a produção de uma única calça jeans, desde o cultivo do algodão até chegar ao consumidor final, requer uma demanda de mais de cinco mil litros de água. Essa informação emerge do projeto Pegada Hídrica, que adota a metodologia global da Rede de Pegada Hídrica (*Water Footprint Network*). A avaliação se baseia em três indicadores:

- **Pegada Verde:** que engloba o volume de água da chuva empregado pelas plantas ao longo dos processos agrícolas na cadeia produtiva;
- **Pegada Azul:** relativa ao consumo proveniente de fontes de água doce e subterrâneas, sem retornar a essas fontes originais;
- **Pegada Cinza:** associada ao volume de água essencial para que a natureza absorva o efluente reintegrado ao ambiente.

A confecção de uma calça jeans, desde o processo do plantio da matéria-prima até o pós-consumo, utiliza uma quantidade considerável de água, de acordo com o CBHSF (2019). Para o plantio da matéria-prima, utiliza-se cerca de 4247 L, para tecelagem 127 L, para confecção e lavanderia 362 L, varejo onde não há consumo significativo de água, consumidor 460 L e por fim o pós-consumo onde não há consumo significativo de água, sendo gastos assim 5196 L (Figura 1).

Figura 1 - Quantidade de Água para Confecção de uma Calça Jeans



Fonte: CBHSF, 2019.

Essa medida relacionada a uma única peça, o emblemático jeans, presença frequente nos guarda-roupas de pessoas de diferentes estratos sociais no Brasil, destaca o impacto substancial da indústria da moda, especialmente nos setores têxtil, de confecção e vestuário, sobre os recursos hídricos. Embora esse ramo tenha um papel significativo na criação de empregos e geração de renda, não se pode ignorar os efeitos ambientais que acarreta, potencialmente ameaçando os recursos aquáticos em nível global (Silva e Xavier, 2020).

A água desempenha um papel essencial em várias etapas da indústria têxtil, especialmente no processo de beneficiamento. Sua utilização é observada de forma direta em

processos como lavagem, tingimento e amaciamento, ao mesmo tempo em que é empregada de forma indireta para facilitar o aquecimento ou resfriamento em diferentes estágios do beneficiamento (Macêdo, 2022).

O processo de beneficiamento têxtil é dividido em três fases distintas, cada uma com resultados específicos e essenciais:

- Fase Primária: Nesta etapa, os materiais são preparados para as fases subsequentes, incluindo a lavagem e a fervura dos tecidos. O objetivo principal é a limpeza e o desengomamento do tecido, eliminando óleos e aditivos aplicados durante a tecelagem. As atividades envolvidas incluem escovagem, tesouragem, navalhagem, chamuscagem e branqueamento, entre outras. Ao final desta fase, o tecido está pronto para receber a tintura;
- Fase Secundária: Durante esta fase, ocorre o tingimento dos tecidos, conferindo-lhes uma nova coloração uniforme. O processo pode envolver tingimentos reativos, pigmentos a seco, entre outros métodos;
- Fase Terciária: Esta fase visa aprimorar a aparência e a qualidade do tecido através de procedimentos físicos e químicos, proporcionando um efeito mais nobre ao material.

Conforme observado por De Almeida *et al.* (2025), à medida que a quantidade de água de boa qualidade diminui e as regulamentações em países industrializados se tornam mais rigorosas quanto à carga poluente de efluentes, o uso responsável da água se torna uma necessidade crescente.

De acordo com Mota (2022), o desafio reside em diminuir o uso de água sem comprometer a eficiência do processo, ou seja, buscar a redução da captação sem prejudicar a lucratividade do empreendimento. Ele também destaca que, sem dúvida, essa questão ganhará cada vez mais importância, uma vez que, em algum momento no futuro, a escassez de água tende a se tornar um problema global de maior ou menor magnitude.

A otimização da utilização da água na indústria têxtil pode ser alcançada por meio da atualização dos equipamentos e da incorporação de tecnologias avançadas nos processos e produtos, com o objetivo de reduzir o uso desse recurso natural tão precioso. Para minimizar o consumo de água, é essencial monitorar os desperdícios diários no processo de produção, de forma semelhante ao que se faz com outros recursos, como o ar comprimido, energia térmica ou eletricidade, visando a economia de custos para a empresa (Narimatsu *et al.*, 2020).

3.1.2 Reuso de Água

O aproveitamento de águas residuais não é uma ideia recente e tem uma longa história de aplicação em todo o mundo. Há registros da sua utilização na Grécia Antiga, envolvendo o tratamento de esgoto e seu uso na irrigação. Contudo, o aumento da demanda por água tem transformado o reuso planejado da água em um tema atual e de extrema relevância (De Almeida, *et al.*, 2025).

O reaproveitamento ou reuso da água é o processo pelo qual a água, independentemente de ter sido tratada ou não, é utilizada novamente, seja para a mesma finalidade original ou para outra diferente. De acordo com a Resolução nº 54, de 28 de novembro de 2005, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), o reuso de água representa uma prática que promove a racionalização e a conservação dos recursos hídricos, seguindo os princípios estabelecidos na Agenda 21. Essa abordagem contribui significativamente para a redução da liberação de poluentes em corpos d'água receptores, preservando, assim, os recursos hídricos destinados ao abastecimento público e a outros usos que requerem água de alta qualidade. Além disso, essa prática auxilia na diminuição dos custos associados à poluição e desempenha um papel fundamental na proteção do meio ambiente e na promoção da saúde pública (Rytchyskyi e De Almeida, 2021).

A água de reuso não atende aos padrões de qualidade exigidos para o consumo humano, porém, pode ser empregada em diversas finalidades. Essa água tem a capacidade de ser reaproveitada várias vezes e para uma variedade de usos, desde que passe por tratamento de forma a alcançar a qualidade necessária para as respectivas finalidades. Além disso, seu uso deve ser economicamente viável, ambientalmente seguro e aceitável pela comunidade. Os esgotos tratados desempenham um papel crucial no planejamento e na gestão sustentável dos recursos hídricos, servindo como alternativa ao uso de água de qualidade superior em aplicações agrícolas, florestais, industriais, urbanas e ambientais (Moura *et al.*, 2020).

No Brasil, não há uma legislação federal que estabeleça os procedimentos e critérios de qualidade para o reuso da água. No âmbito nacional, é importante mencionar duas resoluções do CNRH, que são as seguintes:

- Resolução nº 54/ 2005 – CNRH: estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reuso direto não potável de água;
- Resolução nº 121/2010 – CNRH: estabelece diretrizes e critérios para a prática de reuso direto não potável de água na modalidade agrícola e florestal, definida na Resolução CNRH nº 54/2005.

No entanto, é importante observar que essas duas resoluções não fornecem procedimentos detalhados para a implementação da prática de reuso, sendo bastante abrangentes em sua abordagem.

De acordo com Da Silva Marques *et al.* (2022) a reutilização de água residuária oferece diversas vantagens, que incluem a preservação da água potável, a proteção dos mananciais, a redução da demanda por água, a diminuição da poluição ambiental por produtos químicos, a economia nos gastos com aquisição de água, a redução do volume de esgoto descartado e a diminuição dos custos relacionados à água e ao saneamento.

Santos *et al.* (2023) também ressalta uma série de benefícios decorrentes do uso de águas residuárias, desde que os sistemas de reuso sejam planejados e implementados de forma segura. Isso inclui a minimização do despejo de efluentes em mananciais, a preservação do solo, a proteção de aquíferos e o aumento da produção de alimentos, graças à irrigação agrícola.

Também é importante ressaltar os benefícios nos setores industriais que não requerem água potável de alta qualidade. Isso inclui a utilização de águas residuárias para a geração de vapor, abastecimento de banheiros, fins paisagísticos, lavagem de pátios, peças e frotas (Almeida, 2024).

Contudo, é fundamental reconhecer que, apesar das diversas vantagens do reuso de água, existem riscos associados ao seu uso que não podem ser negligenciados. A utilização de águas residuárias traz consigo potenciais riscos para a saúde humana e o meio ambiente, especialmente quando há a presença de substâncias tóxicas e patógenos em concentrações que ultrapassam os limites estabelecidos, colocando em perigo tanto a saúde das pessoas como o equilíbrio ambiental (Silva, 2020).

As diferentes opções de reuso de água, com destaque para os riscos à saúde associados a essas águas, especialmente quando não são adequadamente gerenciadas, são apresentadas no Quadro 1, evidenciando a importância de abordar a prática de reuso de água em relação à saúde pública.

Quadro 1 - Tipos de Reuso da Água e sua Associação aos Riscos à Saúde

| Forma de reuso | Riscos à saúde |
|-------------------|---|
| Agrícola | <ul style="list-style-type: none"> • Contaminação de consumidores de alimentos contaminados com organismos patogênicos e/ou substâncias químicas tóxicas; • Contaminação direta dos trabalhadores; • Contaminação do público por aerossóis; • Contaminação de consumidores de animais que se alimentam de pastagens irrigadas, ou que sejam criados em lagoas contaminadas. |
| Industrial | <ul style="list-style-type: none"> • Conexão cruzada entre sistemas de água potável e de reuso; • Se utilizada como água de processo, pode haver contaminação de produtos comestíveis; |

| | |
|---------------------------------|--|
| | <ul style="list-style-type: none"> • Contaminação direta dos trabalhadores. |
| Recreacional | <ul style="list-style-type: none"> • Doenças de veiculações hídrica, infecção nos olhos, ouvidos e nariz; • Ingestão de contaminantes químicos ou irritação dos olhos e mucosas, devido aos efluentes industriais; • Contaminação direta dos trabalhadores. |
| Recarga de Aquífero | <ul style="list-style-type: none"> • Contaminação de aquíferos utilizados como fonte de água potável; • Contaminação direta de trabalhadores; |
| Reuso urbano não potável | <ul style="list-style-type: none"> • Conexão cruzada entre sistemas de água potável e de reuso; • Contado como água recuperada utilizada para irrigação de parques e jardins ou lavagens de ruas; • Contaminação direta de trabalhadores. |
| Reuso potável | <ul style="list-style-type: none"> • Ingestão de contaminantes biológicos e químicos; • Contaminação dos trabalhadores. |

Fonte: Adaptado de Lucena *et al.* (2018); (Da Paixão, De Oliveira Ferreira e Santos (2023).

A reutilização da água levanta questões de segurança e de sustentável aproveitamento, incluindo o nível de tratamento que é necessário para alcançar uma determinada aplicação. As respostas dependem da aplicação pretendida da água. Este conceito deve ser comparado com seu uso pretendido e é uma parte fundamental no sistema de gestão sustentável das águas. O nível de tratamento que deve ser aplicado às águas residuais é determinado pela utilização prevista para o efluente tratado (Da Paixão, De Oliveira Ferreira e Santos, 2023).

A necessidade de aumentar a eficiência hídrica nas fábricas de tecidos se torna ainda mais urgente em tempos de aumento da demanda global por água, escassez do recurso essencial à vida, racionamentos e mudanças climáticas em curso.

3.2 ARRANJO PRODUTIVO LOCAL DO AGreste PERNAMBUCANO – APLCAPE

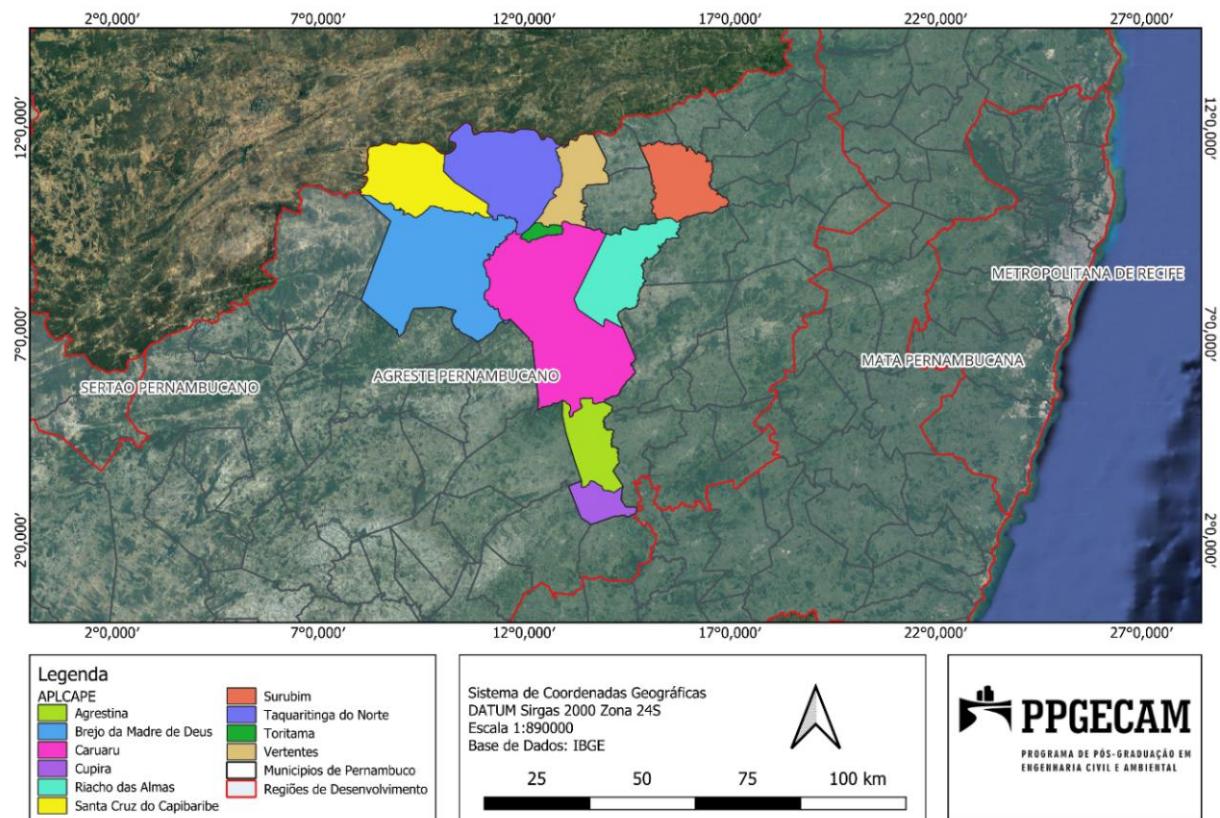
Os Arranjos Produtivos Locais (APL) se caracterizam como concentrações de empresas em torno de uma atividade compartilhada, envolvendo a presença de organizações relacionadas e instituições de apoio (Silva e Martinelli, 2021). Este conceito foi originalmente desenvolvido com base nas experiências de aglomerações econômicas observadas nas décadas de 1960 e 1970 na Alemanha e na Itália. A formação dos APL geralmente está associada a trajetórias históricas que envolvem a construção de identidades e a criação de laços territoriais fundamentados em elementos compartilhados de natureza social, cultural, política e econômica (Pantolfi *et al.* (2023).

No contexto brasileiro, a Rede de Pesquisa em Sistemas Produtivos e Inovativos Locais - REDESIST define um arranjo produtivo local como uma aglomeração geográfica de agentes econômicos, políticos e sociais, focalizada em um conjunto específico de atividades econômicas que exibem conexões e interdependência (Podcameni, Lustosa e Marcelino, 2020).

Ao analisar-se a região Nordeste do Brasil, encontra-se o segundo maior polo produtor do país, conhecido como o Arranjo Produtivo Local de Confecções do Agreste Pernambucano – APLCAPE, onde a indústria têxtil tem desempenhado um papel significativo no crescimento industrial do estado de Pernambuco, particularmente no contexto do APL (Esteves e Peixoto, 2021).

O surgimento do Polo de Confecções do Agreste teve origem na iniciativa de indivíduos que residiam em áreas predominantemente rurais do Estado. Esse arranjo começou a se formar nas décadas de 1950 e 1960, adquirindo significativa relevância na região do Agreste e é formado pelos municípios de Caruaru, Toritama, Santa Cruz do Capibaribe, Surubim, Cupira, Agrestina, Brejo da Madre de Deus, Riacho das Almas, Taquaritinga do Norte e Vertentes, conforme Figura 2 (Brito *et al*, 2025).

Figura 2- Localização APLCAPE



Fonte: Autora, 2025.

O APLCAPE assume uma posição de destaque tanto na economia regional nordestina quanto no cenário nacional. Suas implicações abrangentes incluem a significativa geração de empregos e renda, sendo um dos principais empregadores na região e beneficiando uma considerável parcela da população local; as atividades associadas à confecção, que vão além da produção e englobam a comercialização, distribuição e serviços correlatos, contribuem para dinamizar a economia local; desempenha um papel crucial no fortalecimento da identidade

regional, muitas vezes vinculada a uma identidade cultural específica, agregando valor à diversidade da região; No contexto da competitividade global, as empresas do APLCAPE buscam constantes inovações em design, produção e tecnologia para competir em mercados mais amplos e esse estímulo à inovação impulsiona o setor e promove um ambiente criativo e diferenciado; a contribuição para as exportações é notável, elevando a presença internacional da moda brasileira. A formação de mão de obra especializada, impulsionada pela demanda por profissionais qualificados, melhora os padrões de empregabilidade e a qualidade do trabalho local; E promove a sustentabilidade econômica ao fortalecer a cadeia produtiva local, reduzindo a dependência externa e consolidando a resiliência econômica da região (Duarte e Da Silva, 2020).

Conforme informações apresentadas no Estudo Econômico do APLCAPE, disponibilizado pelo Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (SEBRAE), conforme citado por Neto *et al.* (2018), o faturamento bruto anual do Polo se aproxima da marca de R\$ 1 bilhão. Este polo compreende quase 20 mil unidades produtoras, gerando emprego para aproximadamente 130 mil pessoas.

O Agreste Pernambucano detém a posição de segundo maior polo de confecção têxtil no Brasil, produzindo aproximadamente 800 milhões de peças de vestuário anualmente, destinadas tanto ao mercado nacional como ao internacional, conforme relato do Agreste TEX (Borges, 2020). Conforme Xavier (2020) o Polo de Confecções do Agreste de Pernambuco é caracterizado como um conglomerado de unidades produtivas, focadas na produção e comercialização em escala fabril de roupas e acessórios. Essa atividade se destaca, sobretudo, por meio de feiras que atraem compradores não apenas da região circunvizinha, mas também de diversas outras áreas do país.

Toritama, situada na região do Agreste Setentrional de Pernambuco, merece destaque especial. Conhecida como a "capital do jeans", é o segundo maior polo de produção de vestuário em jeans do Brasil, respondendo por 16% da produção nacional e sendo a principal do Nordeste nesse segmento. A indústria de confecções local direciona sua produção para peças de vestuário mais populares e com preços mais acessíveis. Geralmente, essas roupas são comercializadas em pequenos estabelecimentos comerciais ou nas tradicionais feiras de rua conhecidas como "sulancas". Além de atender aos mercados locais e nacionais, o mercado de jeans de Toritama também exporta seus produtos para o exterior (Esteves e Peixoto, 2021).

De acordo com informações do Estudo Econômico das Indústrias de Confecções de Toritama/PE, conduzido e disponibilizado pelo SEBRAE (2019), o município de Toritama ostenta a posição de segundo maior polo de confecção de jeanswear no Brasil, abrigando mais

de mil fábricas especializadas nesse segmento. Estimativas apontam que Toritama é responsável por cerca de 15% da produção nacional de peças em jeans, consolidando-se como um dos principais geradores de empregos na indústria têxtil do país. A atividade produtiva concentra-se principalmente na confecção, lavagem e tingimento de peças destinadas aos mercados interno e externo.

Nesse sentido, as lavanderias desempenham um papel crucial no APLCAPE ao possibilitar a obtenção dos acabamentos desejados nas peças têxteis produzidas. No entanto, é evidente que essas instalações podem gerar tanto impactos positivos quanto negativos na região que as circunda. O primeiro tipo de impacto, de natureza positiva, está relacionado ao aspecto econômico, contribuindo para a geração de riqueza e empregos. Por outro lado, o segundo tipo de impacto, considerado adverso ao meio ambiente, resulta da liberação de efluentes sem tratamento adequado (ou tratados de forma parcial) com alto potencial poluente, da disposição inadequada de resíduos sólidos e das emissões atmosféricas, sobretudo provenientes da queima de combustíveis nas caldeiras, que carecem de sistemas de controle (Duarte e Da Silva, 2020).

3.3 POLUIÇÃO INDUSTRIAL

Para Campello (2023) poluição industrial consiste em qualquer forma de poluição que tenha sua fonte imediata de atividades realizadas por indústrias. Ela caracteriza-se pela emissão de resíduos poluentes na natureza proveniente das atividades de uma empresa, ou seja, os processos produtivos são os grandes responsáveis por lançar substâncias tóxicas no ar, na água e na floresta.

A poluição industrial, de acordo com Iberdrola (2022), é apontada como uma das principais causas da contaminação dos recursos naturais essenciais para a sobrevivência. A degradação da qualidade da água tem repercussões negativas no meio ambiente, na saúde e na economia global.

De Matos (2020) afirma que a poluição industrial é caracterizada como qualquer forma de poluição cuja fonte direta esteja relacionada às atividades industriais. Ela abrange todos os resíduos poluentes liberados no ar, os quais podem representar riscos para a saúde humana, bem como para a fauna e a flora.

Ao analisar a relação do consumo de água com poluição industrial, a indústria têxtil é consideravelmente uma das que possuem maior consumo de água, o que leva à geração de um grande volume de efluentes que acarretam em poluição (Batista, 2022).

A indústria têxtil, em específico no Brasil, é a quinta maior produtora do mundo e é considerada a segunda maior geradora de empregos, proporcionando conforto e segurança a

muitas famílias e representando assim uma grande importância para a economia do país. Porém, seu ramo demanda muita água em seus processos de produção, considerando-se todas as fases (Batista, 2022). Para Velusamy *et al.* (2021), as indústrias têxteis, sozinhas, são responsáveis por cerca de 54% da geração global de efluentes contendo corantes, contribuindo assim de forma substancial para a presença desses poluentes no meio ambiente em escala mundial.

A indústria têxtil pode contribuir para a poluição do ar devido à emissão de gases tóxicos durante o processo de fabricação, à poluição do solo devido ao descarte inadequado de resíduos sólidos e à poluição da água (principal tipo de poluição gerada e foco desse estudo) devido aos efluentes líquidos liberados durante os processos de tingimento, lavagem e acabamento têxtil, que contêm substâncias químicas, corantes e outros poluentes que podem contaminar os corpos d'água, como rios e lagos (De Sá Rocha *et al.*, 2021).

Nos dias atuais, a poluição ambiental surge como um dos problemas mais significativos que a sociedade enfrenta. A questão das águas residuais, originárias das atividades de fabricação de corantes e das indústrias de acabamento têxtil, emergiu como uma preocupação ambiental crucial. Essa preocupação tem motivado diversos pesquisadores a buscar e implementar abordagens sustentáveis no que diz respeito ao controle da poluição industrial. A disseminação generalizada da poluição da água e do meio ambiente ameaça a saúde e a sustentabilidade dos ecossistemas (Menezes, 2021).

3.3.1 Poluição Hídrica

De forma geral, a poluição hídrica pode ser definida como consequência da adição de substâncias, ou de formas de energia, que, diretamente ou indiretamente, alteram as características físicas e químicas do corpo d'água de uma maneira que prejudique a utilização das suas águas para usos benéficos (Morais, 2022).

As atividades industriais, especialmente as lavanderias de jeans, estão entre as que mais impactam o meio ambiente devido ao alto potencial de poluição e à complexidade química dos efluentes gerados durante as várias etapas de beneficiamento do jeans (Silva, 2023).

Atualmente, é evidente que a atividade de lavagem de jeans é a principal fonte dos problemas de poluição identificados na região do Agreste. As demandas de mercado por uma estética específica no jeans são atendidas por meio do processo de lavagem conhecido como "*stone washed*" (lavagem com pedras). Geralmente, devido à sua complexidade, essa etapa é realizada em uma unidade separada do processo de fabricação de jeans. Essa etapa de produção de jeans pode ocorrer dentro da própria empresa ou ser terceirizada (Da Silva Filho *et al.*, 2021a).

Bonacini (2023) fala que um elemento de significância na indústria têxtil é o efluente resultante do processo de beneficiamento das fibras, frequentemente caracterizado por sua coloração artificial e pela presença de contaminantes como surfactantes, umectantes, corantes, peróxido de hidrogênio, sais e diversos outros poluentes que podem apresentar ameaças aos corpos de água receptores, incluindo potenciais efeitos tóxicos sobre os organismos aquáticos.

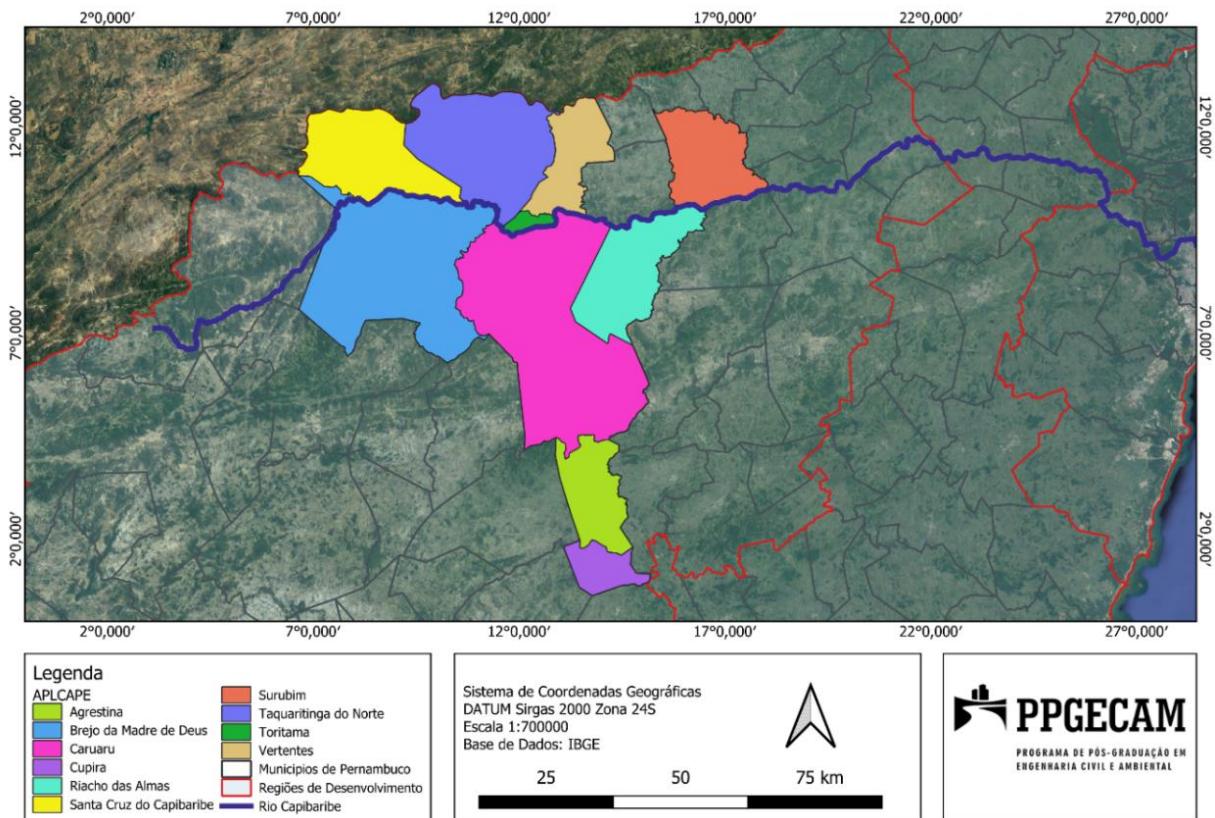
A poluição industrial se torna ainda mais agravante quando se considera que a maioria das lavanderias da região descarta seus efluentes sem tratamento adequado, e em alguns casos, até mesmo quando o tratamento é realizado, ele se mostra ineficaz (De Sá Rocha *et al.*, 2021).

O lançamento de águas residuais industriais na rede de esgoto por parte das empresas industriais requer uma licença oficial. Essas licenças oficiais estabelecem limites máximos para a concentração de determinadas substâncias, restrições quanto ao pH e à temperatura, bem como o volume máximo permitido. No entanto, lamentavelmente, nem todas as empresas industriais seguem rigorosamente esses limites, resultando na descarga ilegal de grandes volumes de resíduos industriais prejudiciais ao meio ambiente (Buras e Donado, 2020).

Em Pernambuco, a CPRH (Agência Estadual de Meio Ambiente) enfrenta um desafio ambiental significativo relacionado à poluição da água causada pelo despejo de efluentes industriais, com destaque para as indústrias têxteis, especialmente aquelas localizadas na região do Agreste, em particular no Polo de Confecções. As lavanderias desse APLCAPE desempenham um papel essencial na viabilização da produção têxtil, mas também têm o potencial de causar impactos ambientais tanto positivos quanto negativos na área circundante do empreendimento (Da Silva Filho *et al.*, 2021b).

Algumas lavanderias presentes no APLCAPE lançam, predominantemente, diretamente os efluentes têxteis contaminantes no Rio Capibaribe (conforme Figura 3), que tem sua origem na divisa dos municípios de Jataúba e Poção e atravessa várias áreas urbanas, desempenhando o papel de receptor de resíduos tanto industriais quanto domésticos. Inicialmente, segue uma direção sudeste-nordeste até se aproximar de Santa Cruz do Capibaribe, onde muda de curso e passa a fluir no sentido oeste-leste, percorrendo aproximadamente 280 km até desaguar na cidade do Recife. Em diversos trechos, ele também faz a divisão entre municípios pernambucanos, como acontece entre Santa Cruz do Capibaribe e Brejo da Madre de Deus (APAC, 2023).

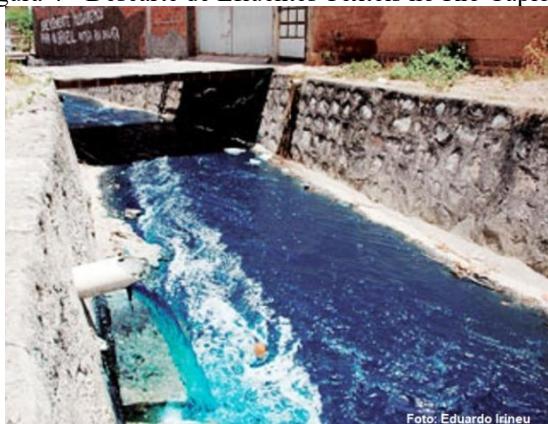
Figura 3 - Localização do Rio Capibaribe em Relação ao APLCAPE



Fonte: Autora, 2025.

Efluentes têxteis frequentemente são lançados nos corpos d'água sem tratamento adequado e sem verificação dos parâmetros de qualidade exigidos pelas normas. Em Toritama, cidade localizada a montante, o rio Capibaribe sofre com a poluição, que altera a coloração das águas, variando entre tons de azul e vermelho. A cidade, um importante polo industrial e o segundo maior produtor de calças jeans no Brasil, tem diversas unidades de tingimento que despejam efluentes contendo corantes diretamente no rio, sem tratamento prévio (Salgado, 2024).

Figura 4 - Descarte de Efluentes Têxteis no Rio Capibaribe



Fonte: Sousa, 2017.

Figura 5- Trecho do Rio Capibaribe em Toritama



Fonte: De Fátima, 2012.

Esses impactos se acumulam ao longo do curso do rio Capibaribe e são transportados até a sua foz, atravessando a Região Metropolitana do Recife (RMR), onde recebem uma significativa carga adicional de resíduos e efluentes urbanos (Nóbrega, 2023). O rio Capibaribe desempenha um papel fundamental no abastecimento de água para os municípios do Agreste pernambucano, no entanto, isso tem gerado problemas em relação à qualidade da água local utilizada para o fornecimento, resultando em um aumento nos custos de tratamento por parte da empresa de saneamento público.

Nesse contexto, torna-se imperativo adotar abordagens que priorizem a preservação dos recursos hídricos, especialmente considerando que a indústria de beneficiamento têxtil é altamente dependente da água como seu recurso primordial (Rocha *et al.*, 2021). Portanto, diante do exposto, é crucial avaliar os critérios de qualidade da água estabelecidos pela Resolução CONAMA 430/2011, que estabelece as condições e os padrões para o descarte de efluentes conforme indicado no Quadro 2. É responsabilidade do governo monitorar e tomar medidas contra empresas que despejam efluentes de forma irregular.

Quadro 2 - Condições e Padrões para o Descarte de Efluentes Conforme Resolução CONAMA 430/2011

| Parâmetros | Valores | Observações |
|------------------------------|--|---|
| pH | Entre 5 a 9 | - |
| Temperatura | Inferior a 40°C | - |
| Cor, turbidez e salinidade | - | Sugere que os efluentes lançados devem atender a condições que não causem impactos ambientais adversos. |
| Sólidos em suspensões totais | Até 100 mg/L em relação ao corpo receptor | - |
| Materiais sustentáveis | Até 1 mL/L em teste de 1 hora em cone Inmhoff. | Para lançamento em lagos e lagoas, os materiais sedimentáveis deverão estar virtualmente ausentes; |
| Regime de lançamento | Vazão máxima de até 1,5 vez a vazão média do período de atividade diária do agente poluidor; | - |
| Óleos e graxas | Óleos minerais até 20 mg/L; Óleos vegetais e gorduras animais até 50 mg/L; | - |
| DBO | Remoção mínima de 60% de DBO | - |

Fonte: Adaptado da Resolução CONAMA 430/11.

É importante destacar que a Resolução CONAMA 430/2011 não desconsidera parâmetros como cor, turbidez e salinidade, mas deixa sua regulamentação sujeita à avaliação caso a caso, considerando a qualidade da água do corpo receptor e suas exigências de uso. Caso seja identificado um impacto ambiental significativo, as autoridades competentes podem estabelecer medidas de controle para esses parâmetros.

Além disso, é fundamental observar os critérios estabelecidos pela Instrução Normativa 003/2022 da CPRH, que regula o processo de licenciamento ambiental e a operação de indústrias de beneficiamento têxtil no estado de Pernambuco. Essa norma determina que o reuso de efluente tratado deve contar com um sistema de tratamento de efluentes líquidos industriais capaz de atender aos padrões de lançamento especificados no Quadro 3.

Quadro 3 - Condições de Lançamento de Reuso de Efluentes Conforme Instrução Normativa 003/2022 - CPRH

| Reuso | Parâmetros | Valores |
|--|-------------------------------------|---|
| Acima de 70% de efluente gerado | Redução da DQO | 60% |
| | Redução da DBO | 60% |
| | Demais parâmetros | De acordo com o artigo 16 da Resolução CONAMA 430/2011. |
| Acima de 60% e menor de 70% de efluente gerado | Redução da DQO | 70% |
| | Redução da DBO | 70% |
| | Demais parâmetros | De acordo com o artigo 16 da Resolução CONAMA 430/2011. |
| Abaixo de 60% | Implantação de Tratamento Biológico | - |
| | Redução da DQO | 80% |
| | Redução da DBO | 90% |
| | Demais parâmetros | De acordo com o artigo 16 da Resolução CONAMA 430/2011. |

Fonte: Adaptado da Instrução Normativa 003/2022 - CPRH

Considera-se que as indústrias têxteis devem adotar abordagens inovadoras e mais adequadas para o tratamento de suas águas residuais, com o objetivo de evitar que grandes quantidades de poluentes sejam lançadas nos corpos d'água, prejudicando não apenas o aspecto ambiental do ecossistema, mas também os aspectos sociais e econômicos (Júnior e De Azevedo, 2024). Portanto, torna-se essencial implementar sistemas de tratamento para os subprodutos descartados, a fim de prevenir danos ao meio ambiente.

3.4 EFLUENTES TÊXTEIS

O efluente industrial é o líquido resultante dos processos industriais, compreendendo a parte líquida dos resíduos gerados por um processo específico. A composição desse efluente é altamente variável, com características físicas, químicas e biológicas que dependem da natureza da indústria em questão (sua tipologia), do tipo de matéria-prima processada, das etapas de transformação empregadas no processo, do tamanho da indústria e da adoção de sistemas de tratamento de efluentes e programas de redução de resíduos e emissões (Gazola, 2020).

Segundo Vasconcelos *et al.* (2022), os efluentes provenientes da indústria têxtil representam uma combinação complexa de elementos, incluindo uma grande quantidade de água, corantes, metais, amaciadores, detergentes e diversos outros produtos químicos. Isso resulta em um efluente líquido de natureza intrincada e potencialmente tóxica, caracterizado

por elevada Demanda Química de Oxigênio (DQO), sólidos totais em suspensão (TSS), sólidos totais dissolvidos (TDS), nitrogênio total (TN), pH alcalino, salinidade e temperatura. Conforme mencionado pelos autores, a presença de corantes e aditivos, como soda cáustica, carbonato de sódio e sais, utilizados nos processos industriais, contribui para a variedade de metais encontrados nos efluentes têxteis.

Os efluentes são notáveis pela sua considerável capacidade de contaminação, em grande parte devido à presença de corantes e outros aditivos. Isso resulta em valores elevados de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), DQO e sólidos suspensos, além de conferir uma coloração intensa ao efluente final, especialmente devido ao processo de tingimento das peças de jeans. Na prática, esses parâmetros indicam claramente a necessidade de determinar o método de tratamento mais adequado para esses efluentes (Braz, 2023).

A indústria de tingimento têxtil é conhecida por seu elevado consumo de água e pela geração em larga escala de efluentes, resultantes das diversas fases dos processos de tingimento e acabamento. As águas residuais provenientes das unidades de impressão e tingimento são frequentemente caracterizadas pela presença de intensas colorações, contendo resíduos de corantes e produtos químicos reativos (Carvalho, 2024). De acordo com Batista (2022), uma parcela considerável desses corantes permanece nos efluentes têxteis, apresentando propriedades tóxicas, cancerígenas e mutagênicas prejudiciais a todas as formas de vida. Esses corantes tóxicos podem persistir no meio ambiente por períodos prolongados quando lançados sem tratamento adequado. Isso é particularmente relevante na região Nordeste do Brasil, como destacado por Carvalho (2024) onde os corantes têxteis merecem especial atenção.

Os processos de tingimento e lavagem conduzidos pelas indústrias têxteis resultam na produção de efluentes, nos quais os corantes que não aderem completamente às fibras do tecido são liberados no meio aquoso (Narimatsu *et.al*, 2020). Isso faz com que o ambiente aquático seja propício à solubilização dessas substâncias. Consequentemente, os efluentes gerados apresentam baixa DBO e, portanto, alta DQO, além de conter metais pesados, compostos carcinogênicos e variações significativas de pH e temperatura.

De maneira geral, estima-se que entre 15% e 50% da carga de corantes presente nos efluentes seja proveniente das etapas que envolvem descoloração com o uso de permanganato de potássio, tingimento e lavagem. É importante ressaltar que uma parcela substancial desses corantes demonstra ser recalcitrante, ou seja, resistente, aos processos biológicos convencionais, mesmo quando se empregam sequências de tratamento anaeróbico seguido de tratamento aeróbio (Rocha, 2021).

Existem diversos tipos de corantes, e sua classificação pode ser baseada tanto na estrutura química quanto no método de fixação nas fibras. Em relação à estrutura química do grupo cromofórico, os corantes podem ser categorizados como azo, antraquinona, trifenilmetano, heterocíclicos e poliméricos, sendo que as variedades azo, antraquinona e trifenilmetano representam a maioria dos corantes têxteis produzidos (Liu *et al.*, 2021). Em resumo, devido à presença de anéis aromáticos, grupos de aminas, íons metálicos e grupos sulfônicos em suas estruturas, esses corantes suscitam preocupações devido à sua resistência à degradação natural.

O despejo direto de efluentes nos rios não apenas prejudica a vida vegetal e animal, mas também é responsável por diversas doenças humanas. Apesar das graves consequências, os efluentes da indústria têxtil são frequentemente descartados nos corpos de água sem passar por nenhum tratamento prévio, ou ocasionalmente, após tratamento parcial e inadequado, resultando na degradação da qualidade da água receptora (Costa *et al.*, 2022).

Conforme a legislação, como mencionado por Lino (2021), é obrigatória a eliminação de todos os corantes utilizados no processo de tingimento antes do descarte nos corpos d'água ou nos efluentes industriais. As indústrias têxteis empregam quantidades significativas de água em suas operações de tingimento e beneficiamento de fibras, resultando na geração de efluentes com presença de corantes, surfactantes, íons inorgânicos, agentes umectantes e outros compostos. Portanto, é de suma importância desenvolver estratégias de gestão ambiental que visem aumentar a remoção dos corantes, minimizar as perdas no processo de tingimento e promover o reuso da água, sem comprometer a qualidade do produto final, como destacado por Júnior e De Azevedo (2024).

Dentro da produção têxtil, etapas como o dimensionamento e o desengomamento geram quantidades reduzidas, porém altamente concentradas, de efluentes contaminados. Além disso, a fase de limpeza, que visa eliminar impurezas das fibras, envolve a aplicação de substâncias limpadoras, incluindo detergentes, sabões, álcalis, agentes umectantes, antiespumantes e lubrificantes, contribuindo significativamente para o aumento dos níveis de DQO e sólidos suspensos nos efluentes têxteis. Em adição, as etapas de tingimento e impressão, que desempenham um papel crucial no processo industrial têxtil, introduzem cor, metais e sais nos efluentes gerados, como observado por Mirza *et al.* (2020).

É notório que a indústria têxtil libera águas residuais contendo uma ampla gama de contaminantes. Enquanto muitos desses poluentes lançados são orgânicos e biodegradáveis, uma parcela considerável apresenta características recalcitrantes, devido à sua estrutura química complexa e origem sintética, o que torna o processo de tratamento altamente desafiador. À

medida que a demanda por produtos têxteis diversificados cresce, também aumenta a quantidade e a diversidade de efluentes poluídos gerados. Esses efluentes são notáveis por sua persistência em ambientes aquáticos, uma característica atribuída à complexa estrutura aromática e origem sintética dessas substâncias (Júnior e De Azevedo, 2024).

Para lidar com o tratamento desses efluentes, é comum recorrer às Estações de Tratamento de Esgoto (ETE). No entanto, como mencionado por Tassi (2022), mesmo com a monitorização contínua dessas estações, ainda existem riscos ambientais associados ao descarte de efluentes que não podem ser completamente degradados.

3.5 TRATAMENTO DE EFLUENTES INDUSTRIAIS/TÊXTEIS

O tratamento de efluentes industriais desempenha um papel essencial na prevenção da poluição ambiental, assegurando que os resíduos gerados não causem danos aos recursos naturais. É um procedimento de extrema importância para preservar nosso ambiente (Ramos *et al.*, 2020a).

A produção de bens que atendem às necessidades humanas requer um controle rigoroso dos efluentes, pois, sem o tratamento adequado, esses resíduos podem se tornar agentes poluentes e contaminantes. Como cada atividade industrial gera efluentes específicos, a cuidadosa análise para determinar o tratamento mais adequado torna-se um processo crucial, garantindo que as indústrias possam operar de forma sustentável, sem prejudicar o meio ambiente (Azevedo, 2020).

Os sistemas de tratamento de efluentes, de acordo com Oliveira (2021), têm como principal objetivo cumprir a legislação ambiental, e em determinados casos, possibilitar a reutilização da água. A norma NBR 9800/97 é o conjunto de regulamentos que estabelece todos os critérios necessários para o descarte adequado dos efluentes industriais.

Um dos principais compromissos da indústria têxtil em relação ao tratamento de seus efluentes é assegurar a conformidade com a legislação em vigor, garantindo que os níveis de poluição dos resíduos estejam dentro dos limites estabelecidos. Essa conformidade requer a observância das normas específicas definidas em cada estado, além de regulamentações de âmbito nacional, como as estabelecidas pelo CONAMA.

Um exemplo é a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, que estabelece diretrizes rigorosas para que os efluentes da indústria têxtil atinjam padrões que permitam sua liberação em corpos d'água. Em resumo, o CONAMA busca garantir que os resíduos liberados não prejudiquem a vida aquática na região, preservando o uso adequado da água. Dentre os padrões avaliados pelo CONAMA estão pH, temperatura dos efluentes, materiais sedimentáveis,

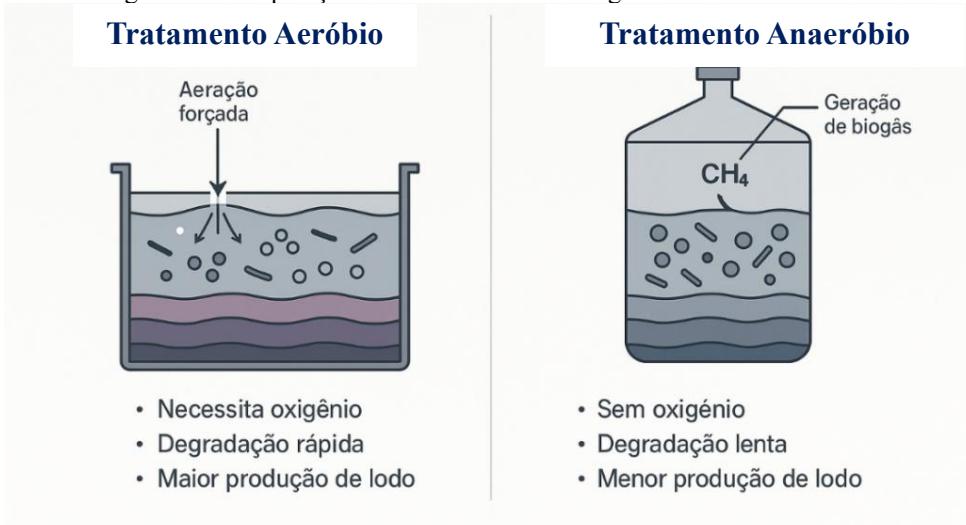
quantidade de lançamento e demanda bioquímica de oxigênio. Além disso, o CONAMA prevê que as próprias indústrias são as responsáveis por verificar se seus efluentes estão no padrão desejado. Para isso, elas devem encaminhar amostras para laboratórios regulamentados pelo INMETRO. Além disso, a mesma Resolução cita que a coloração do material a ser liberado não deve alterar drasticamente o corpo de água no qual será lançado. A Resolução CONAMA 430, de 13 de maio de 2011, complementa a Resolução 357, estabelecendo condições, padrões e diretrizes adicionais para o lançamento de efluentes, reforçando a importância de manter a qualidade dos corpos d'água receptores.

Ao tratar os efluentes na indústria têxtil, devido à extensa utilização de produtos químicos, geralmente um único procedimento não é capaz de alcançar os padrões exigidos pela legislação. Portanto, para prevenir contratemplos, é essencial empregar dois ou mais métodos de tratamento, o que resulta em um aumento nos custos (Faber e Oliveira, 2024).

3.5.1 Biológicos

Os métodos biológicos são reconhecidos pela sua eficiência na remoção de corantes sintéticos de efluentes, com baixo custo e geração reduzida de poluição secundária (Oliveira e Azevedo, 2021). Baseados na biorremediação, esses métodos utilizam microrganismos para transformar substâncias tóxicas em formas menos nocivas. A combinação de tratamentos anaeróbios e aeróbios tem se mostrado eficaz na degradação de corantes azo, comuns na indústria têxtil (Silva, Gavazza e Araújo, 2022). A Figura 6 ilustra as diferenças entre esses processos biológicos.

Figura 6 – Comparação entre Tratamento Biológico Aeróbio e Anaeróbio



Fonte: Autora, 2025.

3.5.1.1 Tratamentos Anaeróbios

A biodegradação é um processo em que microrganismos presentes no ambiente têm a capacidade de transformar uma molécula química complexa em uma molécula mais simples. Essas moléculas são usadas pelos microrganismos como fonte de carbono para obter a energia necessária para seu crescimento e manutenção do metabolismo (Silva, Gavazza e Araújo, 2023).

Oliveira, Azevedo e Cavalcanti (2021) afirmam que a habilidade de certos microrganismos para decompor substâncias orgânicas tóxicas é amplamente documentada. Em essência, o tratamento biológico anaeróbio se baseia na utilização das substâncias tóxicas de interesse como substrato para o crescimento e manutenção dos microrganismos. A principal motivação de pesquisadores envolvidos em estudos de biodegradação é a busca incessante por microrganismos versáteis que possam degradar eficazmente uma variedade de poluentes a um baixo custo operacional. Na prática, isso é desafiador, especialmente devido à diversidade, concentração e composição das espécies químicas presentes em cada efluente.

3.5.1.2 Tratamentos Aeróbios

De acordo com Oliveira, Azevedo e Cavalcanti (2021), o tratamento biológico por lodos ativados é o mais utilizado pela maioria das indústrias para degradação da matéria orgânica do efluente, principalmente na indústria têxtil. É constituído por um tanque de aeração em que o afluente é misturado com o lodo ativado por microrganismos (bactérias, fungos e protozoários), agitado e aerado, ocorrendo a oxidação da matéria orgânica para, em sequência, passarem por sedimentação em decantadores e serem novamente separados. Silva *et al.* (2021b) informa que a maior parte do lodo (biomassa) é recirculada de volta para o tanque de aeração e os microrganismos continuam no meio por um longo tempo, e a menor parte é retirada para tratamento específico.

Este método de tratamento é altamente eficaz na eliminação de matéria orgânica. No entanto, sua eficácia na remoção de corantes varia apenas de 10% a 30%, principalmente devido à adsorção dos corantes à biomassa (Silva *et al.*, 2021b).

3.5.2 Tratamento Físico-químicos

No contexto do tratamento de efluentes industriais, os processos físico-químicos desempenham um papel crucial, especialmente quando se lida com metais e bactérias que demonstram resistência aos métodos de tratamento biológicos (Moraes, 2025). A coagulação e floculação são procedimentos físico-químicos amplamente empregados nas indústrias para o tratamento de efluentes têxteis, devido à sua eficácia na remoção de sólidos suspensos, fósforo, redução da DQO e na diminuição da cor (Zhang, 2023).

3.5.2.1 Coagulação e Floculação

O processo de coagulação se desencadeia mediante a adição de um coagulante químico, que neutraliza as cargas eletrostáticas negativas presentes nos coloides, reduzindo assim o seu potencial de repulsão mútua e promovendo sua aglutinação. Em seguida, ocorre a floculação, que pode ou não envolver a utilização de um floculante, e que tem como resultado a organização das partículas em aglomerados maiores e mais densos, conforme Figura 7.

Figura 7- Coagulação – Floculação – Decantação de Efluente Bruto



Fonte: Werjen, 2023.

Esses aglomerados podem posteriormente ser removidos por meio de filtração e/ou decantação (Zhang, 2023). Para realizar a decantação, utilizando a gravidade para estabilizar essas partículas maiores no fundo do líquido ou o oposto, adicionando o processo de flotação, que faz as partículas subirem até a superfície (Werjen, 2023).

Para que o processo de coagulação funcione de maneira eficaz, é essencial considerar diversos fatores, como o pH, a concentração do coagulante, a agitação e o tempo de sedimentação. Nas indústrias têxteis, é comum utilizar a coagulação e floculação como tratamento primário antes do tratamento biológico. Isso visa reduzir a carga de poluentes inorgânicos, cor, metais pesados e matéria orgânica não biodegradável no afluente da unidade de tratamento biológico. Essa estratégia de processo resulta em uma economia significativa de custos, pois permite projetar uma unidade de tratamento biológico com menor capacidade volumétrica (Marques e Da Conceição, 2022).

Dentre os coagulantes amplamente pesquisados no tratamento de efluentes têxteis, destacam-se a quitosana e o tanino. Nesse método, observa-se que ocorre apenas uma mudança de fase dos poluentes, que anteriormente estavam na forma líquida e agora passam para a forma sólida, resultando em uma alta produção de lodo (Alves *et al.*, 2023).

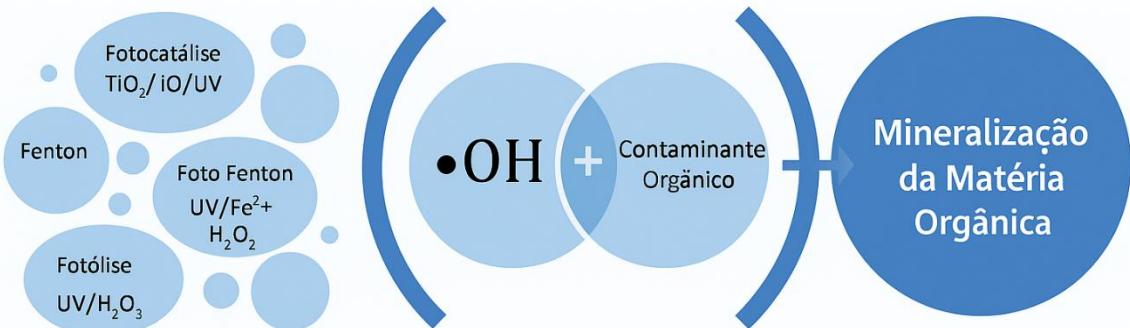
Outros métodos que estão sendo bastante estudados são os processos oxidativos avançados (POA).

3.6 PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS – POA

O constante aumento no volume de águas residuais que contêm poluentes não biodegradáveis, como os corantes sintéticos que resistem aos métodos tradicionais de tratamento de águas residuais, apresenta um desafio premente. É imperativo desenvolver novas tecnologias de descontaminação que sejam tanto ambientalmente seguras quanto eficazes (Schmidt *et al.*, 2023). Nesse cenário, surge como uma solução promissora para abordar o problema dos efluentes têxteis poluentes lançados em ecossistemas aquáticos os Processos Oxidativos Avançados, ou POA.

Os POA são fundamentados na criação de radicais livres,, com destaque para o radical hidroxila ($\cdot\text{OH}$). Este radical é conhecido por sua alta capacidade oxidante, sendo capaz de promover a rápida degradação de diversos compostos poluentes em questão de minutos (Batista *et al.*, 2022). Ferreira de Jesus (2021) destaca que os POA podem ser aplicados no tratamento de águas contaminadas por corantes, uma vez que possuem um potencial significativo para degradar essas moléculas, seja de forma parcial ou completa, o que muitas vezes não é alcançado pelos sistemas biológicos convencionais de tratamento.

Figura 8 – Esquema Representativo Simplificado dos POAs para a mineralização da matéria orgânica



Fonte: Lopes, 2023.

Segundo Azimi, Shirine e Pandashteh (2021), os POA, representam uma categoria de técnicas de tratamento químico destinadas à remoção de compostos orgânicos presentes em água e efluentes líquidos. Essas abordagens foram inicialmente propostas em 1987 com o objetivo de purificar a água por meio da produção de radicais hidroxila.

Na maioria das situações, os POA não resultam em resíduos, embora haja exceções em que alguns processos podem envolver a formação de precipitados, como óxidos férricos, por exemplo. Contudo, vale ressaltar que, como em qualquer método de tratamento, a oxidação avançada não é adequada para todos os tipos de resíduos. Os custos associados à mineralização

podem ser consideráveis, especialmente devido ao consumo de energia. Além disso, há o risco de produção de subprodutos indesejados, alguns dos quais podem ser até mais tóxicos do que os próprios resíduos (Santos *et al.*, 2022).

Os POA são empregados no tratamento de águas residuais e efluentes industriais com o propósito de eliminar compostos aromáticos, farmacêuticos, corantes, pesticidas e outros poluentes, tais como agentes patogênicos, metais pesados e ácidos carboxílicos. Quando aplicados em ambientes industriais, os POA têm se mostrado como tecnologias viáveis para o tratamento de diversos tipos de efluentes industriais (Porto, 2023).

Os processos oxidativos avançados auxiliam no combate a alguns problemas enfrentados pelas indústrias têxteis, como por exemplo: elevada coloração dos efluentes, pH alto e instável, alta DQO, sólidos suspensos, quantidade considerável de metais tóxicos (Cr, Ni, Cu, etc...), compostos orgânicos clorados e surfactantes (Araújo *et al.*, 2021).

Os agentes oxidantes predominantemente empregados incluem H_2O_2 , O_2 e O_3 . Além disso, processos que fazem uso do dióxido de titânio, peróxido de hidrogênio e radiação ultravioleta ($TiO_2/H_2O_2/UV$), bem como aqueles que envolvem o ferro e o peróxido de hidrogênio, têm sido reconhecidos por especialistas como altamente promissores para o tratamento de águas contaminadas por meio da ação dos radicais hidroxila (Porto, 2023).

O Quadro 4 é um quadro ilustrativo, elaborado por Porto (2023), da classificação dos POA.

Quadro 4 - Sistemas Típicos de Processos Oxidativos Avançados

| Processo | Homogêneo | Heterogêneo |
|-----------------|---|---|
| Com irradiação | O_3/UV H_2O_2/UV $O_3/H_2O_2/UV$ Foto-Fenton | Fotocatálise Heterogênea ($TiO_2/O_2/UV$) Fotocatálise Heterogênea ($TiO_2/H_2O_2/UV$) |
| Sem irradiação | O_3/HO^- O_3/H_2O_2 Reativo de Fenton | $O_3/catalisador$ |

Fonte: Porto (2023).

Existem diversos métodos para a geração de radicais $\cdot OH$ e a ativação dos oxidantes nos POA pode ocorrer por diferentes mecanismos. Os POA são uma tecnologia promissora para o tratamento de contaminantes persistentes e tóxicos. No entanto, alguns pesquisadores adotam uma abordagem cautelosa quanto à sua aplicação em soluções e efluentes, pois a degradação de poluentes pode gerar intermediários potencialmente mais tóxicos do que os compostos originais (Batista *et al.*, 2022).

A implementação de tecnologias baseadas em POA ainda exige pesquisas aprofundadas, sobretudo no que se refere ao desenvolvimento e à otimização de reatores em escala industrial,

que representam desafios significativos. Entre as principais limitações desses processos, destaca-se o alto custo dos reagentes, já que muitos POA utilizam insumos caros, como o peróxido de hidrogênio e catalisadores específicos, o que pode elevar consideravelmente o custo operacional. Além disso, alguns POA podem gerar subprodutos tóxicos e recalcitrantes, exigindo etapas adicionais de tratamento ou descarte adequado. Outro desafio está na baixa seletividade dos radicais hidroxila gerados, que podem não reagir de forma eficiente com todos os poluentes presentes, resultando em degradação incompleta ou formação de subprodutos indesejáveis. A eficiência em escala industrial também é limitada, uma vez que a transposição do processo do laboratório para aplicações em larga escala enfrenta obstáculos como a necessidade de grandes volumes de reagentes, dificuldades no controle do processo e limitações no desempenho dos reatores. A composição do efluente, incluindo características como cor, turbidez e presença de metais, pode ainda interferir negativamente na eficácia do tratamento. Por fim, alguns POA podem reduzir a biodegradabilidade do efluente, comprometendo a eficiência de tratamentos biológicos subsequentes (Porto *et al.*, 2024).

Para contornar essas limitações, diversas soluções têm sido propostas. A otimização das condições operacionais, por meio do ajuste de parâmetros como pH, temperatura e concentração de reagentes, pode aumentar significativamente a eficiência dos POA. A combinação desses processos com outras etapas de tratamento, como técnicas físico-químicas ou biológicas, pode melhorar a remoção de contaminantes e a qualidade final do efluente. O desenvolvimento de catalisadores mais eficazes e de menor custo também se apresenta como uma estratégia promissora para tornar os POA mais viáveis economicamente. Além disso, são necessários estudos mais aprofundados voltados à aplicação em escala industrial, com foco na eficiência técnica, na estabilidade operacional e na viabilidade econômica dos processos oxidativos avançados no contexto do tratamento de efluentes industriais (Araújo *et al.*, 2021).

O Quadro 5 apresenta o estado da arte dos principais estudos sobre o tratamento de efluentes têxteis, comparando a eficiência na remoção de parâmetros de qualidade como cor, turbidez e DQO. A análise permite compreender as vantagens dos diferentes tipos de tecnologias aplicadas, incluindo métodos biológicos, físico-químicos, processos oxidativos avançados e processos especiais utilizados como pós-tratamento em combinação com tecnologias mais amplamente empregadas.

Quadro 5 – Comparação da Eficiência de Tratamentos de Efluentes Têxteis por Diferentes Processos

| Tipo de processo | Trabalho (ano) | Tecnologia | Parâmetros Removidos | Eficiência (%) | Observações |
|------------------|----------------------------|----------------|----------------------|----------------|---------------------------------------|
| Biológico | Souza <i>et al.</i> (2017) | Lodos ativados | DQO | DQO: 85% | Boa eficiência, sensível a toxicidade |

| | | | | | |
|---------------------------------------|------------------------------------|--|---|---|--|
| | Silva <i>et al.</i> (2024) | Biorremediação com fungos (<i>trametes versicolor</i>) | Cor | Cor: 85% | Alternativa sustentável, em expansão |
| Físico-químico | Santos <i>et al</i> (2016) | Coagulação-flocação (FeCl_3) | Cor e turbidez | Cor: 85%, Turbidez: 80% | Baixo custo, gera lodo |
| Físico-químico + adsorção | Zhang <i>et al.</i> (2021) | Ultrafiltração + carvão ativado | Cor e DQO | Cor: 90%, DQO: 85% | Excelente para polimento final |
| | Arslan-Alaton <i>et al.</i> (2015) | Fotocatálise UV/ TiO_2 | Cor e DQO | Cor: 90%, DQO: 70% | Pós-tratamento, exige pré-filtração |
| | Rodríguez <i>et al.</i> (2018) | Ozonização | Cor e DQO | Cor: 95%, DQO: 75% | Alta eficiência, custo energético elevado |
| | Gomes <i>et al.</i> (2020) | Fenton ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$) | Cor e DQO | Cor: 93%, DQO: 88% | Muito eficaz, gera lodo ferroso |
| | Kim <i>et al.</i> (2023) | Fotofenton solar | Cor e DQO | Cor: 96%, DQO: 91% | Uso de energia solar reduz custos |
| POA | Garcia (2006) | Fotocatálise com TiO_2 sob exposição à luz solar. | Cor, DQO, turbidez, corantes | Cor e DQO foi em torno de 80% a 90% | Foi um dos primeiros a comprovar a eficácia da fotocatálise com TiO_2 no tratamento de efluentes têxteis, com 2 horas de exposição solar. |
| | Silva (2011) | Fotocatálise com TiO_2 sob exposição à luz solar. | Cor, DQO, corantes (principalmente corantes azo). | A remoção de cor e DQO atingiu cerca de 85% a 95%, com variação dependendo da concentração de TiO_2 e H_2O_2 . | Validou o TiO_2 como fotocatalisador para efluentes têxteis, especialmente na remoção de corantes azo, demonstrando que a combinação com H_2O_2 e 2 horas de exposição solar resultam em alta eficiência. |
| Combinado (Biológico + Físico) | Wang <i>et al.</i> (2019) | MBR (Biorreator com membranas) | DQO e turbidez | DQO: 90%, Turbidez: 99% | Excelente qualidade final, alto custo |
| Combinado (Biológico + POA) | Almeida <i>et al.</i> (2022) | UASB + Oxidação eletroquímica | Cor e DQO | DQO: 92%, Cor: 88% | Boa opção para alta carga orgânica |

Fonte: Autora, 2025.

Os processos físico-químicos, como coagulação-flocação, ultrafiltração com carvão ativado e adsorção com uso de carvão ativado, são eficazes na remoção rápida de turbidez e cor, mas geram lodo residual (Salgado, 2024). Processos biológicos, como lodos ativados e biorremediação com fungos, apresentam boas taxas de remoção de carga orgânica e são mais sustentáveis, embora sensíveis a substâncias tóxicas (Silva, 2023). Os POA, como fotocatálise,

ozonização, fenton e fotofenton solar, destacam-se pela alta eficiência na degradação de corantes e compostos recalcitrantes, mas podem demandar maior consumo energético ou gerar subprodutos (Chagas, 2022). Tecnologias combinadas, que integram etapas biológicas e físico-químicas ou oxidativas, oferecem remoções superiores e qualidade de efluente adequada para reuso, embora com custos de implantação mais elevados (Moraes, 2025).

A escolha da tecnologia depende das características do efluente e dos objetivos do tratamento, sendo comum a adoção de sistemas integrados para maximizar a eficiência. O Quadro 6 apresenta as concentrações de TiO₂ (catalisador), H₂O₂ (peróxido de hidrogênio) e o tempo de exposição à luz utilizados em diferentes estudos sobre a aplicação de POA para tratamento de efluentes têxteis, incluindo observações relevantes sobre os resultados e eficiência dos tratamentos em cada estudo.

Quadro 6 - Concentrações e Tempos Comumente Utilizados para Tratar Efluentes por POA

| Estudo | Concentração de TiO ₂ (g/L ⁻¹) | Concentração de H ₂ O ₂ (mM) | Tempo de exposição à Luz (h) | Observações |
|------------------------------------|---|--|------------------------------|---|
| Arslan-Alaton <i>et al.</i> (2015) | 3,0 | 30 | 1,5 | Alta eficiência, mas com maior consumo de catalisador |
| Rodríguez <i>et al.</i> (2018) | 1,0 | 40 | 3 | Usado para efluentes contendo corantes de difícil degradação |
| Gomes <i>et al.</i> (2020) | 2,0 | 35 | 2 | Resultados bons para efluentes com alta carga orgânica |
| Kim <i>et al.</i> (2023) | 2,0 | 25 | 2 | Similar aos valores de Garcia e Silva, com ótimos resultados para efluentes têxteis |
| Garcia (2006) | 2,0 | 25 | 2 | Melhores resultados para efluentes reais com exposição à luz solar |
| Silva (2011) | 2,5 | 20 | 2 | Resultados otimizados para efluentes têxteis com fotocatálise solar |

Fonte: Autora, 2025.

3.7 ANÁLISE DO CICLO DE VIDA

De acordo com Da Silva, De Castro Krakauer e Coda (2020) a Análise do Ciclo de Vida - ACV teve início na década de 60, com a crise do petróleo, através do uso de combustíveis fósseis o que levou a sociedade a questionar a forma de extração dos recursos minerais. Esses estudos analisavam o consumo de energia, tendo denominação como “análise de energia”.

Após a crise do petróleo os estudos da ACV tiveram uma queda, só retornando na década de 80 motivados pelos interesses ambientais. Muitos estudos realizados pela ACV chegavam a diferentes resultados, o que gerou a necessidade de padronizar a metodologia. Só a partir da

década de 90 a instituição *Society of Environmental Toxicology and Chemistry* – SETAC contribuiu de forma significativa com a elaboração do *SETAC Guidelines for Life Cycle Assessment – a Code of Practice* um documento responsável para padronizar a metodologia de ACV (Rodrigues, 2021).

A ACV é uma técnica desenvolvida para quantificar os possíveis impactos ambientais resultantes da fabricação e utilização de um produto ou serviço específico. A abordagem sistêmica da ACV é conhecida como "do berço ao túmulo", na qual são coletados dados em todas as fases do ciclo de vida do produto. O ciclo de vida abrange todas as etapas, desde a extração das matérias-primas até a produção, distribuição, uso, descarte, e inclui também a reciclagem e reutilização, quando aplicáveis (Da Silva Cruz, 2020).

Conforme Da Silva, De Castro Krakauer e Coda (2020) a produção de qualquer item pode afetar o meio ambiente de várias maneiras. Para avaliar esses impactos, são analisados os fluxos de matéria e energia que ocorrem ao longo do ciclo de vida do produto, relacionando-os a várias categorias de impacto ambiental. Isso permite compreender os efeitos negativos ou positivos associados à fabricação e uso desse produto específico.

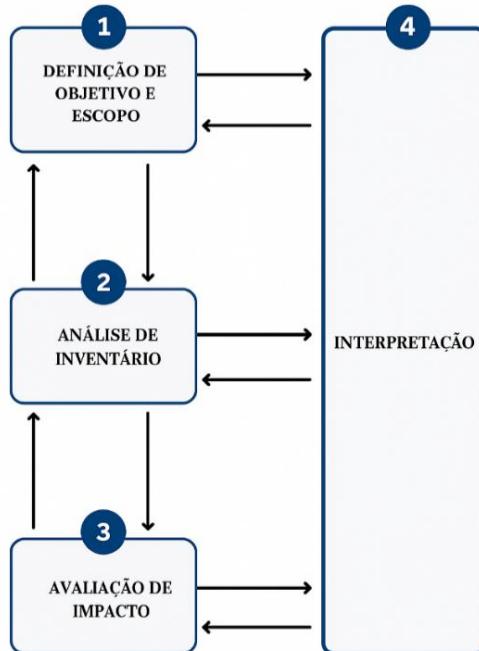
Os primeiros estudos sobre ACV no Brasil tiveram início nos anos 2000, com diversas iniciativas coordenadas por instituições públicas e acadêmicas. Destaca-se a atuação pioneira do Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia (IBICT), que, desde 2001, vem desenvolvendo projetos voltados à estruturação da ACV no país, como o Sistema Nacional de Inventário do Ciclo de Vida (SICV Brasil). Em 2010, foi formalizado o Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida (PBACV), por meio do Comitê Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (CONMETRO), com coordenação do INMETRO e presidência do IBICT. Universidades como a UnB, USP e UTFPR também têm desempenhado papel relevante no avanço da pesquisa e na formação de especialistas na área. Em 2021, foi criada a Rede de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (RAICV), promovendo cooperação entre instituições de pesquisa e aplicação prática da ACV no território nacional. Mais recentemente, em 2023, o projeto "Pedra Fundamental" ampliou o banco de dados do SICV Brasil, disponibilizando 34 novos inventários nacionais voltados à energia, transporte e materiais, fortalecendo a infraestrutura nacional para o uso da ACV em políticas públicas e processos industriais.

A ACV é uma ferramenta versátil que pode ser empregada tanto por pesquisadores em busca de uma compreensão mais profunda das relações entre sistemas produtivos e meio ambiente, quanto pela indústria, que pode aprimorar a eficiência de seus processos, reduzir custos e promover o marketing sustentável de seus produtos. Além disso, o setor governamental

pode se beneficiar dos resultados de estudos ACV para desenvolver e promover políticas públicas que visam à proteção ambiental e à promoção de práticas sustentáveis (Rodrigues, 2021).

A norma ISO 14040 estabelece os princípios e etapas essenciais para a realização de um estudo de ACV, que envolve quatro fases interligadas: definição de objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impacto e interpretação dos resultados (Da Silva Cruz, 2020). Essas fases estão ilustradas na Figura 9.

Figura 9- Fases da Análise do Ciclo de Vida



Fonte: Adaptado de NBR ISO 14040/2001.

No estágio inicial, conhecido como definição de objetivos e escopo, são delimitados os parâmetros do estudo. Isso engloba determinar o período e a localização relevantes, identificar a audiência-alvo para a qual os resultados se destinam, definir os critérios de qualidade, estabelecer os parâmetros de exclusão e especificar as categorias de impacto que serão avaliadas. Na fase subsequente, denominada análise de inventários, são coletados dados que representam as quantidades de matéria e energia envolvidas nas várias etapas do ciclo de vida do produto. Isso é realizado dentro dos limites previamente definidos na fase anterior. Na etapa de avaliação de impactos, os dados coletados durante o inventário são transformados em impactos ambientais. Isso é feito aplicando fatores de equivalência que convertem os resultados em unidades comuns de medida. Por fim, na fase de interpretação, o objetivo é identificar os aspectos mais significativos do estudo, verificar a integridade, a sensibilidade e a consistência dos resultados e apresentar as conclusões, restrições e orientações que surgem a partir da análise do estudo (ISO 14040:2001).

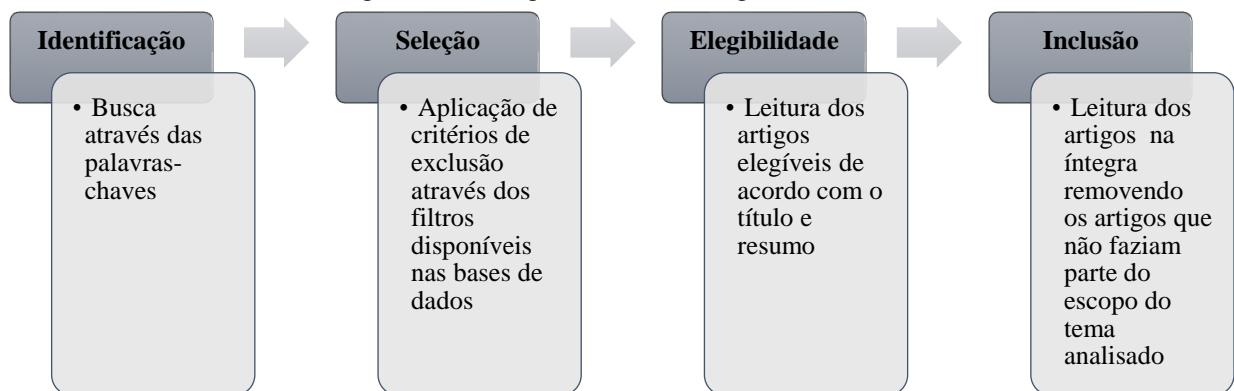
3.8 ESTADO DA ARTE – REVISÃO SISTEMÁTICA E BIBLIOMÉTRICA

Para compreender o estado da arte sobre a aplicação da ACV em tratamentos de efluentes têxteis por processos oxidativos avançados, é fundamental realizar buscas sistemáticas em bases de dados científicas consolidadas, como *Scopus* e *Web of Science*, reconhecidas pela sua ampla cobertura acadêmica. A revisão sistemática permite identificar, selecionar e analisar criticamente os estudos relevantes dentro do tema, garantindo uma visão abrangente e atualizada da literatura.

Um método amplamente utilizado para conduzir revisões sistemáticas é o PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), que organiza o processo em quatro etapas principais: identificação, seleção, elegibilidade e inclusão. Essas etapas asseguram rigor e transparência na escolha dos artigos, por meio da aplicação criteriosa de estratégias de busca e filtros, além da avaliação detalhada do conteúdo dos trabalhos encontrados (Souza, 2023).

De acordo com o método de pesquisa proposto, metodologia PRISMA, na etapa de identificação foram realizadas buscas de trabalhos através das palavras-chaves “*advanced oxidative process*” e “*textile effluents*” associadas entre si pelo operador Booleano “*and*”. Essa string de busca foi associada com o operador Booleano “*or*” às palavra-chaves “*OAP*”, “*life cycle assessment*” e “*LCA*”. Na seleção, foram aplicados critérios de exclusão através dos filtros disponíveis na base de dados, sendo removidos os artigos de revisão, papeis de conferência e livros, artigos que não estivessem nos idiomas inglês e português e por fim aqueles que não estavam dentro do período de 2015 a 2025. Na terceira etapa, foi realizada a leitura dos artigos elegíveis. Na última etapa, inclusão, os artigos restantes foram lidos na íntegra, removendo os artigos que não faziam parte do escopo do tema analisado.

Figura 10 - Fluxograma da Metodologia PRISMA

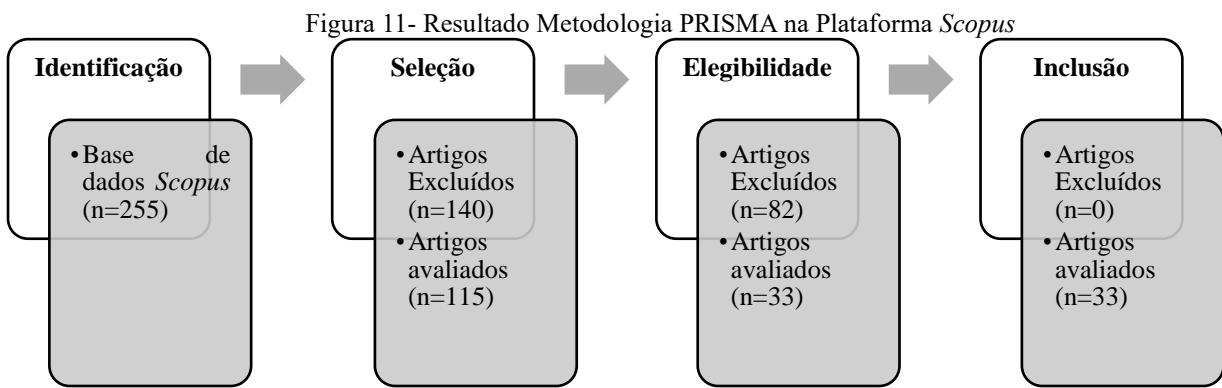


Fonte Autora, 2025.

Os estudos biométricos utilizam dados quantitativos e métodos estatísticos para analisar a produção científica em uma área específica, mapeando a produtividade de periódicos, autores e a representação da informação (Vieira e Silva, 2023). Para isso, foi utilizado o *software VOSviewer*, que gera redes biométricas visualizadas por círculos e arcos, indicando a relevância e a intensidade das conexões entre elementos como coautoria, citação e coocorrência.

3.8.1 Scopus

De acordo com o método de pesquisa proposto, metodologia PRISMA, na etapa de identificação foram identificados um total de 255 publicações na *Scopus*. Na seleção, após serem aplicados os critérios de exclusão a amostra foi reduzida para 115 artigos. Na terceira etapa, foi realizada a leitura dos artigos elegíveis. Destes 82 foram descartados, resultando em 33 artigos. Na última etapa, inclusão, os artigos restantes foram lidos na íntegra, removendo os artigos que não faziam parte do escopo do tema analisado. Entretanto, os 33 artigos da etapa anterior permaneceram, conforme Figura 11.



Fonte: Autora, 2025.

Com base na análise dos artigos, foi possível resumir as atividades realizadas pelos autores e destacar suas principais conclusões, conforme apresentado no Apêndice A.

A fim de proporcionar uma visualização mais clara dos resultados obtidos, foi elaborado o Quadro 7, que enumera os tópicos abordados nos estudos e indica a quantidade de artigos que tratam de cada. Os trabalhos foram divididos em: POA homogêneo onde o catalisador se encontra dissolvido no meio, POA heterogêneo onde o catalisador se encontra em fase sólida na mistura e ACV utilizada para avaliar o uso de POA em efluentes têxteis.

Quadro 7 - Trabalhos Encontrados na Plataforma *Scopus*

| Tema | Nº de artigos | Autores |
|---------------|---------------|---|
| POA homogêneo | 22 | TAVARES <i>et al.</i> (2016); THASILU e KARTHIKEYAN (2016); POURGHOLI <i>et al.</i> (2018); COSTA e AGUIAR (2019); BUTHIYAPPAN <i>et al.</i> (2019); SANTANA <i>et al.</i> (2019); FAVERO <i>et al.</i> (2020); GARCIA; ROSA; BORRELY (2020); KLANOVICZ <i>et al.</i> (2020); ROSA <i>et al.</i> (2020); MIRZA <i>et al.</i> (2020); RAMOS <i>et al.</i> (2020); SANTANA; NAPOLEÃO; DUARTE (2021); LEBRON <i>et al.</i> (2021); |

| | | |
|-----------------|----|--|
| | | DE SOUZA <i>et al.</i> (2021); ZAHARIA <i>et al.</i> (2021); JADHAV <i>et al.</i> , (2022); FEUZER-MATOS <i>et al.</i> (2022); CHRISTIAN <i>et al.</i> (2023); HUTAGALUNG <i>et al.</i> (2023); KANJAL <i>et al.</i> (2023); DO CARMO DIAS <i>et al.</i> (2024). |
| POA heterogêneo | 12 | DOMINGUES <i>et al.</i> (2019); MIRZA <i>et al.</i> (2020); LIMA SANTOS KLIENCHEN DALARI <i>et al.</i> (2020); RAMOS <i>et al.</i> (2020); ZAHARIA <i>et al.</i> (2021); DA ROCHA SANTANA <i>et al.</i> (2022); FEUZER-MATOS <i>et al.</i> (2022); SANTANA <i>et al.</i> (2023); URBINA-SUAREZ <i>et al.</i> (2023); SHAJEEELAMMAL <i>et al.</i> (2023); BAGHERI <i>et al.</i> (2023); DE OLIVEIRA <i>et al.</i> (2023); |
| ACV | 3 | SILVA <i>et al.</i> (2021); TEIXEIRA <i>et al.</i> (2024); DEOGAONKAR-BARIDE <i>et al.</i> (2025) |

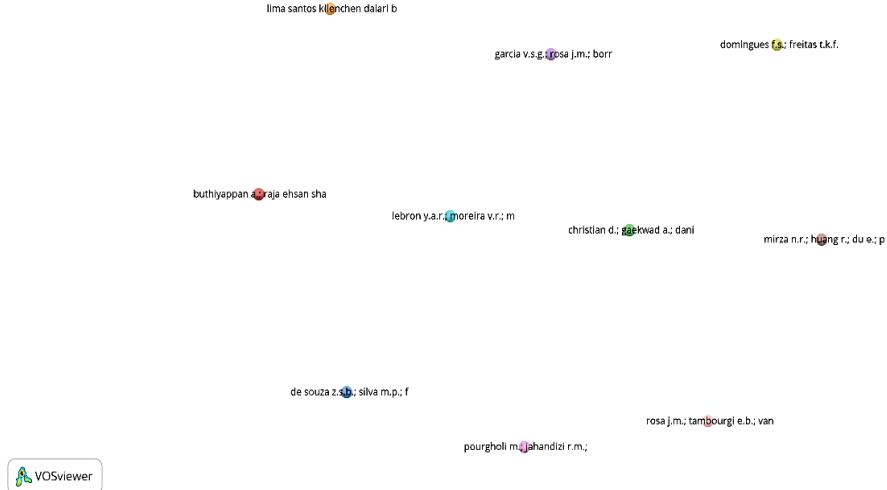
Fonte: Autora, 2025.

A partir do Quadro 7 observa-se que o tema de POA homogêneo foi abordado em um total de 22 artigos, onde essa lista de estudos e autores sugere um amplo interesse e pesquisa em POA homogêneo, indicando um campo de estudo ativo e significativo nessa área. O tema de POA heterogêneo foi explorado em um total de 12 artigos, onde essa lista de estudos e autores sugere que, embora haja menos estudos em comparação com POA homogêneo, ainda existe um interesse significativo na aplicação de POA heterogêneo em várias aplicações. AACV foi abordada em três artigos, indicando um foco menor nesse tema em comparação aos POA, mas ainda assim uma área relevante para investigação. Esses resultados reforçam que os POA, tanto homogêneos quanto heterogêneos, são tópicos amplamente estudados, enquanto a ACV recebe menos atenção na literatura.

Para a revisão bibliométrica foram realizadas 3 análises: de coautoria, de citação, e de cocorrência de acordo com os trabalhos incluídos na revisão sistemática.

A análise de coautoria, ilustrada na Figura 12, revela que a rede bibliométrica gerada é composta por 12 autores principais, os quais, com base no tamanho dos círculos, apresentaram um impacto equivalente nessa área de pesquisa. Observa-se também a ausência de linhas interligando os artigos, indicando que não houve coautoria entre eles, podendo ser explicada por diversos fatores, como a falta de colaboração entre grupos de pesquisa, a existência de barreiras geográficas além do fato de cada grupo poder estar investigando o tema sob perspectivas diferentes, sem necessidade de cooperação direta. Além disso, a independência na publicação de estudos, bem como fatores linguísticos e culturais, pode influenciar a comunicação e a interação entre pesquisadores de diferentes regiões.

Figura 12 - Rede Bibliométrica de Coautoria entre os Autores na Plataforma *Scopus*



Fonte: Autora, 2025.

Também se verificou que 66,67% dos trabalhos foram produzidos por autores do Brasil, enquanto 33,33% foram desenvolvidos por pesquisadores de países asiáticos, como China, Índia, Irã e Paquistão. Como o Brasil é a quinta maior potência na indústria têxtil global, o mesmo está investindo nesse âmbito de pesquisa por várias razões estratégicas e ambientais como sustentabilidade ambiental, atendimento a normas ambientais, competitividade no mercado global, reuso da água, conscientização ambiental e colaboração ambiental, visto que o uso de POA pode ser uma abordagem avançada e sustentável para tratar esses efluentes minimizando o impacto ambiental e investir nisso é uma maneira de desenvolver tecnologias inovadoras que ajudam as indústrias têxteis, além de trazer a possibilidade de reuso de água tratada.

A rede de citação, ilustrada na Figura 13, foi construída com o objetivo de analisar as relações entre os 33 artigos identificados na literatura. O tamanho dos círculos reflete a frequência com que cada artigo foi citado, sendo que a ausência de linhas conectando os artigos indica a falta de citação mútua entre eles. Isso pode ocorrer por vários motivos, como a utilização de abordagens teóricas ou metodológicas distintas que não se alinham diretamente, o foco de cada estudo em áreas de pesquisa específicas sem recorrer a trabalhos anteriores ou ainda a falta de uma rede colaborativa entre os autores.

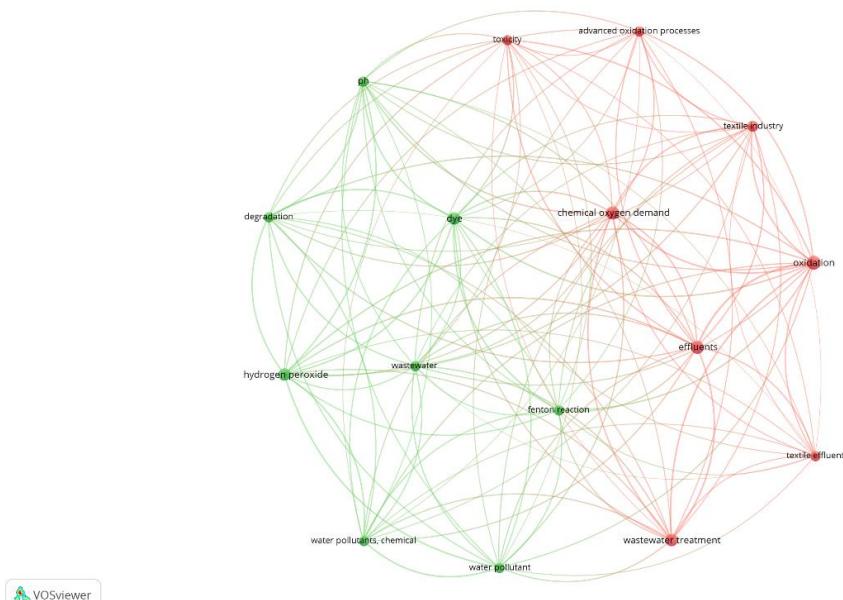
Figura 13 - Rede Bibliométrica de Citação dos Artigos na Plataforma *Scopus*



Fonte: Autora, 2025.

Foi criada uma rede de coocorrência, ilustrada na Figura 14, com o objetivo de analisar a relação entre os 33 artigos encontrados na literatura. O tamanho dos círculos reflete a quantidade de vezes que cada artigo foi citado, enquanto as linhas que conectam os artigos indicam a presença de citações entre eles. Na análise, foram identificados dois clusters, onde ocorreram coocorrências de palavras-chave. O cluster verde reúne palavras-chave relacionadas a mecanismos de degradação química e reações avançadas para remoção de poluentes aquáticos. Já o cluster vermelho agrupa palavras-chave associadas ao tratamento de efluentes têxteis por POA e avaliação de toxicidade.

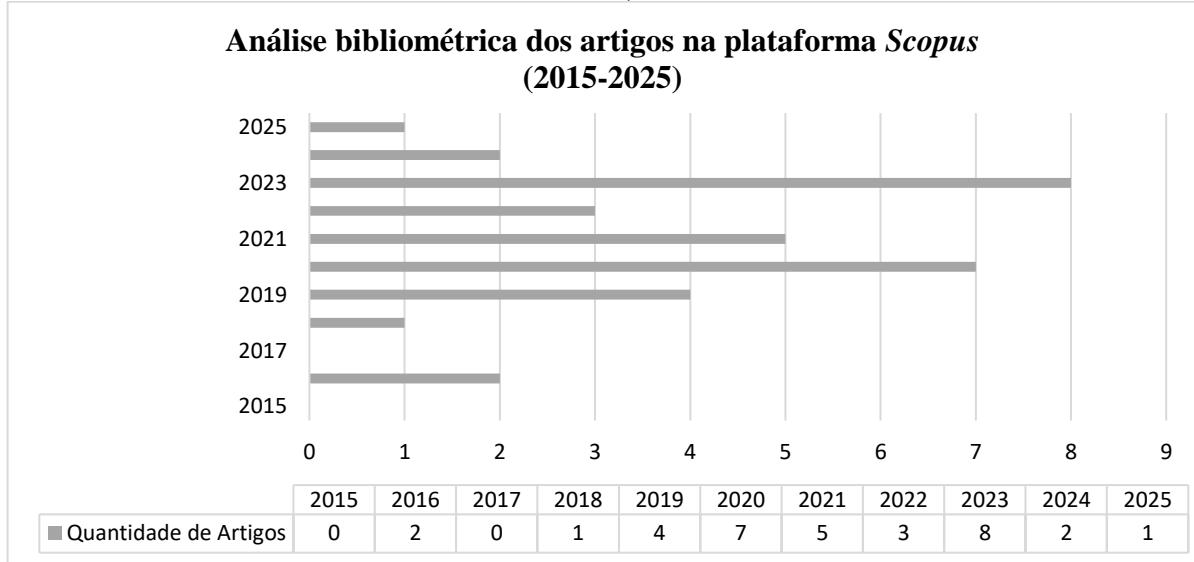
Figura 14 - Rede Bibliométrica da Coocorrência dos Artigos na Plataforma *Scopus*



Fonte: Autora, 2025.

A quantidade de artigos e os respectivos anos da publicação selecionados na *Scopus* está apresentada na Figura 15.

Figura 15 - Evolução Cronológica da Análise Bibliométrica dos Artigos na Plataforma *Scopus* (2015-2025)



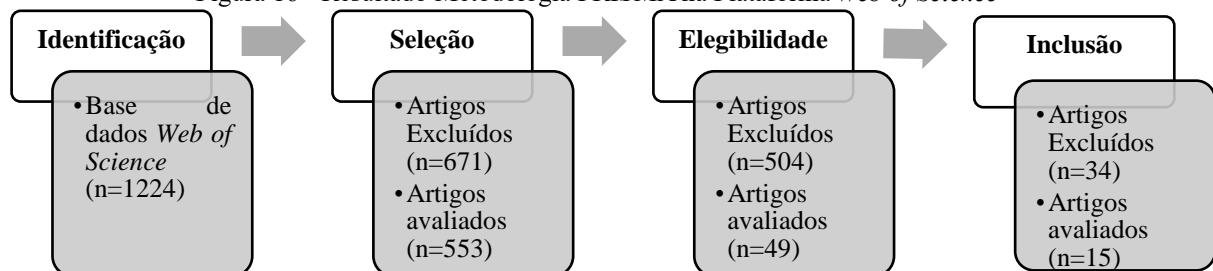
Fonte: Autora, 2025.

Houve uma ascensão de estudos sobre utilização de POA para tratamento de efluentes têxteis entre os anos de 2015 a 2025, conforme Figura 15. Os dados mostram a publicação de 33 artigos na *Scopus*, tendo uma média de publicação de 3,3 artigos por ano.

3.8.2 Web of Science

De acordo com o método de pesquisa proposto, metodologia PRISMA, na etapa de identificação foram identificados um total 1224 publicações na *Web of Science*. Na seleção, após serem aplicados os critérios de exclusão a amostra foi reduzida para 553 artigos. Na terceira etapa, foi realizada a leitura dos artigos elegíveis. Destes 504 foram descartados, resultando em 49 artigos os quais foram lidos na íntegra. Na última etapa, inclusão, os artigos restantes foram lidos na íntegra, removendo 10 artigos que não faziam parte do escopo do tema analisado e que 24 artigos já haviam sido analisados pela *Scopus*, restando assim 15 artigos, conforme Figura 16.

Figura 16 - Resultado Metodologia PRISMA na Plataforma *Web of Science*



Fonte: Autora, 2025.

Com base na análise dos artigos, foi possível resumir as atividades realizadas pelos autores e destacar suas principais conclusões, conforme apresentado no Apêndice A.

A fim de proporcionar uma visualização mais clara dos resultados obtidos, foi elaborado o Quadro 8, que enumera os tópicos abordados nos estudos e indica a quantidade de artigos que tratam de cada. Os trabalhos foram divididos em: POA homogêneo onde o catalisador se encontra dissolvido no meio, POA heterogêneo onde o catalisador se encontra em fase sólida na mistura e ACV utilizada para avaliar o uso de POA em efluentes têxteis.

Quadro 8 - Trabalhos Encontrados na Plataforma *Web of Science*

| Tema | Nº de artigos | Autores |
|-----------------|---------------|---|
| POA homogêneo | 4 | TORRES, <i>et al.</i> (2019); TASNEEM, <i>et al.</i> (2021); PIPIL, <i>et al.</i> (2022); HOSSAIN, <i>et al.</i> (2022). |
| POA heterogêneo | 15 | KIRAN <i>et al.</i> (2018); JUSTINO, <i>et al.</i> (2019); HU, SHANG, CHIU (2019); TORRES, <i>et al.</i> (2019); BOUGDOUR, <i>et al.</i> (2020); TAVARES, <i>et al.</i> (2020); FONTANA, <i>et al.</i> (2020); HANELA, <i>et al.</i> (2020); TASNEEM, <i>et al.</i> (2021); ZAFAR, FATIMA, KIM (2021); MOHAMMADHOSSEINI, <i>et al.</i> (2022); PIPIL, <i>et al.</i> (2022); HOSSAIN, <i>et al.</i> (2022); SEMALTI, <i>et al.</i> (2023); GUIDOLIN, <i>et al.</i> (2023). |
| ACV | - | - |

Fonte: Autora, 2025.

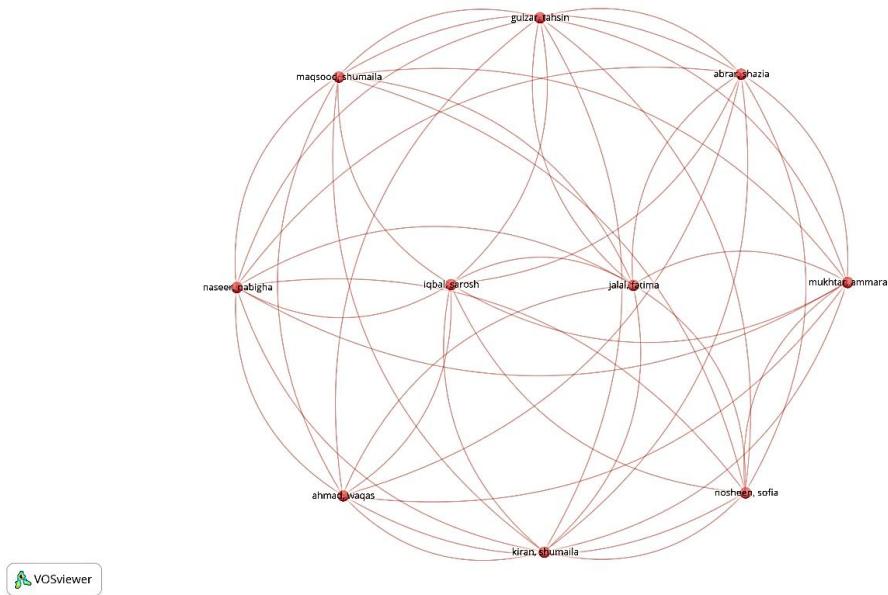
A partir da análise do Quadro 8, é evidente que o tema de POA heterogêneo foi explorado em 15 artigos, refletindo um notável interesse e atividade de pesquisa nessa área. Essa extensa lista de estudos e autores aponta para um campo de estudo dinâmico e significativo relacionado aos POA heterogêneos. Em contraste, o tema de POA homogêneo foi abordado em apenas 4 artigos. Embora o número de estudos seja menor em comparação com os POA heterogêneos, os resultados sugerem um interesse substancial na aplicação de POA homogêneo em diversas áreas. É interessante observar que a ACV não foi tratada em nenhum dos artigos analisados, indicando que, em comparação com os POA, há um foco relativamente menor na ACV. No entanto, isso não diminui a relevância da ACV como um tópico de pesquisa. Esses achados destacam que os POA, tanto heterogêneos quanto homogêneos, são áreas de pesquisa proeminentes, com um considerável número de estudos e pesquisadores envolvidos. Por outro lado, a ACV é menos explorada, sugerindo uma necessidade de maior atenção nesse campo.

Para a revisão bibliométrica foram realizadas 3 análises: de coautoria, de citação e de cocorrência de acordo com os trabalhos incluídos na revisão sistemática e bibliométrica.

A partir da análise de coautoria, representada na Figura 17, é possível observar uma rede bibliométrica composta por um único *cluster* que conecta os 10 principais autores. O tamanho dos círculos indica que Maqsood, Naseer, Iqbal, Ahmad, Kiran, Nosheen, Jalal, Mukhtar, Abrar

e Gulzar (2019) foram os autores que exerceram maior impacto nesse domínio de pesquisa. As linhas que interligam os artigos na rede representam a presença de coautoria entre eles.

Figura 17 - Rede Bibliométrica de Coautoria entre os Autores da *Web of Science*

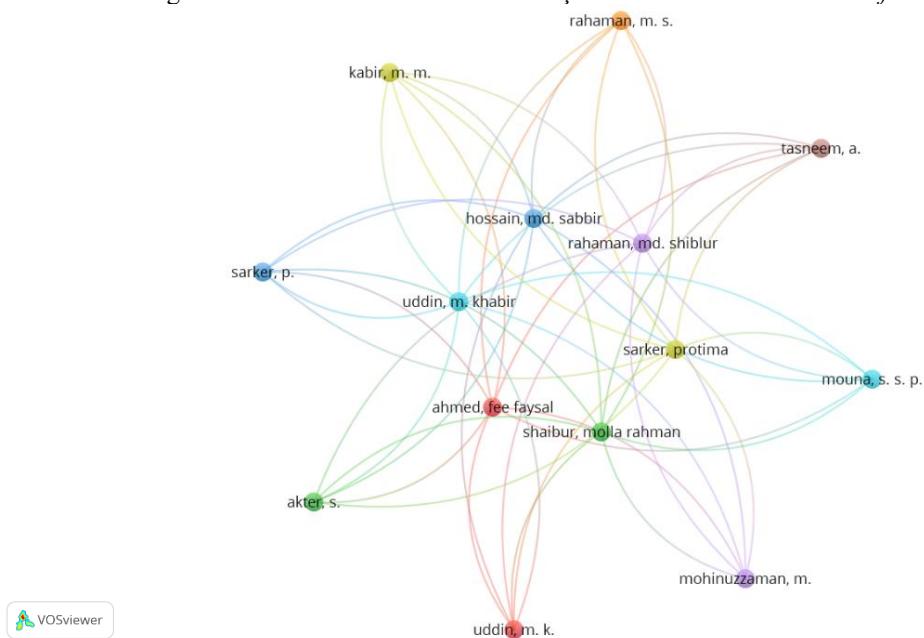


Fonte: Autora, 2025.

Além disso, constatou-se que 43,75% dos trabalhos foram conduzidos por países da América do Sul como Brasil, Peru e Argentina (onde 37,5% foram do Brasil), 25% envolveram autores de países asiáticos como Bangladesh, Japão, Paquistão e Índia, 18,75% tiveram a contribuição de autores de países do oriente médio como Irã , Iraque e Jordânia e 6,5% envolveram autores de países do continente europeu como Alemanha. O expressivo número de estudos no Brasil sobre esse tema decorre de o país ser uma potência significativa na indústria têxtil global.

A rede de citação, representada na Figura 18, foi elaborada com o intuito de entender a relação entre os 15 artigos encontrados na literatura. O tamanho do círculo representa a quantidade de vezes que o artigo foi citado, e a linha que interliga os artigos na rede representa a presença de citação, no qual foi possível identificar 7 *clusters* principais em que ocorreram a presença de citação. No *cluster* amarelo os autores mais citados foram Kabir (2021) e Sarker (2022) com 37 citações, estando interligado no *cluster* azul escuro através de Sarker e Hossain (2022) com 41 citações. No *cluster* azul claro os autores mais citados foram Mouna (2021) e Uddin (2021) citados 24 vezes e se interligando com o *cluster* rosa através de Uddin e Ahmed (2018) com 17 citações. No *cluster* verde os autores mais citados foram Akter (2021) e Shaibur (2022) com 17 citações. No *cluster* lilás os autores mais citados foram Mohinuzzaman (2021) e Tasneem (2021) com 28 citações e por fim, no *cluster* laranja o autor mais citado foi Rahaman (2021) com 37 citações e está interligado com todas as outras *clusters*.

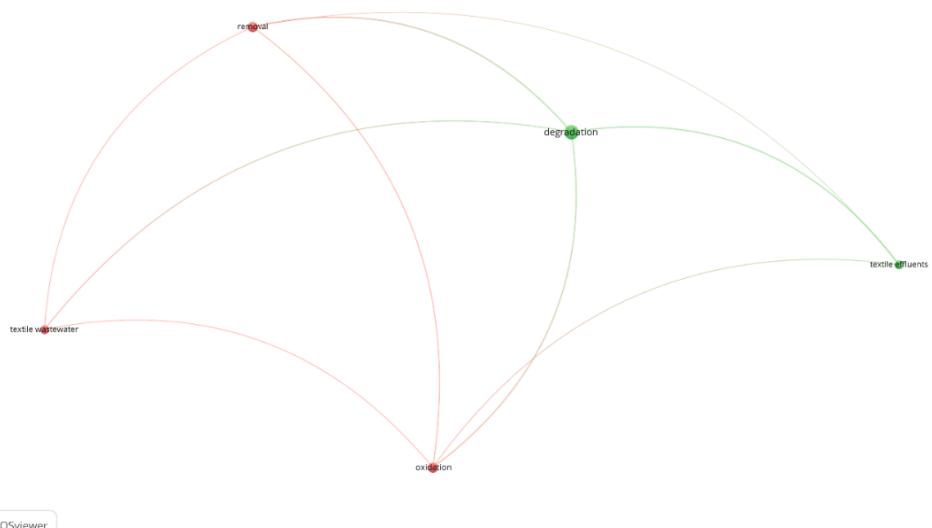
Figura 18 - Rede Bibliométrica de Citação entre os Autores da *Web of Science*



Fonte: Autora, 2025.

Foi construída uma rede de coocorrência, representada na Figura 19, com o objetivo de analisar a relação entre os 15 artigos identificados na literatura. O tamanho dos círculos reflete a frequência com que cada artigo foi citado, enquanto as linhas que conectam os artigos na rede indicam a presença de citações. Observa-se a formação de duas *clusters*, nos quais ocorreu coocorrência. O *cluster* verde sugere a presença de palavras-chave relacionadas processos de remoção e degradação de poluentes em águas residuais têxteis. O *cluster* vermelho destaca palavras-chave associadas a aplicação de processos de oxidação para descoloração de efluentes têxteis.

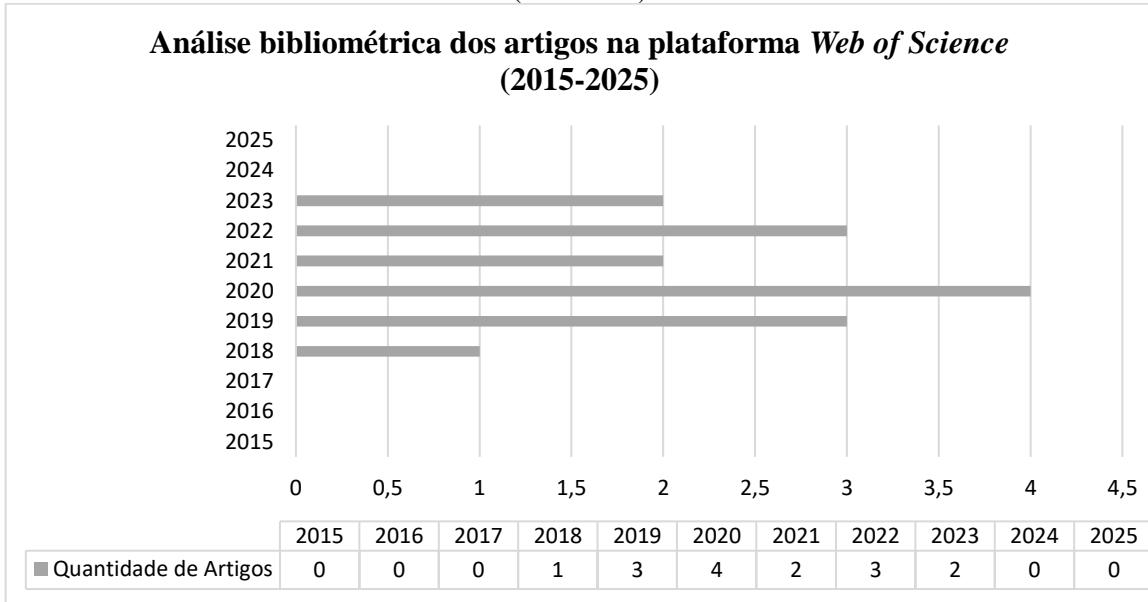
Figura 19 - Rede Bibliométrica de Coocorrência de Citação da *Web of Science*



Fonte: Autora, 2025.

A Figura 20 mostra o gráfico da quantidade de artigos e os respectivos anos da publicação selecionados na *Web of Science*.

Figura 20 - Evolução Cronológica da Análise Bibliométrica dos Artigos na Plataforma *Web of Science* (2015-2025)



Fonte: Autora, 2025.

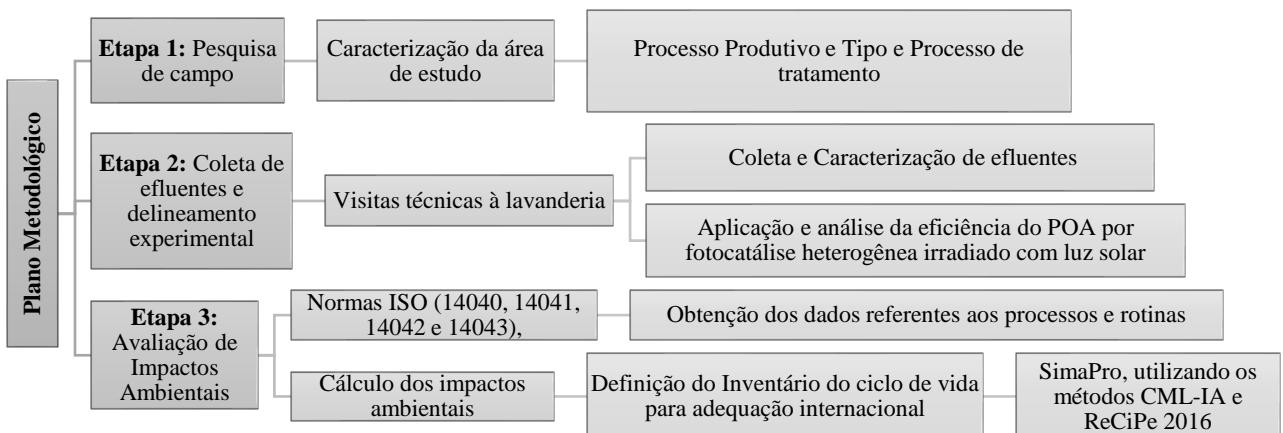
Houve uma ascensão de estudos sobre utilização de POA para tratamento de efluentes têxteis entre os anos de 2015 a 2025, conforme Figura 20. Os dados mostram a publicação de 15 artigos na *Web of Science*, tendo uma média de publicação de 1,5 artigos por ano.

A revisão sistemática realizada revelou um panorama abrangente e atual sobre os POA aplicados ao tratamento de efluentes têxteis. Os dados demonstram uma predominância de estudos voltados aos POA homogêneos, mas também indicam um crescimento significativo na pesquisa sobre POA heterogêneos, campo ao qual se insere diretamente a presente pesquisa. Apesar do número reduzido de publicações abordando a ACV nessa temática, a revisão destacou a importância e o potencial dessa abordagem para qualificar e quantificar os impactos ambientais dos tratamentos de efluentes. Além disso, as análises de coautoria, citação e coocorrência permitiram identificar lacunas e oportunidades na literatura científica, reforçando a necessidade de integração entre estudos de tratamento de efluentes e ferramentas de sustentabilidade ambiental como a ACV. Portanto, a revisão sistemática não apenas sustentou conceitualmente o desenvolvimento da pesquisa, como também validou sua pertinência científica, ao evidenciar que a aplicação da ACV ao contexto da fotocatálise heterogênea representa uma contribuição inovadora e necessária para o campo ambiental e industrial.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente estudo foi dividido, conforme a Figura 2, em três etapas: pesquisa de campo, coleta de efluentes e delineamento experimental e avaliação dos impactos ambientais.

Figura 21- Fluxograma Metodológico



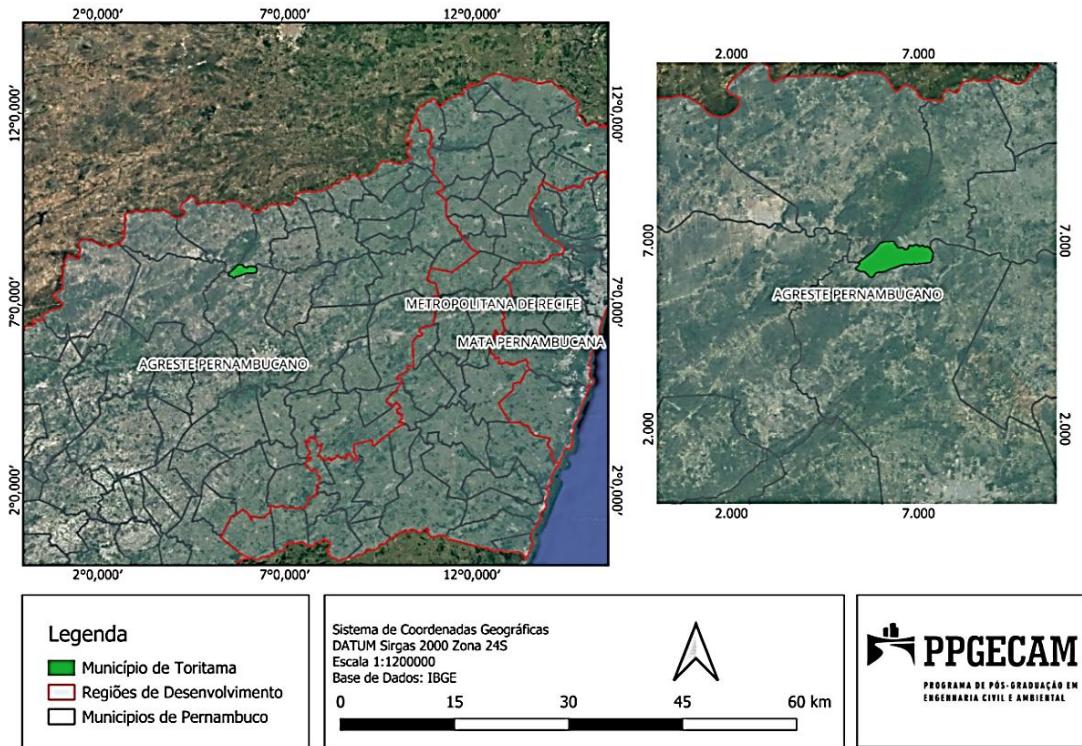
Fonte: Autora, 2025.

A seguir são apresentadas as etapas do plano metodológico de forma detalhada para melhor entendimento de cada uma.

4.1 ETAPA 1 – CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A lavanderia, objeto deste estudo, está localizada no município de Toritama - Pernambuco pertence à Mesorregião do Agreste Pernambucano especificamente a Microrregião do Alto do Capibaribe, conforme Figura 22, fazendo parte do APLCAPE que concentra uma das principais atividades econômicas do Agreste pernambucano: produção têxtil e de confeccionados. A mesma é uma lavanderia de beneficiamento têxtil de natureza industrial que desempenha um papel fundamental na preparação e tratamento de tecidos e peças de vestuário para atender à demanda da região, com foco particular na cidade de Toritama, Pernambuco. Essa lavanderia está devidamente equipada com máquinas industriais especializadas para diversas etapas do processamento têxtil, abrangendo atividades como lavagem, secagem, acabamento, tingimento, estampagem e outras, conforme as necessidades específicas da clientela. Em virtude da presença de maquinário industrial robusto e do manuseio de produtos químicos, a lavanderia de beneficiamento adota procedimentos rigorosos em conformidade com normas de segurança estritas, visando garantir a proteção e bem-estar de seus colaboradores.

Figura 22 - Mapa de Localização Geográfica do Município De Toritama - PE



Fonte: Autora, 2025.

De acordo com o Diagnóstico Ambiental das Lavanderias de Toritama-PE, elaborado pela CPRH (2005), a lavanderia em questão possui alvará de funcionamento, porém não possui licença de operação emitida pela CPRH. A lavanderia processa mensalmente 25.000 peças de jeans e possui um volume de abastecimento de água de 600 m³/mês proveniente de poço e um volume adicional de m³/mês proveniente de caminhão-pipa. A geração diária de efluentes industriais é de 80 m³, o que equivale a 29200 m³ por ano. Além disso, a lavanderia em estudo possui uma ETE própria, que realiza o tratamento de efluentes por meio de processos físico-químicos (conforme Figura 23), operando 14 horas por dia, com uma capacidade de tratamento médio de 500 litros por hora. Nesse regime de funcionamento, a ETE possui uma capacidade de tratamento diário de aproximadamente 7000 litros.

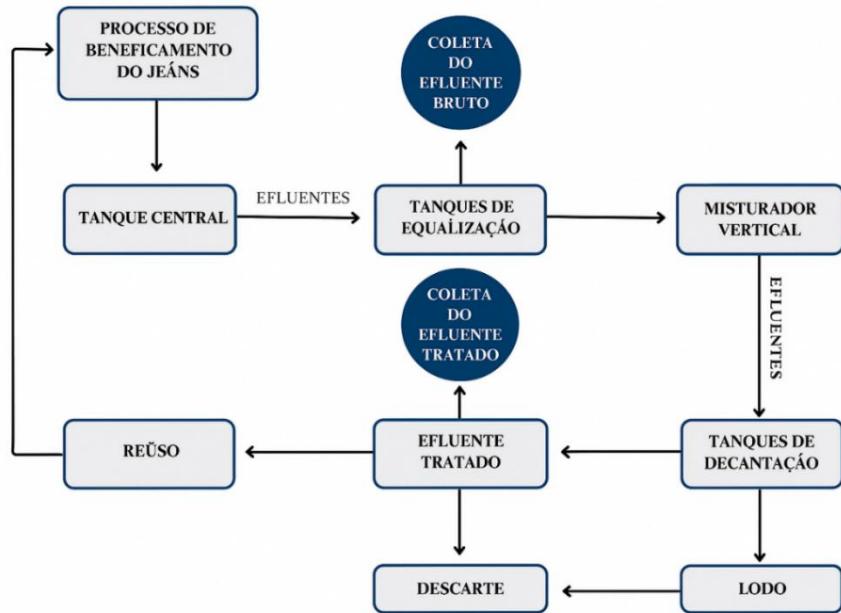
Figura 23 - Descrição do Sistema de Tratamento dos Efluentes Industriais da Lavanderia em Estudo



Fonte: Autora, 2025.

Para melhor entendimento do processo do sistema de tratamento de efluentes da lavanderia em estudo criou-se um fluxograma, presente na Figura 24.

Figura 24 - Fluxograma da ETE da Lavanderia em Estudo



Fonte: Autora, 2025.

Após o beneficiamento do jeans nas máquinas de lavagem, o efluente gerado é direcionado ao tanque central, onde inicia o processo de tratamento. Neste tanque, o efluente passa por um sistema de gradeamento que remove partículas grandes, como pedaços de linha, para evitar obstruções e problemas nas etapas seguintes. O efluente é então bombeado para tanques de detenção hidráulica ou equalização, onde pode permanecer por até mais de 24 horas, dependendo da cor e da quantidade do efluente, conforme avaliação do operador da ETE. Esse tempo de retenção permite a equalização da carga do efluente, estabilizando suas características antes do tratamento químico.

Após o período de detenção, são adicionados coagulantes e floculantes ao efluente por meio de uma bomba dosadora. Esses produtos químicos promovem a coagulação e flocação das partículas suspensas, facilitando sua remoção. A mistura do efluente com os produtos químicos é realizada por um misturador vertical de fluxo ascendente, que processa mais de 10 mil litros de efluente por hora, garantindo uma distribuição uniforme dos químicos e otimizando o processo de coagulação e flocação.

Em seguida, o efluente tratado é direcionado para tanques cônicos, onde ocorre a decantação das partículas mais pesadas. A lavanderia possui três desses tanques, cada um com capacidade de aproximadamente 25 mil litros. Neste estágio, as partículas pesadas se depositam no fundo dos tanques, separando-se do efluente tratado, que permanece na parte superior. O

efluente tratado é então recolhido, sendo destinado à reutilização nos processos internos ou ao descarte seguro.

As partículas decantadas formam um lodo químico, que é enviado para um leito de secagem. Após a secagem, o lodo é disposto de forma final em um aterro sanitário. Este processo é essencial para reduzir o volume e a umidade do lodo, facilitando seu manuseio e descarte ambientalmente seguro. Cada etapa é projetada para garantir a eficiência do tratamento do efluente, minimizando os impactos ambientais e possibilitando a reutilização da água no processo produtivo.

4.2 ETAPA 2 - COLETA DE EFLUENTES E DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

4.2.1 Coleta, Transporte e Armazenamento

A coleta foi realizada com um volume de 5L de efluente bruto diretamente na saída da máquina de lavagem e com um volume de 5L de efluente tratado após o processo de tratamento realizado pela lavanderia em estudo, conforme as diretrizes estabelecidas pela ABNT NBR 9898:1997 – Preservação e amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores, ambos foram acondicionados separadamente em recipientes plásticos novos brancos de polietileno de alta densidade, sem nenhuma utilização anterior. As coletas ocorreram no dia 25 de abril de 2025. Como não há uma norma específica para o transporte de efluentes têxteis, os mesmos foram acondicionados em bolsas térmicas mantendo a temperatura ambiente e transportados imediatamente após a coleta, do município de Toritama até Caruaru, para a realização das análises de qualidade da água (pH, cor, turbidez e DQO), ainda no mesmo dia.

O efluente bruto foi acondicionado sob refrigeração na geladeira do Laboratório de Química (LQ) da UFPE-CAA à temperatura controlada de 4 ± 2 °C, conforme as diretrizes do Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras (ANA/CETESB, 2011), a fim de preservar suas características físico-químicas até o momento da análise. O armazenamento ocorreu no período de 25 a 26 de abril de 2025, antecedendo a realização do processo de fotocatálise heterogênea irradiada por luz solar. Da mesma forma, o efluente previamente tratado foi mantido sob as mesmas condições até o dia 29 de abril de 2025 para realização do processo de fotocatálise heterogênea irradiada por luz solar, seguindo o mesmo protocolo metodológico.

4.2.2 Delineamento Experimental

A metodologia escolhida, para a aplicação do POA, teve como maior objetivo, a possibilidade de replicação do tratamento em escala industrial, buscando simular o uso dos equipamentos que são utilizados hoje na ETE da lavanderia, e adequar-se sem que seja

necessário o acréscimo de nenhuma etapa ao processo, ou a aquisição de novos equipamentos por parte da lavanderia.

Para a aplicação do POA nos efluentes reais bruto e tratado, foi empregado um delineamento experimental de planejamento fatorial 2^{2+1} , visando a variação da concentração do catalisador (TiO_2) com teor de pureza acima de 98% da marca Neon, quantidade de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) a 35% puro para análise da marca Neon e tempo de exposição à luz, conforme descrito na Tabela 1. A escolha desse delineamento foi embasada na revisão da literatura, na qual se constatou que Garcia (2006) e Silva (2011) obtiveram os melhores resultados para o tratamento de efluentes reais utilizando a fotocatálise com dióxido de titânio, além do ajuste do pH antes da realização do experimento.

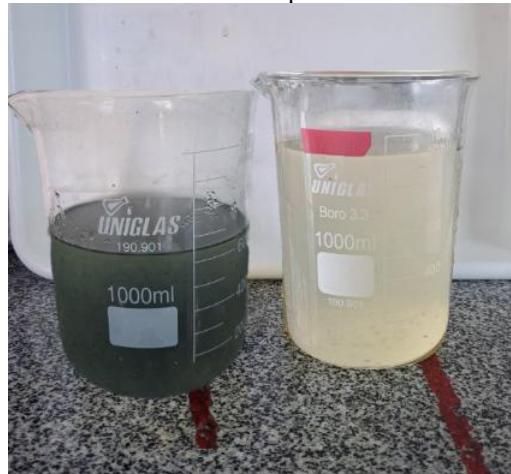
Tabela 1 - Planejamento Fatorial 2^{2+1} para a Aplicação do POA

| Tratamento | TiO_2 (g.L ⁻¹) | H_2O_2 (ml.L ⁻¹) | Tempo (h) |
|------------|-------------------------------------|--|-----------|
| T1 | 0,3 | 1 | 2 |
| T2 | 0,3 | 2 | 2 |
| T3 | 0,5 | 1 | 2 |
| T4 | 0,5 | 2 | 2 |
| T5 | 0,3 | 1 | 4 |
| T6 | 0,3 | 2 | 4 |
| T7 | 0,5 | 1 | 4 |
| T8 | 0,5 | 2 | 4 |

Fonte: Autora, 2025.

O pH ideal para a fotocatálise heterogênea utilizando TiO_2 varia entre 4 e 6,5, uma vez que o photocatalisador apresenta maior eficiência em condições ligeiramente ácidas, além de promover uma degradação mais eficaz dos contaminantes (Dantas, 2022). Em função disso, as amostras coletadas passaram por um ajuste de pH, sendo alteradas para um valor de $6,5 \pm 0,3$. O ajuste foi realizado utilizando ácido sulfúrico como reagente, sendo que a adição de poucas gotas desse ácido permitiu que o efluente atingisse rapidamente o valor desejado. A Figura 25 mostra os efluentes logo após sair do armazenamento com o pH já ajustado.

Figura 25 - Efluentes Bruto e Tratado após armazenamento e ajuste de pH



Fonte: Autora, 2025.

Após o ajuste de pH, as amostras com 50 mL de efluente foram transferidas para bêqueres, nos quais foram incorporados o catalisador TiO₂ e o H₂O₂ conforme as concentrações especificadas na Tabela 1. Durante o processo de agitação contínua, as amostras foram fechadas com papel filme e foram submetidas à exposição à luz solar, conforme ilustrado na Figura 26. Para monitoramento da intensidade luminosa, foi utilizado um luxímetro da marca Digital Lux Meter, dispositivo responsável pela medição da iluminância, ou seja, da intensidade da luz visível incidente sobre a superfície das amostras. As medições foram realizadas a cada 15 minutos, conforme indicado nos estudos de Garcia (2006) e Silva (2011) durante todo o experimento que correlaciona a iluminância (lx) com o tempo de exposição (horas) nos dias quando foram realizados os experimentos com o efluente bruto e tratado, respectivamente.

Figura 26 - Amostras em Agitação Contínua e Expostas à Luz Solar



Fonte: Autora, 2025.

Após a conclusão da agitação contínua, as amostras provenientes das reações são submetidas a um processo de filtração, conforme Figura 27, utilizando papel filtro quantitativo C41- faixa preta (filtração rápida) e diâmetro de 125 mm da marca Unifil ou o papel filtro quantitativo C40 - faixa branca (filtração média) e diâmetro de 125 mm da marca Unifil. Para os casos em que esses filtros não tivessem o resultado esperado realizou-se uma nova filtragem utilizando papel filtro quantitativo C42 - faixa azul (filtragem lenta) e diâmetro de 125 mm da marca FMaia.

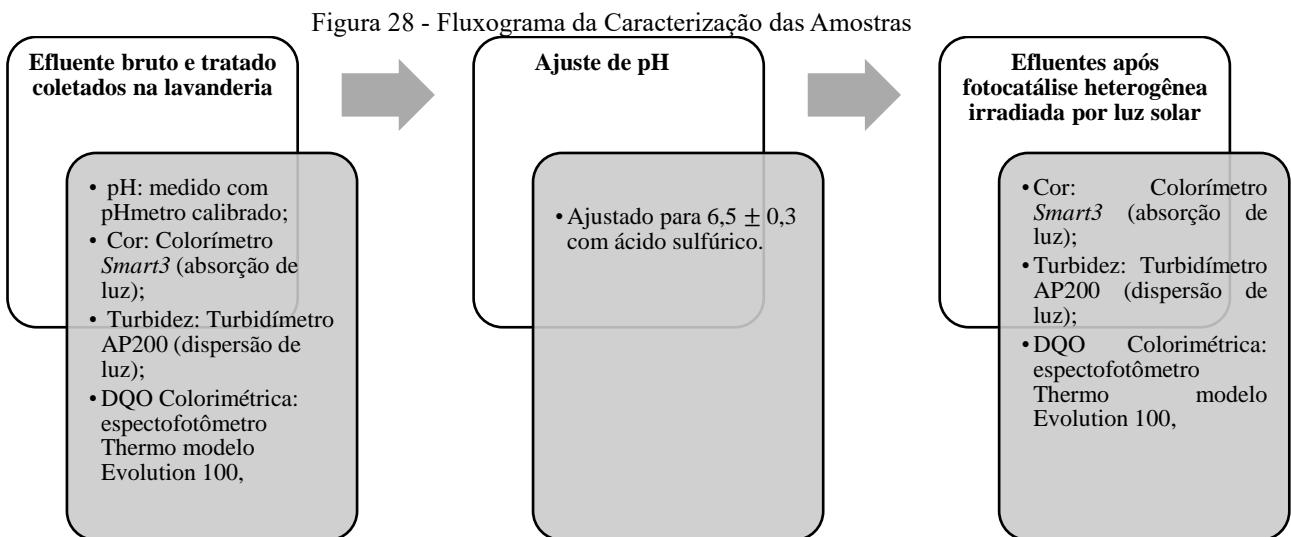
Figura 27 - Filtragem das Amostras



Fonte: Autora, 2025.

4.2.3 Caracterização das Amostras

Após a coleta dos efluentes reais na lavanderia, foram realizados testes físico-químicos de pH, cor, turbidez e DQO com o objetivo de caracterizar os efluentes. Posteriormente, após a aplicação do processo de fotocatálise heterogênea, foram realizados novamente testes de cor, turbidez e DQO, após a filtração do efluente, para avaliar a eficiência do tratamento proposto, conforme ilustrado na Figura 28.



Fonte: Autora, 2025.

A medição do pH dos efluentes bruto e tratado da lavanderia foi realizado utilizando-se um pHmetro modelo PG1400 da marca Gehaka previamente calibrado. Antes das leituras, o eletrodo do equipamento foi cuidadosamente lavado com água destilada para evitar contaminação cruzada entre as amostras. A calibração do pHmetro foi efetuada utilizando soluções tampão de valores conhecidos, geralmente pH 4 e pH 7, conforme as instruções do fabricante, garantindo a precisão das medições. Em seguida, o eletrodo foi imerso nas amostras de efluente, mantendo a ponta totalmente submersa, e os valores de pH foram registrados somente após a estabilização da leitura. Ao final das medições, o eletrodo foi novamente lavado e armazenado de acordo com as recomendações do fabricante, assegurando sua durabilidade e confiabilidade para análises futuras. O pH também foi ajustado para adequar a amostra às condições ideais de aplicação do POA (4 e 6,5).

A determinação da cor dos efluentes foi realizada por meio de um colorímetro modelo *Smart3* da marca LaMatte, que emprega a técnica fotométrica baseada na absorção de luz. Neste método, a intensidade da cor da amostra é quantificada pela medida da luz absorvida em comprimentos de onda específicos, permitindo a avaliação objetiva da coloração do efluente de acordo com padrões estabelecidos em análises físico-químicas de águas e efluentes.

A turbidez das amostras foi avaliada por meio de um turbidímetro modelo AP2000 da marca PoliControl, utilizando a técnica fotométrica de dispersão de luz. Nesse método, a turbidez é determinada pela quantidade de luz dispersa pelas partículas em suspensão presentes na amostra, permitindo uma avaliação objetiva da clareza do efluente de acordo com normas padrão de análise de águas e efluentes.

A determinação da DQO das amostras foi determinada pelo método colorimétrico descrito pela APHA (1998) que se fundamenta na oxidação química da matéria orgânica presente em meio fortemente ácido. Inicialmente, a amostra foi submetida à digestão em ácido sulfúrico na presença de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) em excesso, que atua como agente oxidante. Para aumentar a eficiência da oxidação e minimizar interferências, foram adicionados catalisadores: sulfato de prata (Ag_2SO_4), que favorece a oxidação de compostos resistentes, e sulfato de mercúrio ($HgSO_4$), que complexa íons cloreto presentes na amostra. Após a digestão, a quantidade de dicromato residual foi determinada por análise colorimétrica, utilizando espectrofotômetro, com base na intensidade da coloração do oxidante remanescente. A DQO foi então calculada a partir da diferença entre o dicromato inicialmente adicionado e o remanescente, sendo expressa em mg O₂/L. Este procedimento permite avaliar de forma confiável a carga de matéria orgânica oxidável presente nos efluentes analisados, sendo amplamente utilizado em estudos de tratamento de águas e efluentes industriais.

Para a preparação das soluções utilizadas na análise, empregaram-se biftalato de potássio ($C_8H_5KO_4$) pureza 99% da marca Synth Reagentes, dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$) pureza de 99,5% da marca Neon Reagentes, sulfato de prata (Ag_2SO_4) pureza 99,5% da marca Neon Reagentes, ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4) pureza 95% da marca Êxodo Científica, sulfato de mercúrio (Hg_2SO_4) pureza 98% da marca Êxodo Científica e água destilada. Inicialmente, elaborou-se a curva padrão de calibração utilizando soluções de biftalato de potássio em diferentes concentrações. Em seguida, prepararam-se as soluções auxiliares: a solução digestora, composta por dicromato de potássio, ácido sulfúrico e sulfato de mercúrio, e a solução catalítica, contendo ácido sulfúrico e sulfato de prata.

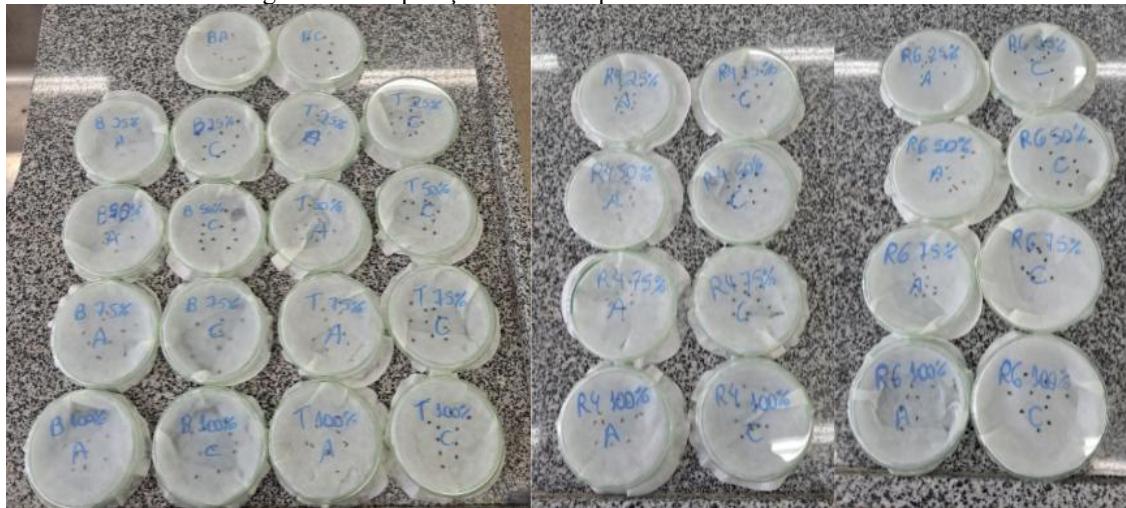
As leituras das amostras foram realizadas no espectrofotômetro da marca Thermo modelo Evolution 100, em uma faixa variando entre 300 e 800 nm na tentativa de se quantificar a absorbância do efluente, tanto das amostras dos efluentes coletados na lavanderia, como dos efluentes após a fotocatálise heterogênea irradiada por luz solar utilizando cubetas de quartzo. Tanto o efluente bruto quanto o efluente tratado pelo POA foram analisados, determinando-se o valor da DQO a partir da curva padrão previamente construída. Todas as análises foram realizadas em triplicata, garantindo a reproduzibilidade dos resultados.

4.2.4 Teste de Ecotoxicidade

A avaliação da ecotoxicidade foi conduzida nas amostras de efluente bruto e tratado provenientes da lavanderia, bem como nas amostras submetidas à fotocatálise heterogênea sob irradiação solar, tomando como base os dois tratamentos que demonstraram os melhores resultados na degradação dos compostos presentes. A escolha desses tratamentos mais eficientes baseou-se nos dados obtidos para cor, turbidez e DQO, conforme os parâmetros estabelecidos no planejamento fatorial, que considerou a variação da concentração do catalisador (TiO_2), da dosagem de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e do tempo de exposição à luz solar. A partir desses critérios, foram selecionados o tratamento com melhor desempenho para o efluente bruto e para o tratado.

A metodologia empregada na análise ecotoxicológica seguiu os procedimentos descritos por Silva (2015). Os ensaios foram realizados em placas de Petri forradas com papel filtro quantitativo C41- faixa preta (filtração rápida) e diâmetro de 125 mm da marca Unifil, onde foram distribuídas, separadamente, 10 sementes de alface (*Lactuca sativa L.*) e 10 sementes de cebola (*Allium cepa*). Essas sementes foram escolhidas devido a uma série de fatores técnicos e científicos que as tornam bioindicadores eficazes como sensibilidade a contaminantes (metais pesados, pesticidas, solventes orgânicos e efluentes industriais), por serem indicadores de efeitos genotóxicos e citotóxicos, facilidade de cultivo e baixo custo (Pereira, 2022; Mendes, 2023). Sobre cada conjunto de sementes, aplicaram-se 5 mL de solução contendo o efluente tratado, diluído em água destilada nas concentrações de 25%, 50%, 75% e 100%. Como controle negativo, utilizou-se apenas água destilada, conforme Figura 29. As placas foram mantidas em incubação por sete dias, sob temperatura controlada de $22 \pm 2^\circ\text{C}$ em estufa.

Figura 29 - Preparação Amostras para Teste de Ecotoxicidade



Fonte: Autora, 2025.

A análise dos resultados foi realizada com base na medição do comprimento médio das radículas (em mm), utilizando um paquímetro digital de 150 mm da marca Kingtools, modelo 502.150BL. Além dessa variável, foram determinados o Índice de Crescimento Relativo (ICR) e o Índice de Germinação (IG). A avaliação do grau de toxicidade das amostras fundamentou-se no IG, o qual representa a relação entre o ICR - que expressa o crescimento médio das radículas ao longo do experimento - e o número médio de sementes germinadas. Os cálculos do ICR e do IG seguiram as equações propostas por Silva (2015), conforme apresentado nas Equações 1 e 2.

$$ICR = \frac{CRA}{CRC} \quad (1)$$

$$IG = ICR * \frac{SGA}{SGC} * 100 \quad (2)$$

Onde CRA é o crescimento da radícula na amostra, e CRC é o crescimento da radícula no controle negativo. O SGA é o número de sementes que germinaram na amostra e SGC é o número de sementes que germinaram no controle.

4.3 ETAPA 3 – AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS - ACV

Para a avaliação dos impactos ambientais globais, foram considerados quatro cenários distintos de tratamento de efluente: (i) efluente real bruto da lavanderia; (ii) efluente real tratado pela ETE da lavanderia; (iii) efluente real bruto submetido ao processo de fotocatálise heterogênea sob irradiação solar; e (iv) efluente tratado complementado com fotocatálise heterogênea irradiada por luz solar, escolhidos para possibilitar uma comparação entre a condição original do efluente, o desempenho do tratamento convencional existente, a eficiência da fotocatálise heterogênea aplicada isoladamente e o ganho ambiental de sua aplicação como etapa complementar. Assim, é possível avaliar a viabilidade ambiental da fotocatálise, tanto como alternativa quanto como tecnologia de aprimoramento do sistema tradicional, identificando o cenário com menor impacto ambiental e maior potencial de melhoria na qualidade do efluente.

A construção do ICV seguiu as normas internacionais e as diretrizes metodológicas do banco de dados *Ecoinvent*, assegurando a consistência técnica e a robustez científica dos resultados obtidos. A unidade funcional adotada para todos os cenários foi de 1 m³ de efluente tratado. Os dados de entrada incluíram materiais utilizados, energia elétrica consumida e como dados de saída emissões para a água. Para o cenário correspondente à ETE da lavanderia, os dados foram obtidos a partir da operação em um dia típico, considerando uma geração diária de 80 m³ de efluente por representar a vazão média real da lavanderia estudada, garantindo que o

ICV fosse desenvolvido com base em dados reais de operação. Com base nesse volume, foi projetado um período operacional de 30 anos, adotado com base em valores de referência para a vida útil de sistemas de tratamentos de efluentes e tecnologias de apoio permitindo avaliar os impactos ambientais considerando o ciclo de vida completo da estrutura e dos equipamentos, refletindo o horizonte de uso previsto para instalações dessa natureza.

A ACV foi realizada utilizando o *software SimaPro®* 10.20.1, desenvolvido pela empresa holandesa Pré Consultant, amplamente reconhecido internacionalmente no meio científico, industrial e acadêmico. A escolha dessa ferramenta justifica-se por sua total conformidade com as normas ISO 14040, que regulamentam a condução de estudos de ACV, além de sua capacidade de integrar bases de dados abrangentes e atualizadas, como o *Ecoinvent*, assegurando consistência e qualidade aos inventários construídos. O *SimaPro* também permite a modelagem flexível de diferentes cenários e a aplicação de métodos consolidados de avaliação de impactos ambientais, como ReCiPe e CML, o que o torna particularmente adequado para estudos que demandam análises comparativas, como a avaliação dos quatro cenários de tratamento de efluentes neste trabalho.

Nesse sentido, foi empregado dois métodos diferentes: o CML-IA e o *ReCiPe* 2016, ambos com abordagem *midpoint*. Apesar de serem ambos métodos representativos, o CML-IA tem a abordagem voltada para a realidade da região europeia, enquanto que o *ReCiPe* 2016 tem uma abordagem de representatividade global, não sendo voltado para uma região específica (Silva *et al.*, 2021). Para o CML-IA, as categorias de impacto definidas para esse estudo são: aquecimento global, toxicidade humana, ecotoxicidade em água doce, ecotoxicidade terrestre, acidificação e eutrofização. Para o *ReCiPe* 2016 as categorias de impacto selecionadas para esse estudo foram: aquecimento global, toxicidade humana, ecotoxicidade terrestre, acidificação terrestre e eutrofização de água doce. As categorias de impacto selecionadas foram escolhidas por representarem os principais potenciais efeitos ambientais relacionados ao tratamento de efluentes industriais, abrangendo emissões de gases de efeito estufa, riscos à saúde humana, contaminação de ecossistemas aquáticos e terrestres, bem como a contribuição de nutrientes para processos de eutrofização. Dessa forma, garante-se uma avaliação abrangente e coerente com as características do processo estudado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS

5.1.1 Características dos Efluentes Real Bruto e Tratados da Lavanderia

Após a coleta dos efluentes, foram conduzidas análises físico-químicas das amostras, contemplando os parâmetros de pH, cor aparente, turbidez e DQO. A Tabela 2 apresenta as médias dos valores obtidos e a eficiência do tratamento aplicado pela lavanderia em estudo.

Tabela 2 - Características Físico-Químicas dos Efluentes Coletados na Lavanderia

| Parâmetro | Amostra | Efluente Bruto | Efluente Tratado |
|---|--|----------------|------------------|
| pH | - | 7,1 | 6,9 |
| | A1 | 1816 | 647 |
| | A2 | 1817 | 747 |
| | A3 | 1772 | 748 |
| | Média | 1801,67 | 714,00 |
| | Desvio Padrão (S) | 20,98 | 47,38 |
| | Erro Padrão | 6,99 | 15,79 |
| Eficiência de Remoção de Cor (%) | | 60,37% | |
| Cor (uC) | A1 | 123 | 24,00 |
| | A2 | 114 | 23,60 |
| | A3 | 117 | 25,20 |
| | Média | 118,00 | 24,27 |
| | Desvio Padrão (S) | 3,74 | 0,68 |
| | Erro Padrão | 1,25 | 0,23 |
| | Eficiência de Remoção de Turbidez (%) | | 79,44% |
| Turbidez (NTU) | A1 | 0,824 | 0,460 |
| | A2 | 0,680 | 0,427 |
| | A3 | 0,628 | 0,429 |
| | Média | 0,711 | 0,439 |
| | Desvio Padrão (S) | 0,041 | 0,015 |
| | Erro Padrão | 0,041 | 0,008 |
| | - | 2786,91 | 1775,80 |
| DQO (mg.L⁻¹) | Eficiência de Remoção de DQO (%) | | 36,28% |

A1= Amostra 1; A2= Amostra 2; A3= Amostra 3; S= Desvio padrão.

A DQO utilizada foi calcula de acordo com a curva de biftalato: $3717,3 * x + 143,91$

Fonte: Autora, 2025.

Com base nos dados apresentados na Tabela 2, observou-se uma leve redução no valor de pH após o tratamento realizado pela lavanderia, passando de 7,1 para 6,9. Ambos os valores permanecem dentro da faixa neutra (6,0 a 8,0), indicando que o processo não promoveu alterações significativas na acidez ou alcalinidade do efluente, mantendo-o em conformidade com os limites estabelecidos pela legislação ambiental vigente para lançamento em corpos hídricos ou possível reuso.

No que se refere ao parâmetro cor, o tratamento apresentou uma eficiência de remoção de 60,37%. A redução de aproximadamente 1801,67 uc para 714 uc indica uma eliminação significativa de corantes e compostos cromóforos presentes no efluente.

A turbidez, por sua vez, apresentou uma expressiva redução de 118 Unidade Nefelométrica de Turbidez (NTU) no efluente bruto para 24,27 NTU no efluente tratado, o que representa uma eficiência de 79,44%. Essa diminuição reflete uma remoção eficaz de partículas em suspensão e sólidos coloidais, resultando em uma melhoria considerável na qualidade visual da água.

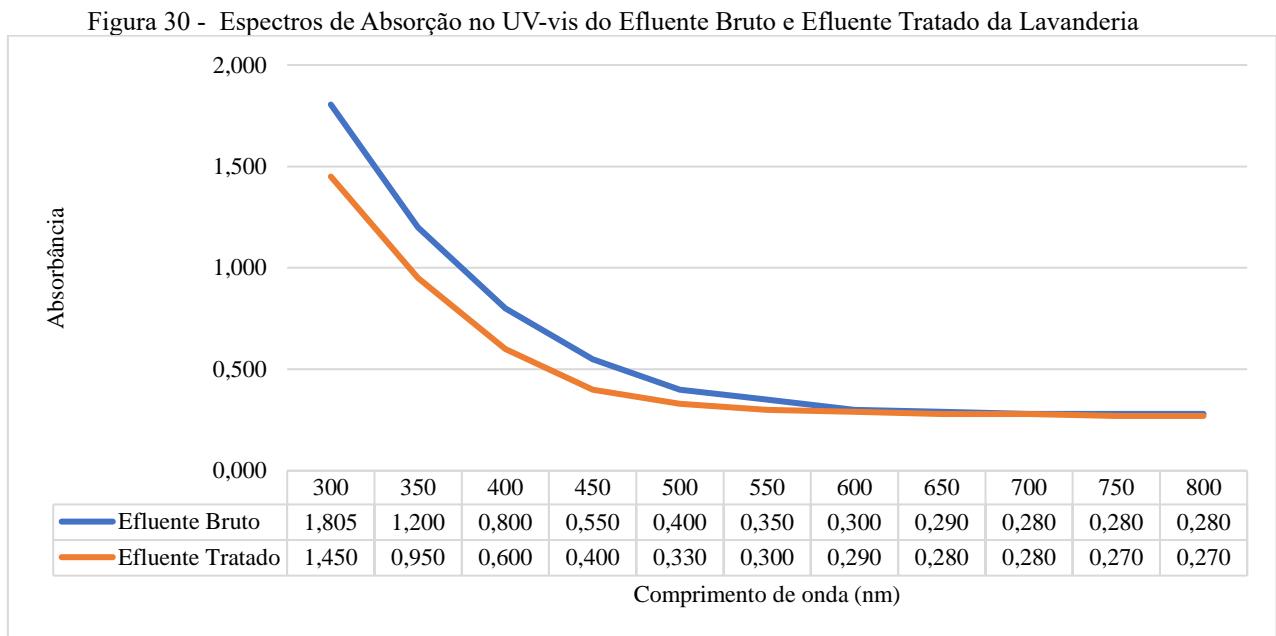
A DQO, parâmetro que indica a carga de matéria orgânica presente no efluente, apresentou redução de 2786,91 mg/L no efluente bruto para 1775,80 mg/L após o tratamento, o que corresponde a uma eficiência de remoção de 36,28%. Embora o processo adotado pela lavanderia tenha demonstrado capacidade parcial na degradação dos compostos orgânicos, o valor final da DQO permanece acima do limite permitido pela CPRH, que estabelece, conforme a Instrução Normativa nº003/2022, para o reuso de efluentes, o percentual mínimo de redução de DQO entre 60% e 80%, a depender da proporção de reuso em relação ao volume total gerado. Considerando que a redução observada foi inferior ao mínimo estabelecido, o processo de tratamento atualmente empregado pela lavanderia não atende aos requisitos normativos para reuso, tampouco aos padrões de lançamento previstos no artigo 16 da Resolução CONAMA nº 430/2011.

Esses achados são consistentes com os reportados por Fontana *et al.* (2021), que avaliaram o desempenho de um sistema de coagulação-flocação seguido de decantação aplicado ao efluente de uma lavanderia têxtil. O estudo obteve eficiência média de remoção de cor de 55%, turbidez de 70% e DQO de apenas 30%, valores semelhantes aos encontrados nesta pesquisa. Os autores destacam que, embora o tratamento convencional reduza significativamente os sólidos suspensos e a turbidez, sua capacidade de remoção de matéria orgânica e corantes recalcitrantes é limitada, exigindo etapas complementares para atingir padrões mais exigentes de qualidade.

De forma semelhante, o estudo de Ahmed *et al.* (2023) analisou o uso de tratamento físico-químico convencional (coagulação química com sulfato de alumínio e flocação) em efluentes de lavanderia de jeans e obteve redução de DQO em torno de 40%, cor em cerca de 60% e turbidez em torno de 75%, reforçando o padrão de desempenho observado no presente trabalho. Ambos os estudos destacam que a natureza complexa dos efluentes de lavanderias de beneficiamento de jeans, ricos em corantes dispersos, surfactantes, óleos e outros aditivos

químicos, dificulta sua depuração por processos convencionais, justificando a necessidade de integração com tecnologias avançadas, como os processos oxidativos avançados.

A partir da leitura realizada pelo método colorimétrico no espectrofotômetro Thermo Scientific Evolution 100, determinou-se a absorbância do efluente real bruto e do efluente real tratado no intervalo UV-vis, conforme ilustrado na Figura 30.



Fonte: Autora, 2025.

A redução total de aproximadamente 17% na absorbância observada após o tratamento físico-químico realizado pela lavanderia está em consonância com os resultados reportados na literatura recente para efluentes têxteis submetidos a processos convencionais de coagulação e floculação (Rodrigues, 2023). Esses métodos, embora eficazes na remoção de sólidos suspensos e parte da matéria orgânica, apresentam limitações na eliminação completa de corantes solúveis e compostos orgânicos de cadeia longa.

Estudos recentes corroboram essa observação. Por exemplo, Paul e Chakraborty (2021) analisaram os processos convencionais de tratamento de efluentes têxteis e concluíram que, embora métodos físico-químicos como coagulação e floculação promovam significativa redução na turbidez e na DQO, a remoção de corantes sintéticos persistentes, especialmente os reativos e dispersos, permanece limitada. Essa limitação aponta para a necessidade de tratamentos complementares, como os processos oxidativos avançados, para atender padrões ambientais mais rigorosos.

Além disso, Ribeiro *et al.* (2022) avaliaram o desempenho de diferentes coagulantes naturais e sintéticos no tratamento de efluentes de lavanderias de jeans e observaram que, mesmo com a otimização das condições operacionais, a eficiência na remoção de corantes

solúveis foi insatisfatória. Os autores destacam que os processos físico-químicos convencionais, embora eficazes na remoção de sólidos e matéria orgânica particulada, não são suficientes para garantir a completa descoloração, especialmente em efluentes com elevada carga de cor.

Ao comparar os resultados obtidos com os critérios estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011 e pela Instrução Normativa CPRH nº 003/2022, verifica-se que os valores de pH, tanto no efluente bruto quanto no tratado, encontram-se dentro da faixa permitida para lançamento em corpos receptores (5,0 a 9,0). Com relação à cor, observou-se uma redução significativa após o tratamento; no entanto, o valor médio da cor do efluente tratado (714 uC, unidade convencional de cor, equivalente a $\text{mg Pt}\cdot\text{L}^{-1}$) ainda se apresenta elevado. Embora não exista um limite específico para a cor do efluente final nessas normativas, esse parâmetro deve ser monitorado, uma vez que pode influenciar negativamente as características do corpo hídrico receptor. A Resolução CONAMA nº 357/2005 estabelece como referência o limite de 75 $\text{mg Pt}\cdot\text{L}^{-1}$ para a cor aparente em corpos d'água de classe 2, como é o caso do Rio Capibaribe, e, portanto, valores significativamente superiores no efluente podem indicar potencial de impacto ambiental, devendo ser considerados na avaliação da eficiência do tratamento e na definição de estratégias de mitigação.

Com relação à turbidez, apesar da Resolução CONAMA nº 430/2011 não estabelecer limites específicos para esse parâmetro em efluentes lançados, ao se considerar os padrões de qualidade da água definidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 (máximo de 100 NTU para águas doces de classe 2), o valor observado no efluente tratado (24,27 NTU) encontra-se dentro dos limites aceitáveis, desde que respeitada a carga e vazão de lançamento.

Por fim, embora tenha havido redução da DQO, a eficiência de remoção de 36,28% ficou aquém do mínimo de 80% exigido pela Instrução Normativa nº 003/2022 da CPRH. Esse resultado evidencia que o tratamento atualmente empregado ainda é insuficiente para garantir a conformidade ambiental no que se refere à remoção de matéria orgânica, indicando a necessidade de melhorias no sistema de tratamento para atender aos parâmetros legais e mitigar os impactos ao meio ambiente.

Nesse contexto, considerando a crescente demanda por soluções sustentáveis e a necessidade de reuso da água em regiões sujeitas à escassez hídrica, o uso de POA, com destaque para a fotocatálise heterogênea irradiada por luz solar, proposta central deste estudo, mostra-se uma alternativa promissora. Essa tecnologia pode complementar o tratamento existente, promovendo maior eficiência na remoção de contaminantes orgânicos e melhorando

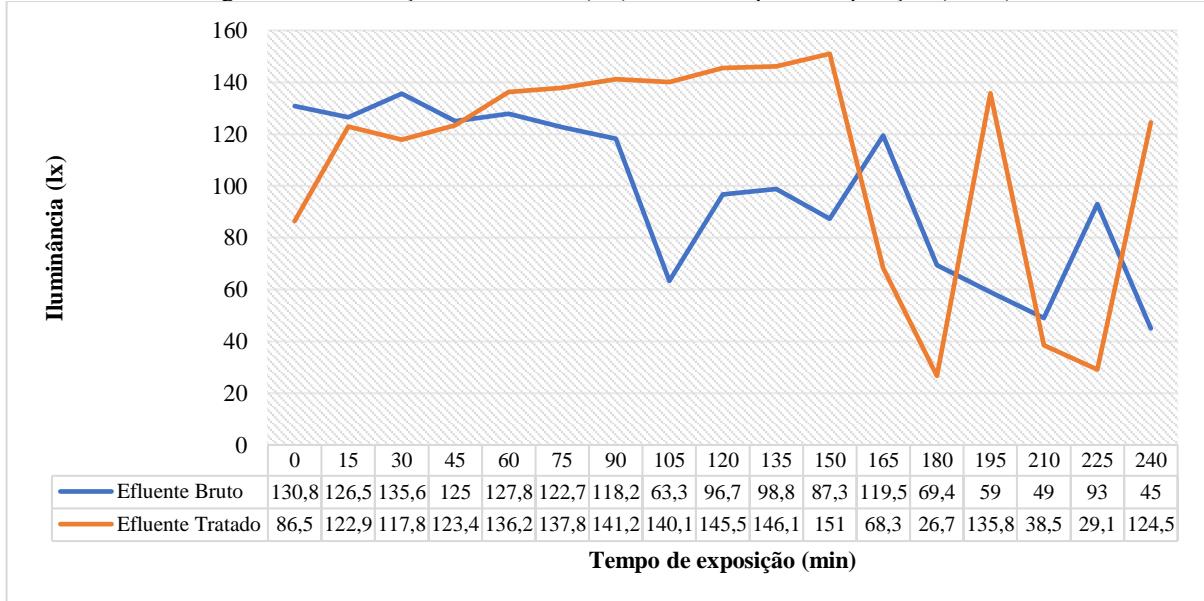
a qualidade final do efluente, viabilizando sua reutilização de forma segura e ambientalmente adequada.

5.1.2 Fotocatálise Heterogênea Irradiada por Luz Solar

Durante o processo de fotocatálise heterogênea irradiada por luz, a iluminância foi monitorada periodicamente ao longo do tempo de exposição, a fim de garantir condições de irradiação controladas e homogêneas seguindo os estudos de Garcia (2006) e Silva (2011), conforme ilustrado no gráfico da Figura 31. Esse procedimento visa otimizar a reação photocatalítica, permitindo a degradação eficaz dos contaminantes presentes nas amostras, especialmente os corantes e compostos orgânicos recalcitrantes, comuns nos efluentes têxteis.

Durante a aplicação da fotocatálise heterogênea irradiada por luz solar, observou-se uma variação nos valores de iluminância (lx) ao longo do tempo de exposição (h), tanto para o efluente bruto quanto para o efluente previamente tratado. A iluminância, diretamente relacionada à intensidade da radiação solar incidente, apresentou comportamento crescente nos primeiros 150 minutos (2h30), especialmente nas amostras de efluente tratado, que alcançaram o valor máximo de 151 lx nesse intervalo. A partir desse ponto, verificou-se uma redução gradual da iluminância, possivelmente associada à diminuição natural da radiação solar no decorrer do dia ou à presença de nuvens.

Figura 31 - Correlação Iluminância (Lx) com o Tempo de Exposição (horas)



Fonte: Autora, 2025.

A análise dos dados sugere que o processo de fotocatálise foi mais eficiente nas primeiras horas de exposição solar, especialmente até 2h30, quando as condições de iluminância foram mais favoráveis para a geração de espécies oxidantes, como os radicais

hidroxila ($\cdot\text{OH}$), fundamentais para a degradação de poluentes orgânicos. Após esse período, com a diminuição da intensidade luminosa, a eficiência potencial do processo pode ter sido reduzida, evidenciando a importância de realizar a fotocatálise durante o pico de radiação solar para maximizar os resultados do tratamento.

Após 2 e 4 horas de exposição à radiação solar com agitação magnética, as amostras foram analisadas quanto à cor aparente, turbidez e DQO, com o objetivo de avaliar a eficiência do processo photocatalítico na remoção de contaminantes do efluente.

5.1.2.1 Fotocatálise Heterogênea Irradiada por Luz Solar no Efluente Real Bruto

As Figuras 32 e 33 apresentam o aspecto das amostras após os processos de tratamento e filtração. As amostras T1 a T4 foram expostas à luz solar por 2 horas, enquanto as amostras T5 a T8 permaneceram expostas por 4 horas.

Figura 32 - Amostras T1 a T4 após Fotocatálise Heterogênea Irradiada por Luz Solar por 2h no Efluente Bruto



Fonte: Autora, 2025.

Figura 33 - Amostras T5 a T8 após Fotocatálise Heterogênea Irradiada por Luz Solar por 4h no Efluente Bruto



Fonte: Autora, 2025.

Nos tratamentos T6 e T8, a determinação da DQO não foi possível devido à turvação das amostras ao serem inseridas na cubeta de quartzo (não houve contaminação da cubeta), conforme ilustrado na Figura 34, o que comprometeu a leitura espectrofotométrica e, consequentemente, a avaliação completa da eficiência do tratamento nesses casos. Esse comportamento é frequentemente observado em processos de fotocatálise heterogênea, especialmente com o uso de óxidos metálicos como o dióxido de titânio (TiO_2), cuja natureza

insolúvel faz com que o catalisador permaneça disperso em suspensão no meio reacional. Assim, mesmo após o término do processo, a presença de partículas residuais de TiO₂ não sedimentadas contribui significativamente para a turbidez das amostras, dificultando análises ópticas que requerem soluções claras (Dantas, 2022).

Figura 34 - Amostra Turva após ser colocada na Cubeta de Quarto para Determinação de DQO



Fonte: Autora, 2025.

A Tabela 3 apresenta as médias dos valores obtidos para as amostras de efluente real bruto após o tratamento, bem como a eficiência dos processos por fotocatálise heterogênea, avaliada por meio da comparação entre as características físico-químicas do efluente bruto da lavanderia e aquelas observadas após a aplicação do POA. Os dados completos, incluindo as análises em triplicata, estão registrados no Apêndice B.

Tabela 3 - Características Físico-Químicas após Fotocatálise Heterogênea Irradiada por Luz Solar no Efluente Bruto

| Tratamento | Cor (uc) | Eficiência Cor (%) | Turbidez (NTU) | Eficiência Turbidez (%) | DQO (mg.L ⁻¹) | Eficiência DQO (%) |
|------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------|
| T1 | $713,33 \pm 6,75$ | 60,41 | $109,33 \pm 1,03$ | 7,34 | $696,55 \pm 0,017$ | 75,01 |
| T2 | $737 \pm 7,08$ | 59,09 | $21,27 \pm 0,17$ | 81,98 | $946,85 \pm 0,002$ | 66,03 |
| T3 | $772 \pm 5,66$ | 57,15 | $28,67 \pm 0,08$ | 75,71 | $998,89 \pm 0$ | 64,16 |
| T4 | $758 \pm 1,63$ | 57,93 | $38,67 \pm 0,14$ | 67,23 | $656,90 \pm 0$ | 76,43 |
| T5 | $762 \pm 1,63$ | 57,71 | $48,07 \pm 0,10$ | 59,27 | $809,31 \pm 0$ | 70,96 |
| T6 | $700 \pm 1,52$ | 61,15 | $40,83 \pm 0,09$ | 65,40 | - | - |
| T7 | $570 \pm 1,09$ | 68,36 | $27,13 \pm 0,03$ | 77,01 | $898,52 \pm 0$ | 67,76 |
| T8 | $814 \pm 1,91$ | 54,82 | $47,07 \pm 4,73$ | 60,11 | - | - |

Fonte: Autora, 2025.

A análise dos dados apresentados na Tabela 3 comprova a eficácia do POA, com destaque para a fotocatálise heterogênea irradiada por luz solar, na melhoria das características físico-químicas do efluente bruto de lavanderia.

No parâmetro de cor aparente, os tratamentos demonstraram eficiências variando de 54,82% (T8) a 68,36% (T7), valor compatível com os resultados de Gar Alalm, Tawfik e

Ookawara (2021), que observaram remoções superiores a 60% de cor em efluentes têxteis tratados com dióxido de titânio (TiO_2) sob radiação solar. O desempenho do tratamento T7 neste estudo reforça essas constatações, demonstrando a viabilidade da tecnologia para aplicações em escala real.

Quanto à turbidez, os resultados foram igualmente significativos, com eficiências entre 7,34% (T1) e 81,98% (T2). Os tratamentos T2, T7 e T3 se destacaram por atingirem remoções superiores a 75%, indicando não apenas a degradação de compostos químicos, mas também a formação de agregados e posterior sedimentação de partículas. Essa tendência está alinhada com os achados de Ribeiro, Ferrari e Tavares (2020), que atribuíram elevadas remoções de turbidez em sistemas fotocatalíticos à adequada dispersão do catalisador e à exposição solar prolongada.

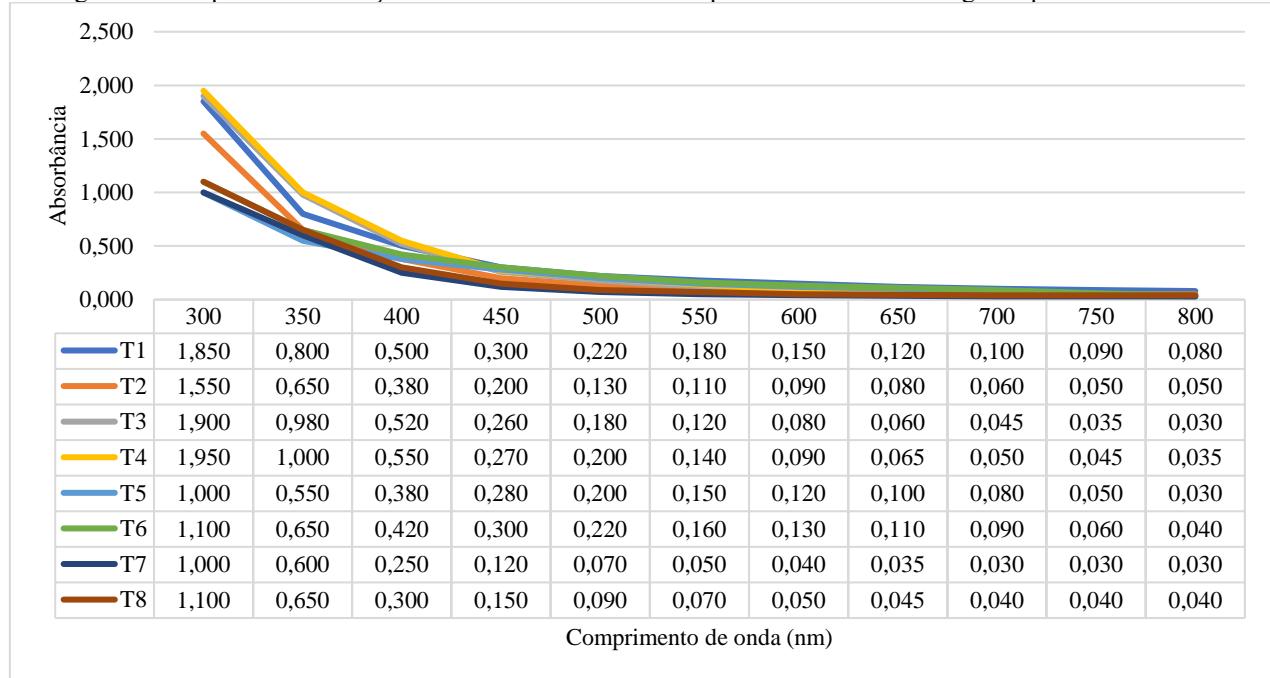
No que diz respeito à DQO, observou-se uma variação de eficiência de remoção entre 64,16% (T3) e 76,43% (T4), sendo este último o tratamento com maior desempenho na degradação da carga orgânica. De acordo com Beyazıt e Karaca (2020), a eficiência da degradação da carga orgânica em processos fotocatalíticos pode ser limitada pela geração de intermediários parcialmente oxidados, exigindo tempos de exposição mais longos ou a associação com oxidantes auxiliares, como o peróxido de hidrogênio, para alcançar maiores taxas de mineralização. Assim, o desempenho de T4 indica condições operacionais propícias à geração de radicais hidroxila em níveis suficientes para promover a quebra eficaz de estruturas orgânicas complexas.

Ao se considerar os três parâmetros simultaneamente, o tratamento T4 apresentou o melhor desempenho global: remoção de 57,93% da cor, 67,23% da turbidez e 76,43% da DQO. Embora não tenha alcançado os maiores índices individuais para cor ou turbidez, seu equilíbrio entre os diferentes parâmetros, combinado com a maior eficiência na remoção da matéria orgânica — o parâmetro mais crítico para avaliação da qualidade do efluente — o torna o tratamento mais eficaz entre os avaliados. Esse comportamento está em consonância com as observações de Mahmoud *et al.* (2022), que ressaltam a importância da avaliação integrada de múltiplos indicadores no desempenho de processos fotocatalíticos, destacando que a simples redução da cor não garante a completa degradação dos poluentes orgânicos presentes no efluente.

Assim como no efluente real, também foi realizada a leitura da absorbância com espectrofotômetro nas amostras de efluente bruto que foram expostas por 2h e 4h ao sol. Os gráficos são vistos na Figura 35. A análise do gráfico evidencia que a aplicação da fotocatálise heterogênea sob irradiação solar resultou em uma redução significativa da absorbância total do

efluente têxtil. Os percentuais de redução obtidos para os tratamentos T1 a T8 foram, respectivamente: T1 = 32,8%, T2 = 48,7%, T3 = 35,6%, T4 = 32,7%, T5 = 55,0%, T6 = 49,8% e T8 = 60,6%, indicando desempenho relevante na degradação dos compostos orgânicos presentes.

Figura 35 - Espectro de absorção UV-vis do Efluente Bruto após Fotocatálise Heterogênea por Luz Solar



Fonte: Autora, 2025.

Esses resultados estão em consonância com os achados de Gar Alalm, Tawfik e Ookawara (2021), que reportaram uma redução média de 60% na absorbância total de efluentes têxteis tratados por fotocatálise com TiO₂ sob luz solar, com maior eficácia na faixa de 300 a 450 nm, correspondente aos corantes reativos. De forma semelhante, Ribeiro, Ferrari e Tavares (2020), observaram reduções de até 70% na absorbância espectral total em efluentes de lavanderias industriais, sobretudo em condições otimizadas de concentração de TiO₂ e tempo de exposição solar superior a 90 minutos.

Beyazıt e Karaca (2020) destacaram que a aplicação de TiO₂ ou ZnO em combinação com peróxido de hidrogênio, durante 2 horas de irradiação solar, promoveu redução superior a 60% tanto na cor aparente quanto na DQO, evidenciando a sinergia entre o catalisador e o agente oxidante. Adicionalmente, Mahmoud *et al.* (2022) confirmaram a eficiência da fotocatálise heterogênea na remoção de compostos aromáticos, sobretudo na faixa de 300 a 500 nm, e atribuíram a persistência de absorbância em comprimentos de onda superiores a 600 nm à presença de intermediários de degradação com estruturas ainda parcialmente conjugadas.

5.1.2.2 Fotocatálise Heterogênea Irradiada por Luz Solar no Efluente Real Tratado

As Figuras 36 e 37 apresentam o aspecto das amostras após os processos de tratamento e filtração. As amostras T1 a T4 foram expostas à luz solar por 2 horas, enquanto as amostras T5 a T8 permaneceram expostas por 4 horas.

Figura 36 - Amostras T1 a T4 após Fotocatálise Heterogênea Irradiada por Luz Solar por 2h no Efluente Tratado



Fonte: Autora, 2025.

Figura 37 - Amostras T5 a T8 após Fotocatálise Heterogênea Irradiada por Luz Solar por 4h no Efluente Tratado



Fonte: Autora, 2025.

A Tabela 4 apresenta as médias dos valores obtidos para as amostras de efluente real tratado da lavanderia após o tratamento, bem como a eficiência dos processos por fotocatálise heterogênea, avaliada por meio da comparação entre as características físico-químicas do efluente bruto da lavanderia e aquelas observadas após a aplicação do POA. Os dados completos, incluindo as triplicatas analíticas, encontram-se devidamente registrados no Apêndice C.

Tabela 4 - Características Físico-Químicas após Fotocatálise Heterogênea Irradiada por Luz Solar no Efluente Tratado

| Tratamento | Cor (uc) | Eficiência Cor (%) | Turbidez (NTU) | Eficiência Turbidez (%) | DQO (mg.L ⁻¹) | Eficiência DQO (%) |
|------------|--------------------|--------------------|-----------------|-------------------------|---------------------------|--------------------|
| T1 | $96 \pm 0,98$ | 86,55 | $8,58 \pm 0,03$ | 64,63 | $1252,90 \pm 0,031$ | 29,45 |
| T2 | $291,67 \pm 13,04$ | 59,15 | $5,58 \pm 0,06$ | 76,99 | $1444,97 \pm 0$ | 18,63 |
| T3 | $271,33 \pm 4,52$ | 62,00 | $9,91 \pm 0,02$ | 59,18 | $1108,55 \pm 0,054$ | 37,57 |
| T4 | $59 \pm 0,27$ | 91,74 | $5,91 \pm 0,01$ | 75,66 | $1615,96 \pm 0,048$ | 9,00 |
| T5 | $102,67 \pm 0,42$ | 85,62 | $8,86 \pm 0,02$ | 63,49 | $1067,04 \pm 0,013$ | 39,91 |

| | | | | | | |
|-----------|-------------------|--------------|------------------|--------------|---------------------|--------------|
| T6 | $88,33 \pm 0,79$ | 87,63 | $6,81 \pm 0,02$ | 71,94 | $1022,43 \pm 0,007$ | 42,42 |
| T7 | $282,67 \pm 0,16$ | 60,41 | $14,97 \pm 0,02$ | 38,32 | $1010,04 \pm 0$ | 43,12 |
| T8 | $43 \pm 0,27$ | 93,98 | $9,76 \pm 0,01$ | 59,77 | $1015,00 \pm 0,029$ | 42,84 |

Fonte: Autora, 2025.

A Tabela 4 apresenta os valores de eficiência do POA, por meio da fotocatálise heterogênea irradiada por luz solar, aplicado ao efluente previamente tratado por métodos convencionais.

Os dados demonstram elevada eficiência na remoção da cor aparente, com destaque para os tratamentos T8 (93,98%), T4 (91,74%) e T6 (87,63%). Esses resultados corroboram estudos como os de Mahmoud *et al.* (2022), que relatam remoções superiores a 90% de cor em efluentes têxteis submetidos à fotocatálise com TiO₂, especialmente na presença de luz solar natural e após tratamento físico-químico prévio.

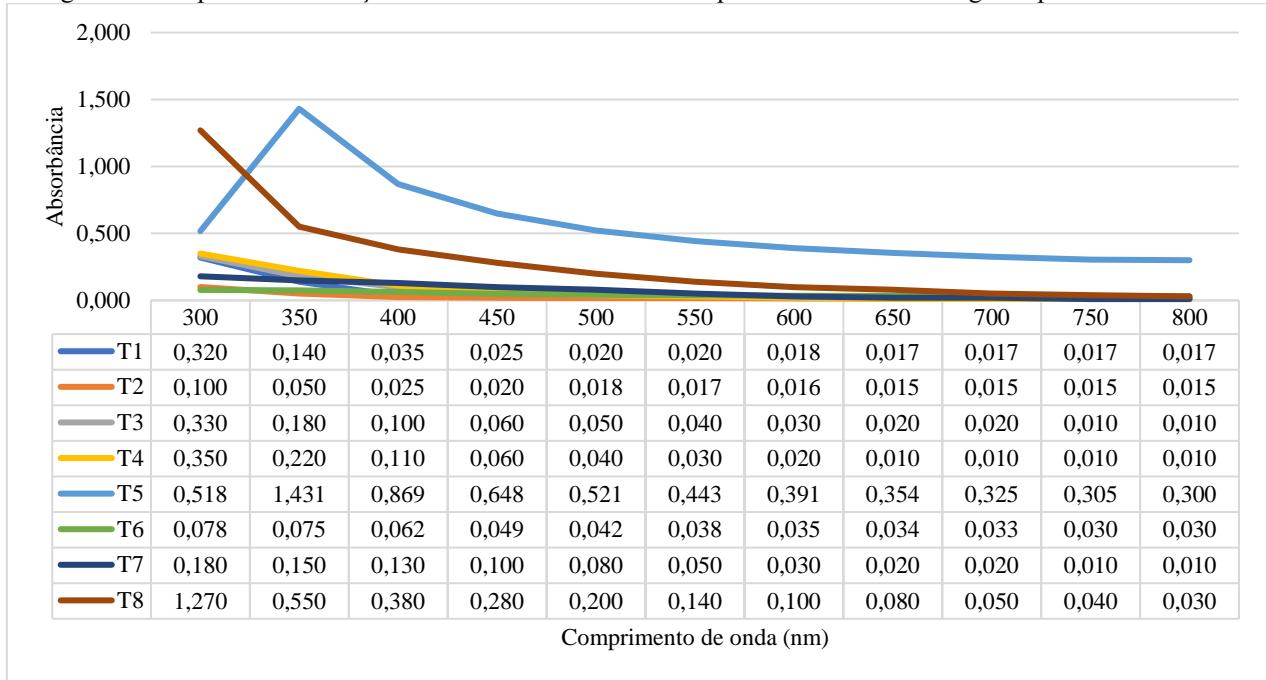
Quanto à turbidez, os maiores percentuais de remoção foram observados nos tratamentos T2 (76,99%), T4 (75,66%) e T6 (71,94%). Esses valores são compatíveis com os achados de Ribeiro, Ferrari e Tavares (2020), que destacam que o uso de semicondutores como TiO₂ pode promover não apenas a degradação de contaminantes solúveis, mas também a agregação e sedimentação de partículas coloidais, resultando em redução significativa da turbidez.

No que tange à matéria orgânica, expressa pela DQO, os maiores percentuais de remoção foram obtidos nos tratamentos T7 (43,12%), T8 (42,84%) e T6 (42,42%). Esses resultados estão em conformidade com estudos como os de Beyazit e Karaca (2020), que apontam que, mesmo após tratamentos convencionais, compostos orgânicos recalcitrantes tendem a permanecer no efluente, sendo apenas parcialmente degradados por POA.

Considerando os três parâmetros de forma integrada, o tratamento T6 apresentou o desempenho mais equilibrado, com 87,63% de remoção de cor, 71,94% de turbidez e 42,42% de DQO, demonstrando elevada eficácia global na melhoria da qualidade do efluente tratado. Embora T8 tenha apresentado o melhor desempenho na remoção de cor e resultado próximo em DQO, sua eficiência na redução da turbidez (59,77%) foi inferior à de T6. Por sua vez, o tratamento T4, apesar de sua elevada eficiência na remoção de cor e turbidez, apresentou baixo desempenho na redução da DQO (9%), possivelmente devido à geração de subprodutos intermediários, conforme observado por Gar Alalm, Tawfik e Ookawara (2021), que identificaram a persistência de compostos parcialmente degradados após processos photocatalíticos. Dessa forma, T6 se destaca como o tratamento mais eficiente e consistente entre os analisados, promovendo melhorias significativas nos três indicadores de qualidade do efluente.

Assim como no efluente real, também foi realizada a leitura da absorbância com espectrofotômetro nas amostras de efluente tratado que foram expostas por 2h e 4h ao sol. Os gráficos são vistos na Figura 38.

Figura 38 - Espectro de absorção UV-vis do Efluente Tratado após Fotocatálise Heterogênea por Luz Solar



Fonte: Autora, 2025.

A análise dos dados de absorbância apresentados revela a eficácia variável da fotocatálise heterogênea irradiada por luz solar na degradação de compostos presentes no efluente tratado de lavanderia. O valor de absorbância total do efluente bruto era de 5,420, e os tratamentos T1 a T8 resultaram em diferentes níveis de redução, com destaque para T2 (0,306), T1 (0,646), e T6 (0,506), evidenciando remoções superiores a 85%, enquanto T5 apresentou uma absorbância ainda maior que a do efluente bruto (6,105), indicando possível intensificação de compostos absorventes ou formação de subprodutos intermediários.

Esses achados se alinham aos resultados reportados por Gar Alalm, Tawfik e Ookawara (2021), que observaram reduções médias de 60% na absorbância espectral total de efluentes têxteis tratados com TiO₂ e luz solar, com ênfase na faixa de 300–450 nm, onde se encontram os picos mais intensos associados à presença de corantes reativos. Da mesma forma, Ribeiro, Ferrari e Tavares (2020), relataram reduções de até 70% na absorbância em efluentes de lavanderia após fotocatálise, especialmente com controle de dosagem de TiO₂ e tempo de exposição solar superior a 90 minutos. O comportamento observado nos tratamentos T2 e T6 corrobora esses achados, sugerindo que o tempo e as condições experimentais foram adequados à degradação fotocatalítica.

O aumento da absorbância em T5 pode ser comparado a fenômenos relatados por Beyazit e Karaca (2020), que destacam a possibilidade de formação de intermediários parcialmente oxidados com estruturas aromáticas ainda ativas em termos ópticos, resultando em elevações pontuais na absorbância, especialmente em comprimentos de onda superiores a 500 nm. Isso é consistente com a maior concentração de absorbância observada nesse tratamento nas faixas de 400 a 800 nm.

Mahmoud *et al.* (2022) também reforçam que a eficiência da fotocatálise depende da natureza dos compostos presentes no efluente, sendo que sistemas com alta carga orgânica ou presença de surfactantes e aditivos podem apresentar resistência à degradação completa, gerando picos residuais de absorbância mesmo após exposição solar prolongada.

Portanto, os dados experimentais indicam que a fotocatálise heterogênea irradiada por luz solar foi eficaz na redução da absorbância espectral total na maioria dos tratamentos, com destaque para T2, T1 e T6, e os resultados obtidos estão em consonância com os principais estudos da literatura, reafirmando a relevância do TiO₂ como catalisador eficiente em sistemas reais de tratamento de efluentes têxteis.

5.1.3 Teste de Ecotoxicidade

A avaliação ecotoxicológica foi realizada por meio de bioensaios com sementes de *Lactuca sativa L.* (alface) e *Allium cepa* (cebola), conforme Tabela 5, utilizando amostras do efluente bruto, tratado pela lavanderia e os tratamentos T4 e T6, correspondentes à aplicação do processo de fotocatálise heterogênea com exposição à luz solar por 2h no efluente bruto e por 4h no efluente tratado, respectivamente. Os ensaios consideraram diferentes diluições dos efluentes (25%, 50%, 75% e 100%), e os parâmetros analisados foram o Índice de Crescimento Relativo (ICR) e o Índice de Germinação (IG), utilizados como indicadores da resposta biológica frente à exposição aos compostos presentes nos efluentes.

Tabela 5 - Resultados Testes de Ecotoxicidade com *Lactuca sativa* (alface) e com *Allium Cepa* (cebola)

| | | | | | | | | | |
|-----------|------|---|---|-------|------|------|------|-------|-------|
| | 25% | 5 | 2 | 6,44 | 5,36 | 0,66 | 0,48 | 36,53 | 13,68 |
| T4 | 50% | 3 | 0 | 4,11 | 0 | 0,42 | 0 | 13,98 | 0 |
| | 75% | 1 | 0 | 8,22 | 0 | 0,84 | 0 | 9,32 | 0 |
| | 100% | 3 | 2 | 12,28 | 2,24 | 1,25 | 0,20 | 41,78 | 5,72 |
| | 25% | 4 | 1 | 10,91 | 5,29 | 1,11 | 0,47 | 49,50 | 6,75 |
| T6 | 50% | 4 | 0 | 10,06 | 0 | 1,03 | 0 | 45,62 | 0 |
| | 75% | 1 | 0 | 6,36 | 0 | 0,65 | 0 | 7,21 | 0 |
| | 100% | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Fonte: Autora, 2025.

Para as sementes de alface, o controle com água destilada apresentou crescimento médio de 9,80 mm. Em relação ao efluente bruto, observou-se uma resposta não linear: as concentrações de 25% e 100% resultaram em menor germinação (31,57% e 39,47%, respectivamente) e crescimento reduzido, indicando toxicidade evidente. Por outro lado, as diluições de 50% e 75% promoveram maior desenvolvimento, atingindo um índice de germinação (IG) de 86,44% na diluição de 75%, o que sugere a presença de compostos orgânicos que, em concentrações moderadas, atuam como bioestimulantes. O efluente tratado, por sua vez, apresentou melhora significativa nos parâmetros avaliados. Todas as diluições testadas superaram o controle em termos de crescimento e germinação, com destaque para a concentração de 25%, que alcançou um crescimento médio de 23,35 mm e IG de 238,28%. Esses resultados indicam não apenas uma redução efetiva da toxicidade, mas também a possível presença de nutrientes ou subprodutos benéficos formados durante o processo de tratamento.

Os tratamentos fotocatalíticos T4 e T6 apresentaram comportamentos distintos. O T4 demonstrou toxicidade moderada, com valores de germinação e crescimento inferiores aos observados para o efluente tratado, mas geralmente superiores ao efluente bruto. Em contrapartida, o T6 apresentou efeitos tóxicos mais acentuados, especialmente na concentração de 100%, na qual não houve germinação, evidenciando a possível formação de compostos recalcitrantes ou subprodutos tóxicos ao longo do tratamento mais prolongado.

Para as sementes de cebola, o efluente bruto revelou um efeito estimulante no crescimento, especialmente na diluição de 25%, que apresentou crescimento médio de 23,59 mm e IG de 270,97%. Mesmo na concentração integral (100%), o crescimento foi superior ao do controle (12,60 mm contra 11,19 mm), sugerindo que, para essa espécie, o efluente bruto pode conter substâncias bioativas que, embora presentes, não foram suficientemente tóxicas para inibir o desenvolvimento inicial. Em contraste, o efluente tratado resultou em queda nos parâmetros de germinação e crescimento em todas as diluições testadas. As concentrações de 50% e 75% foram particularmente afetadas, apresentando IG de 39,26% e 9,29%, respectivamente. Esses dados indicam que, embora o tratamento tenha beneficiado a alface, ele

pode ter gerado subprodutos menos toleráveis para a cebola, evidenciando diferentes sensibilidades fisiológicas entre as espécies utilizadas nos bioensaios.

Os tratamentos T4 e T6 também demonstraram elevada toxicidade para as sementes de *Allium cepa*, especialmente em concentrações acima de 25%, nas quais a germinação foi praticamente inexistente. A exceção foi o tratamento T6 na concentração de 100%, que apresentou crescimento considerável (14,49 mm), apesar da baixa taxa de germinação (36,98%), sugerindo toxicidade seletiva ou efeitos fisiológicos adversos específicos.

Esses resultados contrastam com os de Santana (2022), que avaliou a toxicidade de efluentes contendo o corante preto direto 22 em sementes de alface e encontrou elevada toxicidade no efluente bruto, com melhora significativa apenas após o tratamento com POA. A divergência pode ser atribuída tanto às diferenças entre as espécies vegetais utilizadas quanto à natureza dos efluentes analisados, sendo o presente estudo baseado em efluente real de lavanderia, possivelmente contendo matéria orgânica biodegradável ou nutrientes residuais. Por outro lado, os dados obtidos se aproximam dos resultados de Silva (2015), que utilizou o processo foto-fenton para tratar efluente de lavanderia e avaliou sua toxicidade por meio de bioensaios com sementes de alface. Em seu estudo, mesmo o efluente bruto permitiu germinação em todas as amostras testadas, com média de 8 ± 1 sementes germinadas, indicando toxicidade moderada. Tal resposta é compatível com os achados do presente trabalho, especialmente no que diz respeito ao comportamento do efluente tratado e de algumas diluições do efluente bruto.

Em síntese, os resultados indicam que a toxicidade dos efluentes avaliados é modulada tanto pela concentração quanto pelo tipo de tratamento aplicado, assim como pela espécie vegetal utilizada como organismo teste. Os bioensaios mostraram que o efluente bruto, embora exerça efeitos tóxicos sobre alface (*Lactuca sativa*), pode apresentar efeito estimulante sobre cebola (*Allium cepa*). Já os tratamentos fotocatalíticos mediado por TiO₂, especialmente o tratamento T6, observou-se maior potencial tóxico em ambas as espécies. Esse efeito é atribuído à ação do TiO₂ como fotocatalisador, que sob exposição à luz solar promove a formação de radicais hidroxila (•OH) e espécies reativas de oxigênio. Esses radicais podem reagir com compostos orgânicos presentes nos efluentes, gerando produtos intermediários altamente oxidados, capazes de interferir no metabolismo, no crescimento e na divisão celular das plantas.

Essa diversidade de respostas enfatiza a importância do uso de múltiplos organismos bioindicadores na avaliação ecotoxicológica de efluentes industriais, permitindo uma análise mais abrangente e precisa dos impactos ambientais decorrentes do descarte, especialmente quando tecnologias fotocatalíticas com TiO₂ são empregadas.

5.2 AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS GERADOS NOS CENÁRIOS CONSIDERADOS

Esta seção apresenta os ICV e as respectivas análises dos impactos ambientais associados aos quatro cenários distintos de tratamento de efluente, elaborados com base na metodologia de ACV. A comparação entre os cenários possibilita avaliar e quantificar os efeitos ambientais de cada alternativa de tratamento.

5.2.1 Efluente Real Bruto da Lavanderia

O primeiro cenário analisado corresponde ao efluente real bruto gerado pelas operações industriais de uma lavanderia de beneficiamento de jeans, coletado na etapa anterior a qualquer procedimento de tratamento. Este efluente caracteriza-se por representar a carga poluente original dos processos produtivos, contendo substâncias provenientes de corantes, detergentes, amaciadores e outros reagentes utilizados nas etapas de lavagem e acabamento têxtil. A Tabela 6 apresenta o ICV referente a esse cenário, no qual os dados de entrada contemplam os materiais utilizados e os dados de saída abrangem as emissões lançadas no corpo hídrico.

Tabela 6 – ICV Cenário 1: Efluente Real Bruto da Lavanderia para 30 Anos

| Parâmetro | Unidade | Efluente Bruto |
|----------------------|------------------------|----------------|
| Materiais utilizados | m ³ de água | 876000 |
| Emissões para a água | Kg DQO | 4882666,85 |

Fonte: Autora, 2025.

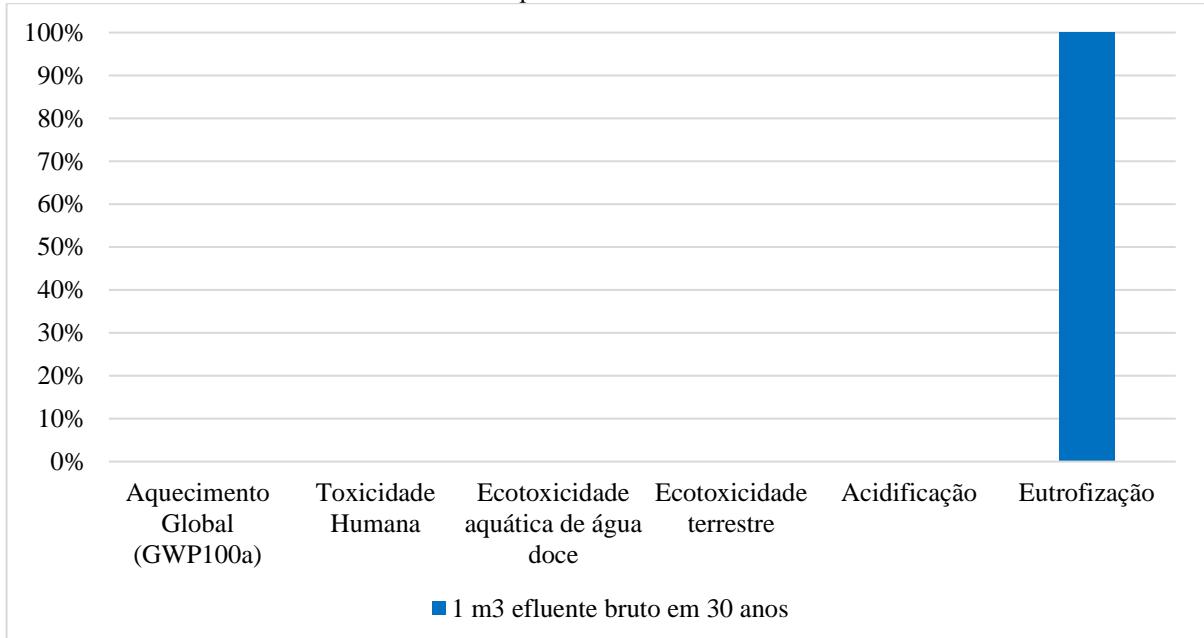
A partir dos dados da Tabela 6, foram estimados os impactos ambientais correspondentes a este cenário no software *SimaPro*. Os resultados das categorias de impacto para o Cenário 1, calculados segundo o método CML-IA estão apresentados na Tabela 7 e Figura 39 e segundo o método ReCiPe 2016 estão apresentados na Tabela 8 e Figura 40 proporcionando uma visualização mais clara dos resultados obtidos.

Tabela 7 - Resultados das Categorias de Impacto para o Cenário 1 - Efluente Real Bruto da Lavanderia para 30 Anos pelo Método CML-IA

| Categoria de impacto/componentes do tratamento | Aquecimento global | Toxicidade humana | Ecotoxicida de aquática em água doce | Ecotoxicidade terrestre | Acidificação | Eutrofização |
|--|-----------------------|-------------------|--------------------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|
| Unidade | kg CO ₂ eq | kg 1,4-DCB | kg P eq | kg 1,4-DCB | kg SO ₂ eq | KGPO ₄ eq |
| Efluente | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,12262 |
| Total | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,12262 |

Fonte: Autora, 2025.

Figura 39 – Resultados das Categorias de Impacto para o Cenário 1 - Efluente Real Bruto da Lavanderia para 30 Anos pelo Método CML-IA



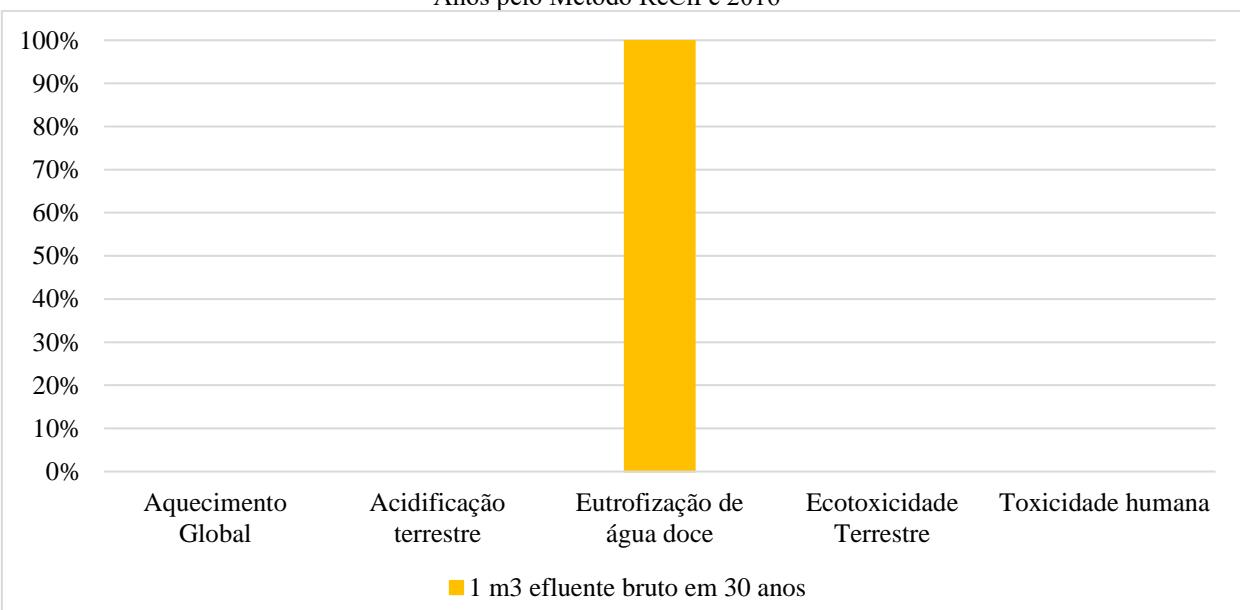
Fonte: Autora, 2025.

Tabela 8 – Resultados das Categorias de Impacto para o Cenário 1 - Efluente Real Bruto da Lavanderia para 30 Anos pelo Método ReCiPe 2016

| Categoria de impacto/componentes do tratamento | Aquecimento global | Acidificação terrestre | Eutrofização de água doce | Ecotoxicidade terrestre | Toxicidade humana cancerígena |
|--|-----------------------|------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| Unidade | kg CO ₂ eq | Kg SO ₂ eq | Kg P eq | Kg 1,4-DCB | Kg 1,4-DCB |
| Efluente | 0 | 0 | 0,047391 | 0 | 0 |
| Total | 0 | 0 | 0,047391 | 0 | 0 |

Fonte: Autora, 2025

Figura 40 – Resultados das Categorias de Impacto para o Cenário 1 - Efluente Real Bruto da Lavanderia Para 30 Anos pelo Método ReCiPe 2016



Fonte: Autora, 2025.

Os resultados obtidos pelo método CML-IA indicam que não houve contribuições significativas nas categorias de aquecimento global, toxicidade humana, ecotoxicidade aquática em água doce, ecotoxicidade terrestre e acidificação. Essa ausência de impacto relevante pode ser atribuída à baixa concentração ou ausência de substâncias no efluente bruto que estejam diretamente associadas aos fatores de caracterização dessas categorias de impacto. Por exemplo, compostos com elevado potencial de aquecimento global, como gases de efeito estufa (CO_2 , CH_4 , N_2O), ou substâncias altamente tóxicas para seres humanos e ecossistemas, não estão presentes em quantidade suficiente no efluente analisado para influenciar significativamente os resultados dessas categorias.

Entretanto, observou-se uma contribuição significativa na categoria de eutrofização, com valor de 0,12262 kg PO_4^{3-} eq para 1m³ de efluente bruto em 30 anos, evidenciando o risco potencial de deterioração da qualidade dos corpos hídricos receptores em função do aporte excessivo de nutrientes. Esse excedente de nutrientes favorece a proliferação de algas e cianobactérias, resultando no consumo do OD na água, o que compromete a sobrevivência da fauna e flora locais. A análise pelo método ReCiPe 2016 confirmou essa tendência, indicando uma carga estimada de 0,047391 kg P eq para 1 m³ de efluente bruto, também em 30 anos, na categoria eutrofização de água doce.

Os resultados obtidos demonstram que, embora o efluente bruto de lavanderias de beneficiamento têxtil não apresente contribuições expressivas em diversas categorias de impacto ambiental, ele exibe um potencial significativo para promover a eutrofização — um dos principais efeitos adversos associados ao descarte inadequado de efluentes industriais. Essa característica decorre da elevada carga de matéria orgânica e nutrientes presentes no efluente, resultantes principalmente do uso de corantes, detergentes, amaciadores e outros reagentes durante as etapas de lavagem, tingimento e acabamento dos tecidos.

Nesse contexto, o estudo conduzido por Ahmed *et al.* (2025) reforça a relevância dessa problemática ao destacar que contaminantes emergentes, como microplásticos, embora não sejam diretamente responsáveis pela eutrofização, podem atuar como vetores para nutrientes e substâncias tóxicas, contribuindo indiretamente para o agravamento desse processo em ambientes aquáticos. Embora o referido estudo não detalhe contribuições em categorias como aquecimento global ou toxicidade, aponta que a presença de contaminantes emergentes nos efluentes pode ampliar a carga ambiental total.

Essas constatações ressaltam a importância de adotar estratégias de tratamento que assegurem não apenas a remoção de matéria orgânica proveniente dos insumos químicos utilizados no processo de beneficiamento, mas também a mitigação eficaz da eutrofização.

Assim, a comparação entre os estudos reforça a centralidade da eutrofização como categoria crítica de impacto ambiental associada ao efluente bruto de lavanderias têxteis, evidenciando a urgência da implementação de tecnologias de tratamento ambientalmente sustentáveis que minimizem os impactos sobre os ecossistemas aquáticos receptores.

5.2.2 Efluente Real Tratado pela ETE da Lavanderia

O segundo cenário considerado corresponde ao efluente real submetido ao tratamento convencional realizado na ETE da lavanderia. Esse sistema tem como objetivo a remoção ou a redução da carga poluente do efluente industrial por meio da aplicação de coagulantes químicos, como o policloreto de alumínio, além do consumo de energia elétrica em diferentes etapas do processo de tratamento. A Tabela 9 apresenta o ICV referente a esse cenário, no qual os dados de entrada contemplam os materiais utilizados e os dados de saída abrangem as emissões lançadas no corpo hídrico.

Tabela 9 - ICV Cenário 2: Efluente Real Tratado pela ETE da Lavanderia para 30 Anos

| Parâmetro | Unidade | Cenário 2 |
|----------------------------|---------------------------------|------------|
| | m ³ de água | 876000 |
| Materiais utilizados | kg de polieletrólico (polímero) | 2190 |
| | kg de policloreto de alumínio | 212868 |
| Energia elétrica consumida | kWh | 1255965 |
| Emissões para a água | Kg DQO | 3111209,83 |

Fonte: Autora, 2025.

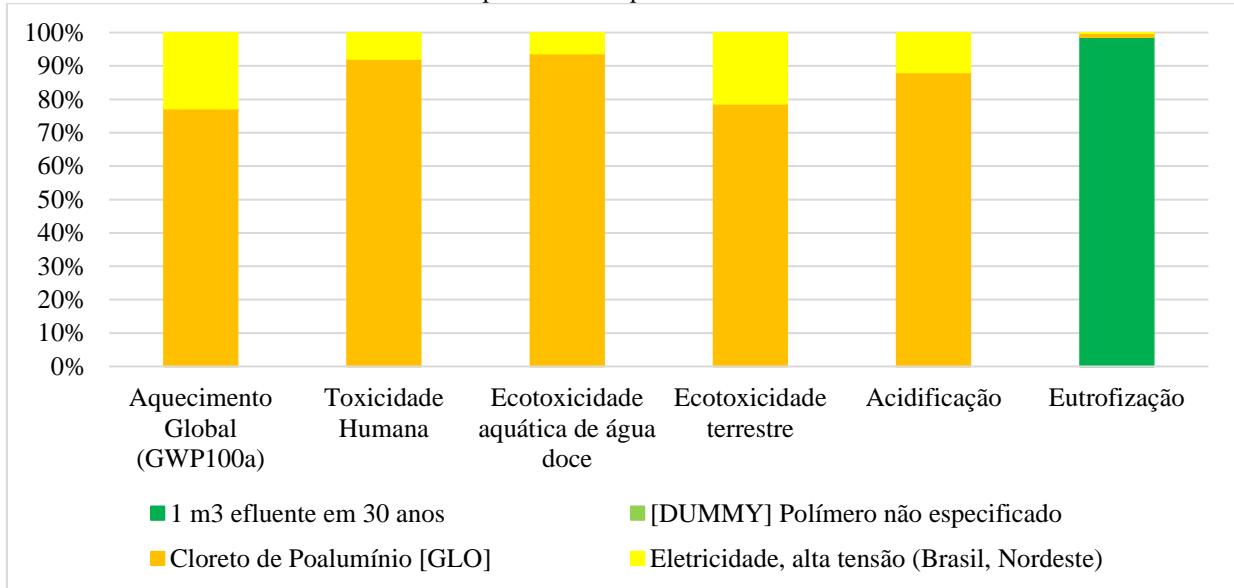
A partir dos dados da Tabela 9, foram estimados os impactos ambientais correspondentes a este cenário no software *SimaPro*. Os resultados das categorias de impacto para o Cenário 2, calculados segundo o método CML-IA estão apresentados na Tabela 10 e Figura 41 e segundo o método ReCiPe 2016 estão apresentados na Tabela 11 e Figura 42 proporcionando uma visualização mais clara dos resultados obtidos.

Tabela 10 - Resultados das Categorias de Impacto para o Cenário 2 - Efluente Real Tratado da Lavanderia para 30 Anos pelo Método CML-IA

| Categoria de impacto/componentes do tratamento | Aquecimento global | Toxicidade humana | Ecotoxicidade aquática em água doce | Ecotoxicidade terrestre | Acidificação | Eutrofização |
|--|-----------------------|-------------------|-------------------------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|
| Unidade | kg CO ₂ eq | kg 1,4-DCB | kg P eq | kg 1,4-DCB | kg SO ₂ eq | KGPO ₄ eq |
| Efluente | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,07813541 |
| Polímero | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Policloreto de alumínio | 0,413333 | 0,763859 | 0,946955 | 0,004093 | 0,00248 | 0,000978 |
| Eletricidade | 0,121457 | 0,064862 | 0,063006 | 0,001108 | 0,000335 | 0,000104 |
| Total | 0,53479057 | 0,82872044 | 1,0099608 | 0,005201876 | 0,002815361 | 0,079217238 |

Fonte: Autora, 2025.

Figura 41 - Resultados das Categorias de Impacto para o Cenário 2 - Efluente Real Tratado pela ETE da Lavanderia para 30 Anos pelo Método CML-IA



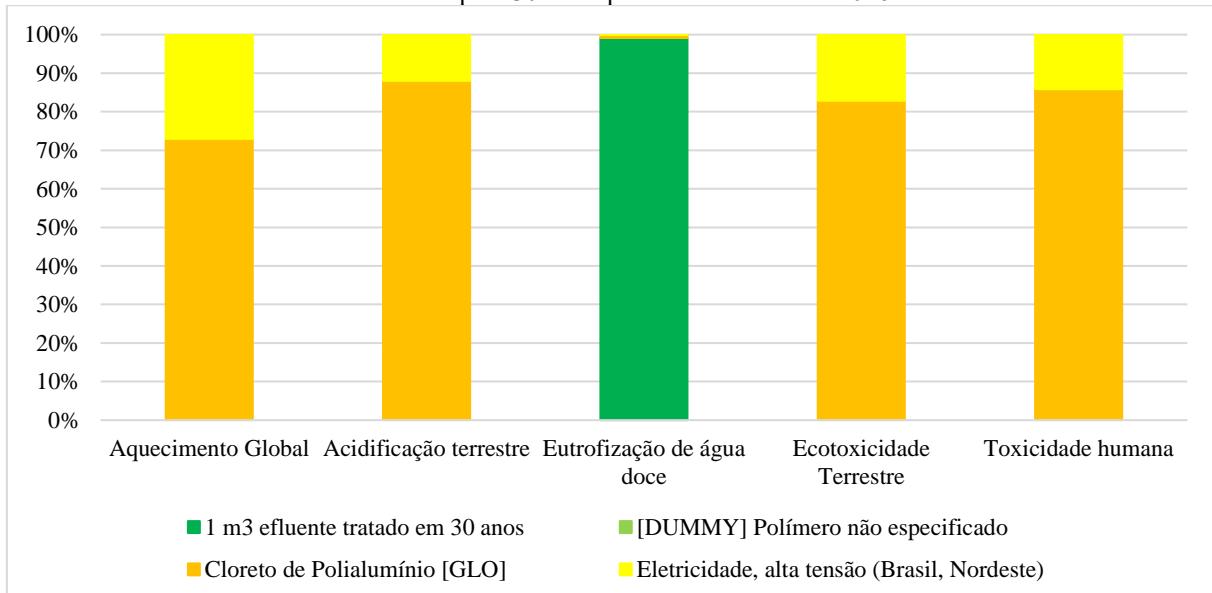
Fonte: Autora, 2025.

Tabela 11 - Resultados das Categorias de Impacto para o Cenário 2 - Efluente Real Tratado da Lavanderia para 30 Anos pelo Método ReCiPe 2016

| Categoría de impacto/componentes do tratamento | Aquecimento global | Acidificação terrestre | Eutrofização de água doce | Ecotoxicidade terrestre | Toxicidade humana cancerígena |
|--|-----------------------|------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------------|
| Unidade | kg CO ₂ eq | Kg SO ₂ eq | Kg P eq | Kg 1,4-DCB | Kg 1,4-DCB |
| Efluente | 0 | 0 | 0,030198 | 0 | 0 |
| Polímero | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Policloreto de alumínio | 0,468153 | 0,002012 | 0,000258 | 0,456571 | 0,000224 |
| Eletricidade | 0,173485 | 0,000274 | 1,9*10 ⁻⁵ | 0,094261 | 3,7*10 ⁻⁵ |
| Total | 0,641638 | 0,002286 | 0,030475 | 0,550832 | 0,000261 |

Fonte: Autora, 2025.

Figura 42 - Resultados das Categorias de Impacto para o Cenário 2 - Efluente Real Tratado pela ETE da Lavanderia para 30 Anos pelo Método ReCiPe 2016



Fonte: Autora, 2025.

Os resultados obtidos para o efluente tratado pelo método físico-químico convencional evidenciam uma redução significativa do impacto ambiental na categoria de eutrofização, com valor de aproximadamente $7,81 \times 10^{-2}$ kg PO₄³⁻ eq para 1 m³ de efluente tratado em 30 anos, segundo o método CML-IA sendo este valor inferior ao registrado para o efluente bruto. Isso demonstra a eficiência parcial do tratamento convencional na remoção de nutrientes. No entanto, as demais categorias avaliadas pelo método CML-IA — como aquecimento global, toxicidade humana, ecotoxicidade aquática doce, ecotoxicidade terrestre e acidificação — apresentaram contribuições residuais, atribuídas principalmente ao consumo de energia elétrica e ao uso de insumos químicos, como o policloreto de alumínio, durante o processo de coagulação-flocação.

De forma complementar, os resultados obtidos pelo método ReCiPe 2016 confirmam impactos ambientais residuais significativos para o efluente tratado pelo processo físico-químico convencional. Foram observados valores expressivos nas categorias de aquecimento global, acidificação terrestre, ecotoxicidade terrestre e toxicidade humana cancerígena, além de contribuição para a eutrofização de água doce, que permanece como impacto relevante. Esses impactos são majoritariamente atribuídos ao consumo de energia elétrica e à utilização de insumos químicos, como o policloreto de alumínio, empregados no processo de coagulação e flocação. Esses resultados reforçam a importância de aprimorar as tecnologias convencionais, buscando estratégias complementares capazes de mitigar os impactos indiretos associados ao consumo de recursos e insumos no tratamento de efluentes industriais.

Esse cenário é semelhante ao descrito por Silva e Duarte (2021), que realizaram uma análise de ciclo de vida de efluentes tratados em lavanderias de beneficiamento de jeans por processos físico-químicos convencionais. O estudo destacou que, embora haja redução efetiva da carga orgânica e de nutrientes no efluente tratado, os processos envolvidos no tratamento, especialmente o consumo de energia elétrica e o uso de coagulantes químicos, contribuem significativamente para impactos ambientais indiretos, principalmente em categorias relacionadas ao aquecimento global e à toxicidade. Eles enfatizam a importância de uma avaliação sistêmica da sustentabilidade, que leve em consideração tanto a eficácia na remoção de poluentes quanto os impactos ambientais associados aos insumos e operações do tratamento.

Dessa forma, a comparação entre os resultados do presente estudo e os de Silva e Duarte (2021) reforça que, embora o tratamento físico-químico convencional seja eficiente na redução da eutrofização, devido à remoção parcial de matéria orgânica e nutrientes, é fundamental considerar os impactos indiretos gerados pelo processo, indicando a necessidade de otimização energética e do uso de insumos para tornar o tratamento mais sustentável.

5.2.3 Efluente Real Bruto Submetido ao Processo de Fotocatálise Heterogênea sob Irradiação Solar

No terceiro cenário, foi avaliado o impacto ambiental do tratamento do efluente real bruto da lavanderia por meio da aplicação de fotocatálise heterogênea, empregando o TiO₂ como catalisador e H₂O₂ como agente oxidante auxiliar, sob irradiação solar. Essa alternativa tecnológica busca promover a degradação avançada de compostos orgânicos presentes no efluente, dispensando a necessidade de infraestruturas convencionais de tratamento. A Tabela 12 apresenta o ICV referente a esse cenário, no qual os dados de entrada contemplam os materiais utilizados e os dados de saída abrangem as emissões lançadas no corpo hídrico.

Tabela 12 - ICV Cenário 3: Efluente Real Bruto Submetido ao Processo de Fotocatálise Heterogênea sob Irradiação Solar para 30 Anos

| Parâmetro | Unidade | Cenário 3 | |
|----------------------------|------------------------------------|----------------------|------------------------|
| | | Pior tratamento (T3) | Melhor tratamento (T4) |
| Materiais utilizados | Kg de TiO ₂ | 876 | 876 |
| | L de H ₂ O ₂ | 1752 | 3504 |
| Energia elétrica consumida | kWh | 0 | 0 |
| Emissões para a água | Kg DQO | 1750053,53 | 1150884,24 |

Fonte: Autora, 2025.

Para a análise de impacto, foram considerados dois tratamentos representativos: T3, correspondente ao desempenho menos eficiente, e T4, referente à condição operacional com melhor desempenho de acordo com o parâmetro analisado de emissões para a água - DQO. A comparação entre esses dois tratamentos permitiu avaliar a influência das variáveis operacionais sobre os impactos ambientais associados ao processo. A partir dos dados da Tabela 12, foram estimados os impactos ambientais correspondentes a este cenário no *software SimaPro*. Os resultados das categorias de impacto para o Cenário 3, calculados segundo os métodos CML-IA e ReCiPe 2016, estão apresentados nas Tabelas 13 e 14, respectivamente.

Tabela 13 - Resultados das Categorias de Impacto para o Cenário 3 - Efluente Real Bruto Submetido ao Processo de Fotocatálise Heterogênea sob Irradiacão Solar para 30 Anos pelo Método CML-IA

| | | | | | | | | | | | | |
|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Total | $6,62^*$ 10^{-3} | $6,62^*$ 10^{-3} | $8,51^*$ 10^{-3} | $8,51^*$ 10^{-3} | $7,09^*$ 10^{-3} | $7,09^*$ 10^{-3} | $4,5^*1$ 0^{-5} | $4,5^*1$ 0^{-5} | $4,94^*$ 10^{-6} | $4,94^*$ 10^{-6} | $4,40^*$ 10^{-2} | $2,89^*$ 10^{-2} |
|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|

T3= Melhor tratamento; T4= Pior tratamento.

Fonte: Autora, 2025.

Tabela 14 - Resultados das Categorias de Impacto para o Cenário 3 - Efluente Real Bruto Submetido ao Processo de Fotocatálise Heterogênea sob Irradiação Solar para 30 Anos pelo Método ReCiPe 2016

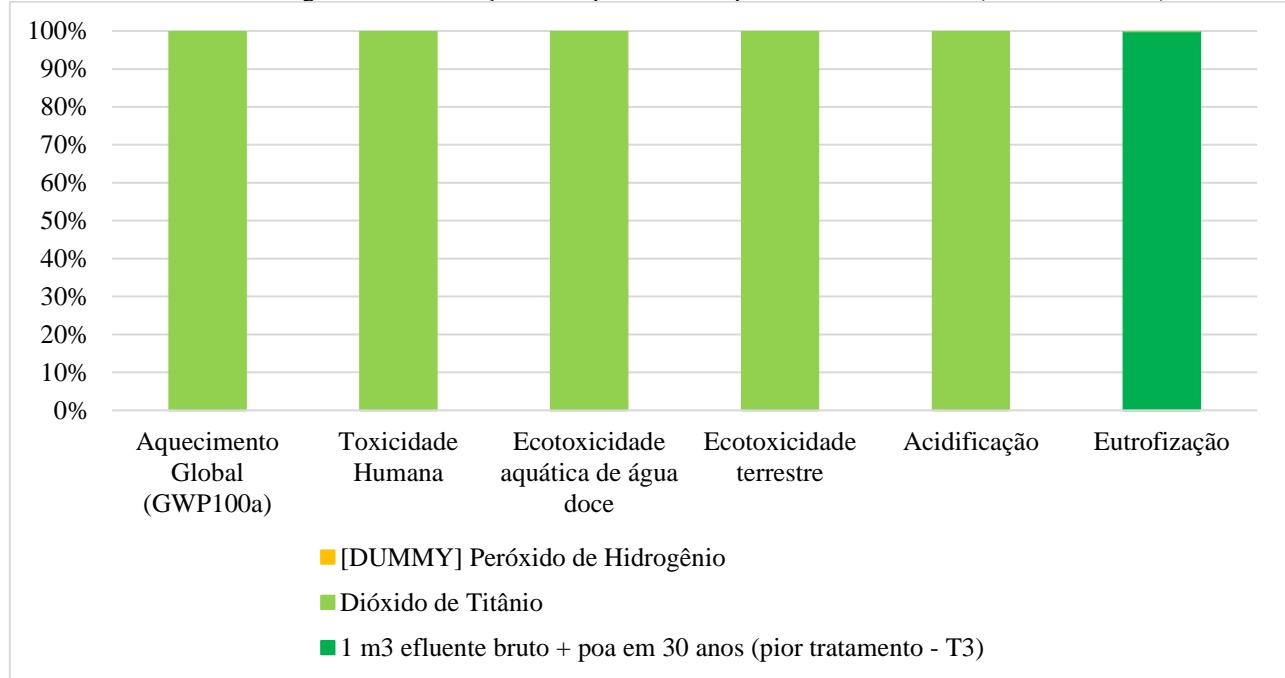
| Categoria de impacto/componentes do tratamento | Aquecimento global | | Acidificação terrestre | | Eutrofização de água doce | | Ecotoxicidade terrestre | | Toxicidade humana cancerígena | |
|--|-----------------------|----------------|------------------------|----------------|---------------------------|----------------|-------------------------|----------------|-------------------------------|----------------|
| | T3 | T4 | T3 | T4 | T3 | T4 | T3 | T4 | T3 | T4 |
| Unidade | kg CO ₂ eq | | Kg SO ₂ eq | | Kg P eq | | Kg 1,4-DCB | | Kg 1,4-DCB | |
| Efluente | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,01698 6 | 0,01117 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| TiO₂ | $7,48*10^{-3}$ | $7,48*10^{-3}$ | $4,03*10^{-5}$ | $4,03*10^{-5}$ | $6,82*10^{-6}$ | $6,82*10^{-6}$ | 0,00722 6 | 0,00722 6 | $3,36*10^{-6}$ | $3,36*10^{-6}$ |
| H₂O₂ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total | $7,48*10^{-3}$ | $7,48*10^{-3}$ | $4,03*10^{-5}$ | $4,03*10^{-5}$ | $1,70*10^{-2}$ | $1,12*10^{-2}$ | $7,23*10^{-3}$ | $7,23*10^{-3}$ | $3,36*10^{-6}$ | $3,36*10^{-6}$ |

T3= Melhor tratamento; T4= Pior tratamento.

Fonte: Autora, 2025.

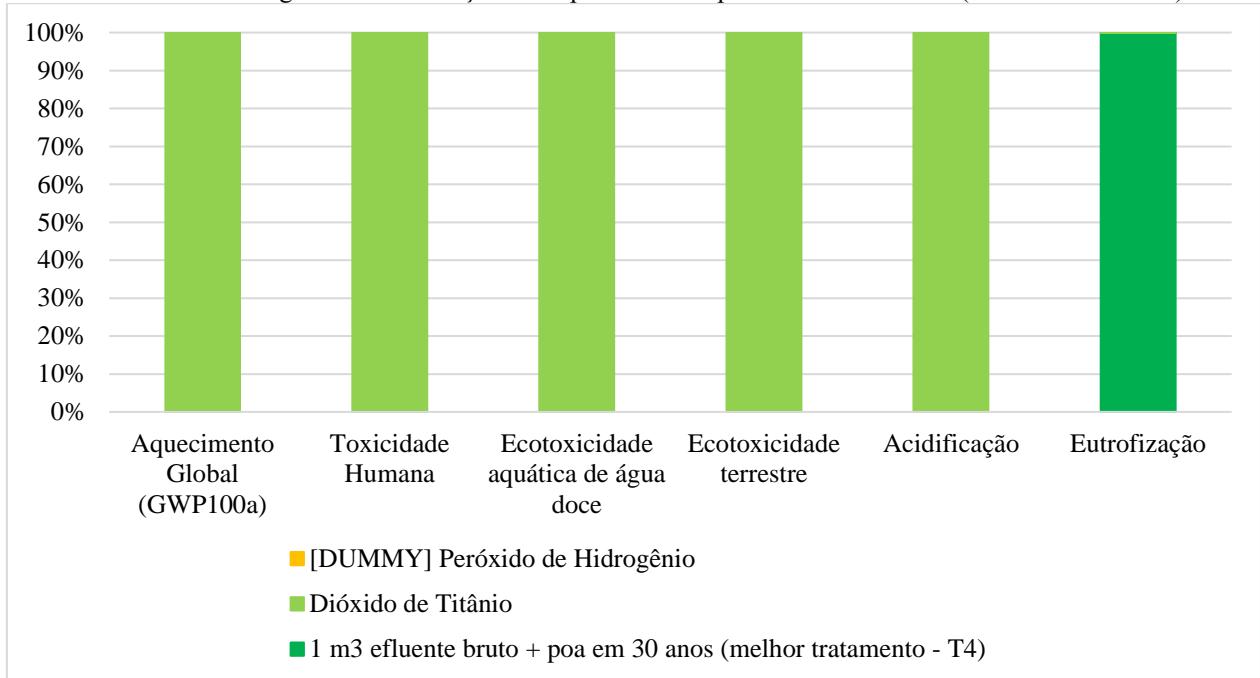
As Figuras 43 e 44 apresentam os resultados das categorias de impacto ambiental do Cenário 3, conforme o método CML-IA, para os tratamentos T3 (menor desempenho) e T4 (maior desempenho), respectivamente.

Figura 43 - Resultados das Categorias de Impacto para o Cenário 3 - Efluente Real Bruto Submetido ao Processo de Fotocatálise Heterogênea sob Irradiação Solar para 30 anos pelo Método CML-IA (Pior Tratamento)



Fonte: Autora, 2025.

Figura 44 - Resultados das Categorias de Impacto para o Cenário 3 - Efluente Real Bruto Submetido ao Processo de Fotocatálise Heterogênea sob Irradiação Solar para 30 Anos pelo Método CML-IA (Melhor Tratamento)



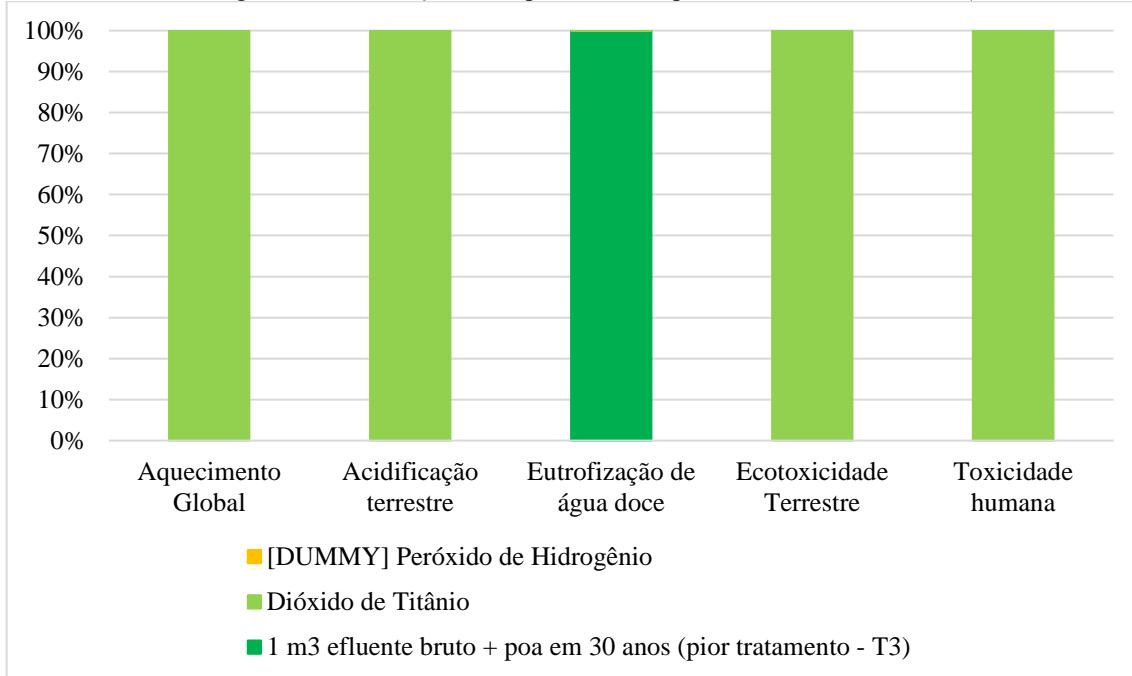
Fonte: Autora, 2025.

De acordo com os resultados da ACV obtidos pelo método CML-IA, os impactos ambientais mais expressivos foram verificados na categoria de eutrofização, com valores de 0,043975 kg PO₄³⁻ eq para 1 m³ de efluente tratado em 30 anos para o tratamento T3 e 0,028927 kg PO₄³⁻ eq para 1 m³ de efluente tratado em 30 anos para o tratamento T4. As demais categorias apresentaram contribuições pouco significativas, com valores próximos de zero, indicando impactos ambientais residuais.

Observou-se que o TiO₂ foi o principal responsável pelos impactos registrados nesse cenário, representando a totalidade das contribuições nas categorias avaliadas. Em contrapartida, o H₂O₂ não apresentou efeitos mensuráveis nos indicadores de impacto considerados, demonstrando impacto ambiental desprezível segundo esta metodologia.

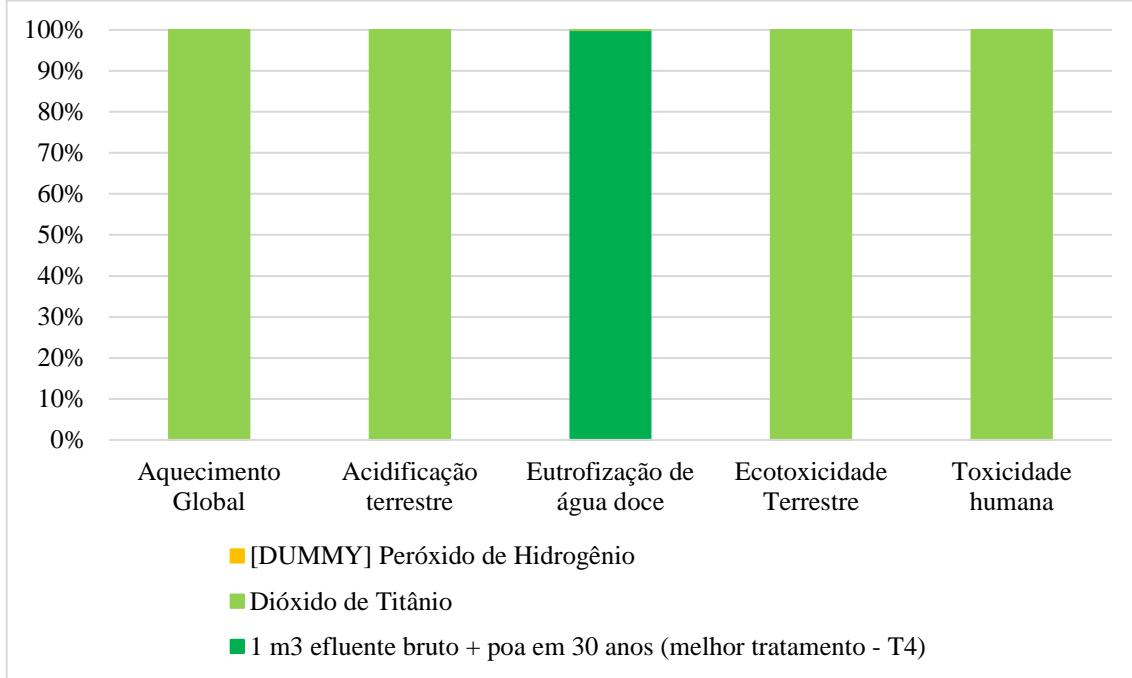
As Figuras 45 e 46 apresentam os resultados das categorias de impacto ambiental do Cenário 3, conforme o método ReCiPe 2016, para os tratamentos T3 (menor desempenho) e T4 (maior desempenho), respectivamente.

Figura 45 - Resultados das Categorias de Impacto para o cenário 3 - Efluente Real Bruto Submetido ao Processo de Fotocatálise Heterogênea sob Irradiação Solar para 30 Anos pelo Método ReCiPe 2016 (Pior Tratamento)



Fonte: Autora, 2025.

Figura 46 - Resultados das Categorias de Impacto para o Cenário 3 - Efluente Real Bruto Submetido ao Processo de Fotocatálise Heterogênea sob Irradiação Solar para 30 Anos pelo Método ReCiPe 2016 (Melhor Tratamento)



Fonte: Autora, 2025.

A avaliação conduzida pelo método ReCiPe 2016 corroborou a tendência observada na análise pelo método CML-IA. Os impactos mais relevantes concentraram-se, novamente, na categoria de eutrofização de água doce, com valores de 0,016993 kg P eq para o tratamento T3 e 0,011177 kg P eq para 1 m³ de efluente tratado em 30 anos para o tratamento T4. Também foi

identificada contribuição na categoria de ecotoxicidade terrestre, exclusivamente atribuída ao uso de TiO₂, com valor constante de 0,007226 kg 1,4-DCB eq para 1 m³ de efluente tratado em 30 anos para ambos os tratamentos. Adicionalmente, observou-se um impacto discreto na categoria de aquecimento global, com valor de 0,007482 kg CO₂ eq para 1 m³ de efluente tratado em 30 anos. O H₂O₂, por sua vez, novamente não apresentou contribuição significativa nas categorias analisadas.

Os resultados obtidos indicam que a aplicação da fotocatálise heterogênea ao efluente bruto configura uma alternativa ambientalmente promissora, sobretudo no tratamento T4, que apresentou os menores impactos em todas as categorias avaliadas. A ausência de insumos com elevada carga ambiental e a utilização de energia solar como fonte renovável reforçam o perfil sustentável dessa tecnologia, evidenciando seu potencial para mitigar de forma eficiente os efeitos adversos associados ao descarte de efluentes industriais, especialmente quando comparada ao cenário sem tratamento.

Os resultados deste estudo estão alinhados com os de Zhang *et al.* (2020), que demonstraram que a fotocatálise heterogênea com TiO₂ sob luz solar é eficaz na remoção de contaminantes, mas apresenta impactos ambientais residuais, sobretudo na eutrofização de água doce, devido à produção e uso do catalisador. Ambos os estudos identificaram o TiO₂ como o principal responsável pelos impactos, enquanto o H₂O₂ teve contribuição desprezível. Embora a tecnologia apresente vantagens ambientais frente a fontes de energia convencionais, os insumos utilizados podem comprometer seu desempenho ambiental, especialmente nas categorias de ecotoxicidade terrestre e eutrofização. Dessa forma, os dados reforçam a viabilidade da fotocatálise solar, especialmente no tratamento T4, destacando a necessidade de estratégias para mitigar os impactos associados ao ciclo de vida do catalisador.

5.2.4 Efluente Real Tratado Complementado com Fotocatálise Heterogênea Irradiada por Luz Solar

Este cenário contempla a combinação do tratamento convencional realizado na ETE da lavanderia com a aplicação complementar da fotocatálise heterogênea sob irradiação solar, utilizando TiO₂ como catalisador e H₂O₂ como agente oxidante. Essa abordagem integrada visa potencializar a eficiência do sistema convencional na remoção de sólidos suspensos e nutrientes, associando-a ao elevado poder oxidativo da fotocatálise para a degradação dos compostos orgânicos remanescentes no efluente previamente tratado. A Tabela 15 apresenta o ICV referente a esse cenário, no qual os dados de entrada contemplam os materiais utilizados e os dados de saída abrangem as emissões lançadas no corpo hídrico.

Tabela 15 - ICV Cenário 4: Efluente Real Tratado pela Lavanderia Complementado com Fotocatálise Heterogênea Irradiada por Luz Solar para 30 Anos

| Parâmetro | Unidade | Cenário 4 | |
|----------------------------|------------------------------------|----------------------|------------------------|
| | | Pior tratamento (T4) | Melhor tratamento (T7) |
| Materiais utilizados | Kg de TiO ₂ | 876 | 876 |
| | L de H ₂ O ₂ | 3504 | 1752 |
| Energia elétrica consumida | kWh | 0 | 0 |
| Emissões para a água | Kg DQO | 2831163,32 | 1769591,66 |

Fonte: Autora, 2025.

Para a análise de impacto, foram considerados dois tratamentos representativos: T4, correspondente ao desempenho menos eficiente, e T7, referente à condição operacional com melhor desempenho de acordo com o parâmetro analisado de emissões para a água - DQO. A comparação entre esses dois tratamentos permitiu avaliar a influência das variáveis operacionais sobre os impactos ambientais associados ao processo. A partir dos dados da Tabela 15, foram estimados os impactos ambientais correspondentes a este cenário no *software SimaPro*. Os resultados das categorias de impacto para o Cenário 4, calculados segundo os métodos CML-IA e ReCiPe 2016, estão apresentados nas Tabelas 16 e 17, respectivamente.

Tabela 16 - Resultados das Categorias de Impacto para o Cenário 4 - Efluente Real Tratado Complementado com Fotocatálise Heterogênea Irradiada por Luz Solar para 30 Anos pelo Método CML-IA

| Categoria de impacto/componentes do tratamento | Aquecimento global | | Toxicidade humana | | Ecotoxicidade aquática em água doce | | Ecotoxicidade terrestre | | Acidificação | | Eutrofização | |
|--|---------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------|-------------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| | T4 | T7 | T4 | T7 | T4 | T7 | T4 | T7 | T4 | T7 | T4 | T7 |
| Unidade | kg CO ₂ eq | | kg 1,4-DCB | | kg P eq | | kg 1,4-DCB | | KGPO ₄ eq | | kg CO ₂ eq | |
| Efluente | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| TiO ₂ | 6,62* 10 ⁻³ | 6,62* 10 ⁻³ | 8,5*1 0 ⁻³ | 8,5*10 -3 | 0,007 085 | 0,006 617 | 0,006 617 | 0,006 617 | 0,008 511 | 0,008 511 | 0,007 085 | 0,0066 17 |
| H ₂ O ₂ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total | 6,62* 10 ⁻³ | 6,62* 10 ⁻³ | 8,5*1 0 ⁻³ | 8,5*10 -3 | 7,09* 10 ⁻³ | 6,62* 10 ⁻³ | 6,62* 10 ⁻³ | 6,62* 10 ⁻³ | 8,51* 10 ⁻³ | 8,51* 10 ⁻³ | 7,09* 10 ⁻³ | 6,62*1 0 ⁻³ |

Fonte: Autora, 2025

Tabela 17 - Resultados das Categorias de Impacto para o Cenário 4 - Efluente Real Tratado Complementado com Fotocatálise Heterogênea irradiada por Luz Solar para 30 Anos pelo Método ReCiPe 2016

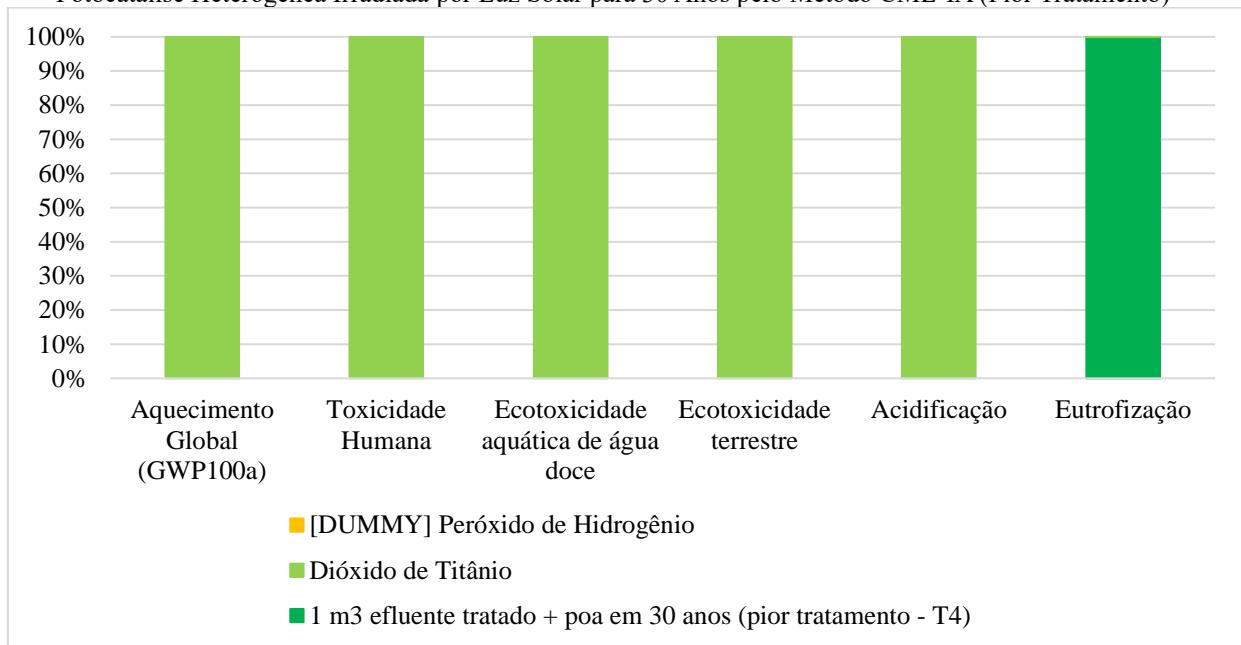
| Categoria de impacto/componentes do tratamento | Aquecimento global | | Acidificação terrestre | | Eutrofização de água doce | | Ecotoxicidade terrestre | | Toxicidade humana cancerígena | |
|--|-----------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-------------------------|--------------|-------------------------------|---------------------------|
| | T4 | T7 | T4 | T7 | T4 | T7 | T4 | T7 | T4 | T7 |
| Unidade | kg CO ₂ eq | | Kg SO ₂ eq | | Kg P eq | | Kg 1,4-DCB | | Kg 1,4-DCB | |
| Efluente | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,0274 79 | 0,0171 76 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| TiO ₂ | 7,48*10 -3 | 7,48*1 0 ⁻³ | 4,03*1 0 ⁻⁵ | 4,03*1 0 ⁻⁵ | 6,82*1 0 ⁻⁶ | 6,82*1 0 ⁻⁶ | 0,0072 26 | 0,0072 26 | 3,36*1 0 ⁻⁶ | 3,36*1 0 ⁻⁶ |

| | | | | | | | | | | |
|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| H₂O₂ | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Total | 7,48*10⁻³ | 7,48*10⁻³ | 4,03*10⁻⁵ | 4,03*10⁻⁵ | 2,75*10⁻² | 1,72*10⁻² | 7,23*10⁻³ | 7,23*10⁻³ | 3,36*10⁻⁶ | 3,36*10⁻⁶ |

Fonte: Autora, 2025

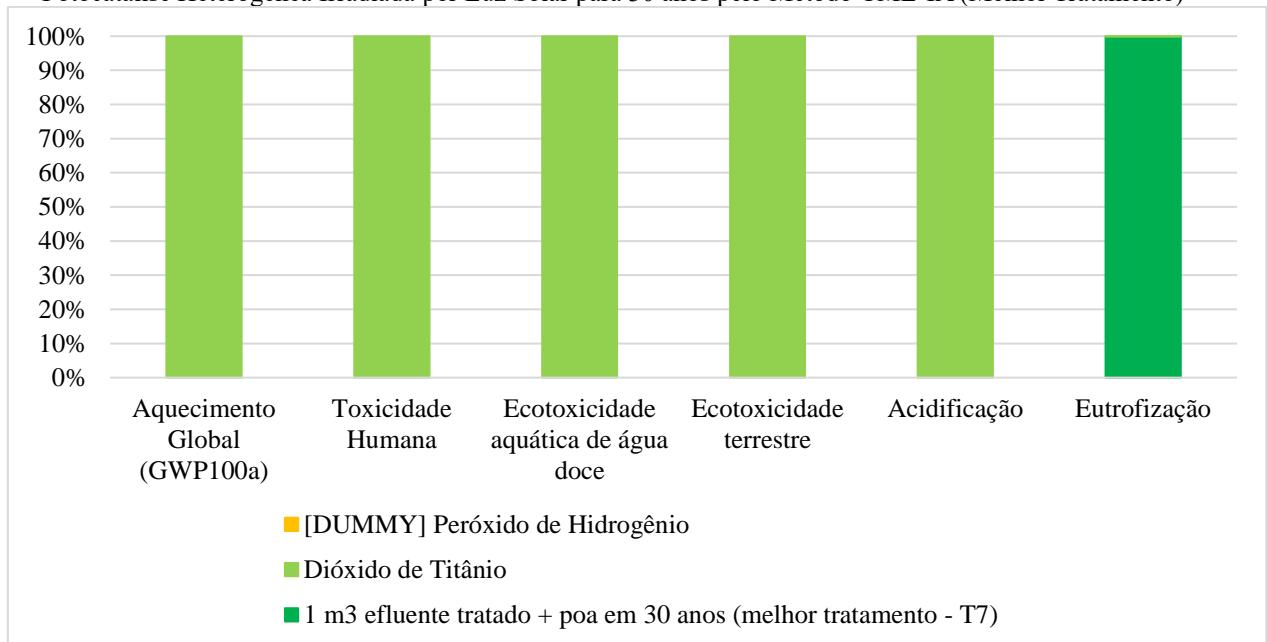
As Figuras 47 e 48 apresentam os resultados das categorias de impacto ambiental para o referido cenário, obtidos pelo método CML-IA, referentes ao tratamento com menor desempenho (T4) e ao tratamento com melhor desempenho (T7), respectivamente.

Figura 47 - Resultados das Categorias de Impacto para o Cenário 4 - Efluente Real Tratado Complementado com Fotocatálise Heterogênea Irradiada por Luz Solar para 30 Anos pelo Método CML-IA (Pior Tratamento)



Fonte: Autora, 2025.

Figura 48 - Resultados das Categorias de Impacto para o cenário 4 - Efluente Real Tratado Complementado com Fotocatálise Heterogênea Irradiada por Luz Solar para 30 anos pelo Método CML-IA (Melhor Tratamento)

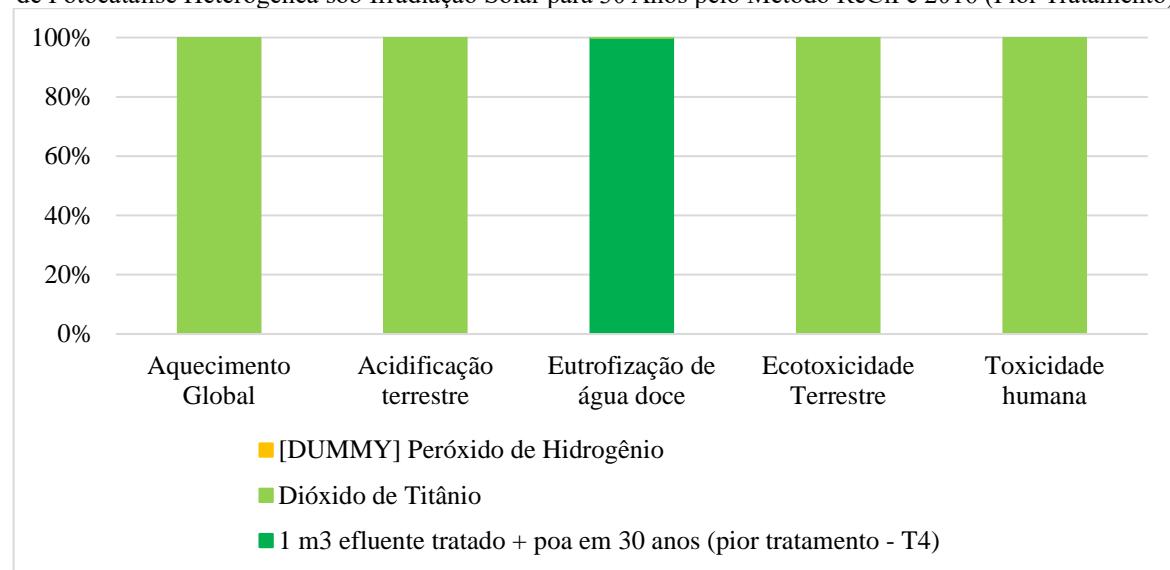


Fonte: Autora, 2025.

Os resultados obtidos pelo método CML-IA indicaram que os impactos ambientais estiveram concentrados predominantemente nas categorias relacionadas ao uso do TiO₂, uma vez que o efluente previamente tratado na ETE e o H₂O₂ não apresentaram contribuições significativas. A categoria de eutrofização apresentou o impacto mais expressivo, com valores de 0,006617 kg PO₄³⁻ eq para ambos os tratamentos, seguida pelas categorias de toxicidade humana (0,008511 kg 1,4-DCB eq) e acidificação (0,007085 kg SO₂ eq).

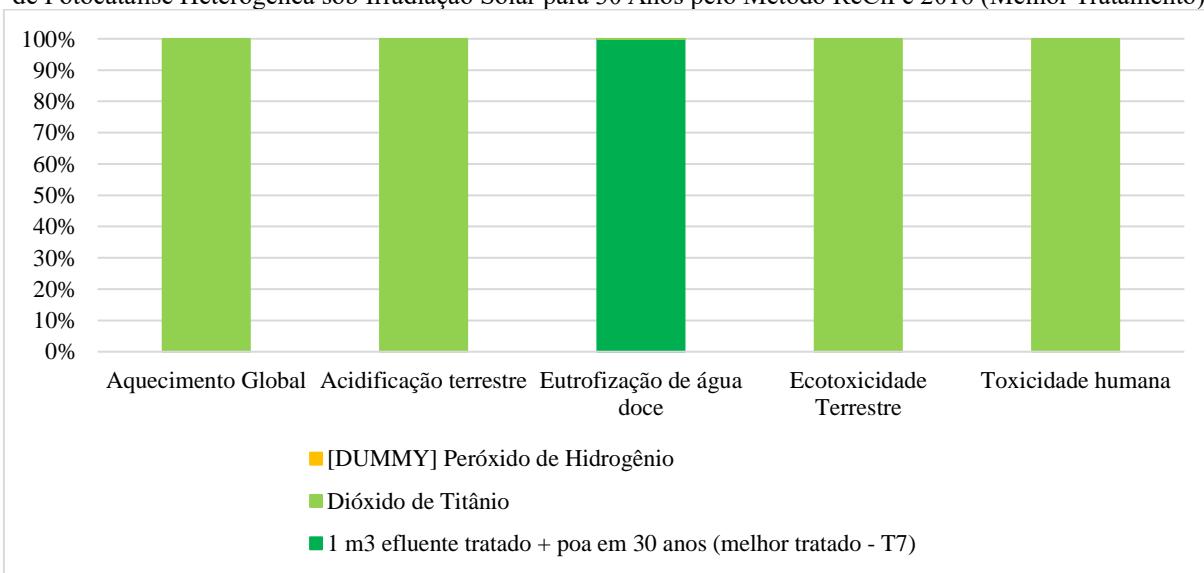
As Figuras 49 e 50 exibem os resultados das categorias de impacto ambiental para o Cenário 4, conforme o método ReCiPe 2016, correspondentes ao tratamento de menor desempenho (T4) e ao de melhor desempenho (T7), respectivamente.

Figura 49 - Resultados das Categorias de Impacto para o cenário 4 - Efluente Real Bruto Submetido ao Processo de Fotocatálise Heterogênea sob Irradiação Solar para 30 Anos pelo Método ReCiPe 2016 (Pior Tratamento)



Fonte: Autora, 2025.

Figura 50 - Resultados das Categorias de Impacto para o Cenário 4 - Efluente Real Bruto Submetido ao Processo de Fotocatálise Heterogênea sob Irradiação Solar para 30 Anos pelo Método ReCiPe 2016 (Melhor Tratamento)



Fonte: Autora, 2025.

Em consonância com os resultados obtidos pelo método CML-IA, a avaliação conduzida por meio da metodologia ReCiPe 2016 também evidenciou a baixa contribuição ambiental do processo fotocatalítico quando aplicado como etapa complementar ao tratamento físico-químico convencional da ETE. A categoria de eutrofização de água doce apresentou os maiores impactos, com valores de 0,027486 kg P eq para o tratamento T4 e 0,017183 kg P eq para o tratamento T7. Impactos adicionais foram verificados nas categorias de ecotoxicidade terrestre (0,007226 kg 1,4-DCB eq) e aquecimento global (0,007482 kg CO₂ eq), atribuídos exclusivamente ao uso do catalisador dióxido de titânio (TiO₂).

Esses resultados indicam que, embora a integração da fotocatálise heterogênea ao processo de tratamento não elimine completamente os impactos ambientais, ela contribui significativamente para a degradação de compostos recalcitrantes, resultando em um incremento ambiental relativamente modesto. Quando comparado aos demais cenários analisados, este arranjo híbrido demonstrou uma das menores cargas de impacto global, configurando-se como uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente promissora para o aprimoramento do tratamento de efluentes industriais, com foco na sustentabilidade.

Os achados deste estudo corroboram os resultados de Zhang *et al.* (2020), que identificaram a fotocatálise heterogênea com TiO₂ ativada por luz solar como apresentando a eutrofização como principal impacto ambiental, decorrente, sobretudo, da produção e do uso do catalisador. De modo semelhante, o H₂O₂ demonstrou impacto ambiental insignificante nas categorias avaliadas. Apesar das vantagens ambientais associadas ao uso da radiação solar em comparação a fontes energéticas convencionais, o ciclo de vida dos insumos utilizados — especialmente o TiO₂ — pode comprometer o desempenho ambiental global da tecnologia, com destaque para as categorias de ecotoxicidade terrestre e eutrofização.

Assim, a comparação entre os resultados corrobora a viabilidade ambiental da aplicação da fotocatálise heterogênea no tratamento de efluentes têxteis, particularmente nas condições operacionais representadas pelo tratamento T4. Ressalta-se, contudo, a importância do desenvolvimento de estratégias de mitigação voltadas à produção, uso e descarte do TiO₂, de forma a garantir a sustentabilidade ambiental do processo ao longo de todo o seu ciclo de vida.

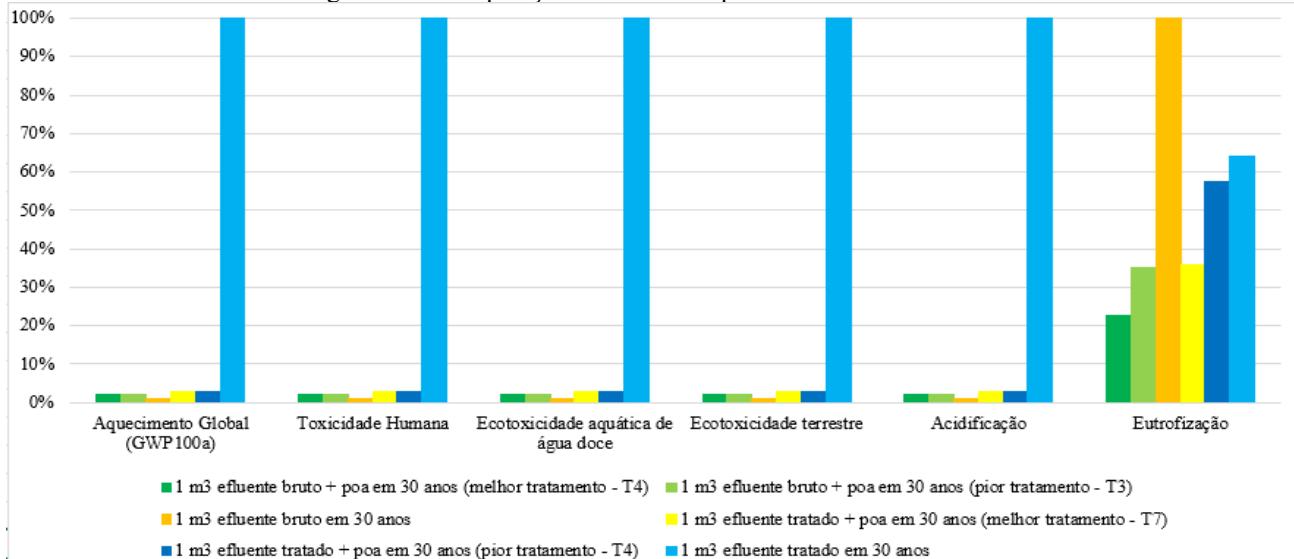
5.2.5 Comparação dos Cenários

Após a análise individual dos quatro cenários propostos, esta seção tem como objetivo realizar uma comparação integrada das diferentes estratégias de tratamento do efluente da lavanderia de beneficiamento de jeans. A comparação fundamenta-se nos resultados obtidos por meio da ACV, aplicando as metodologias CML-IA e ReCiPe 2016, que possibilitam a avaliação

dos impactos ambientais em múltiplas categorias, tais como aquecimento global, toxicidade humana, ecotoxicidade, eutrofização, acidificação, entre outras.

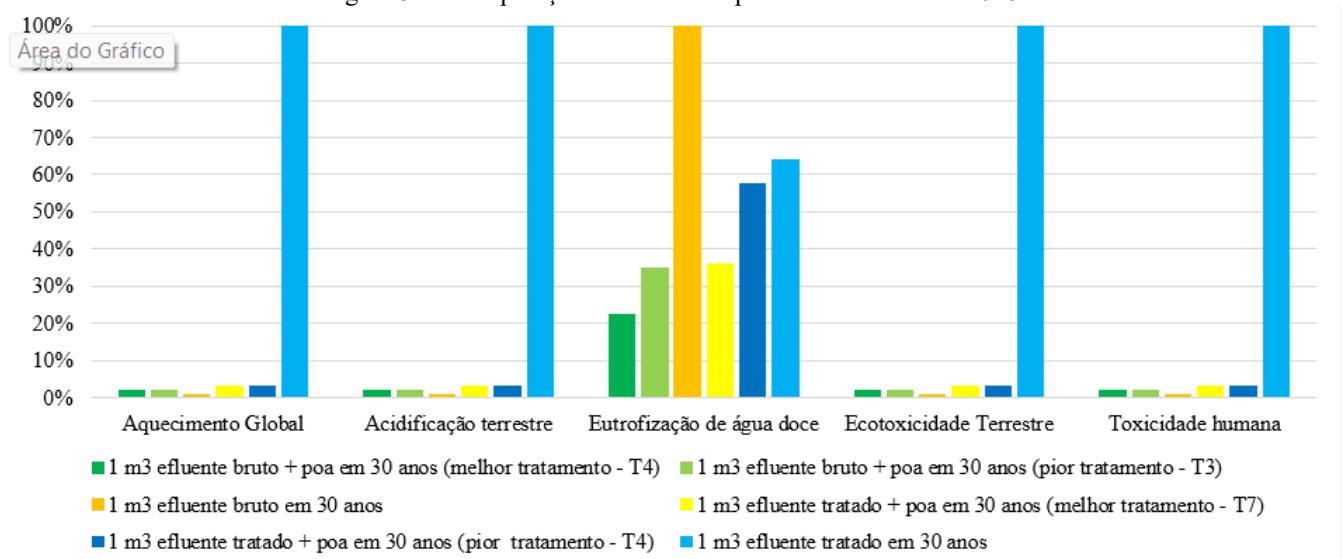
As Figuras 51 e 52 apresentam a comparação dos quatro cenários segundo os métodos CML-IA e ReCiPe 2016, respectivamente.

Figura 51 – Comparação dos Cenários pelo Método CML-IA



Fonte: Autora, 2025.

Figura 52 - Comparação dos Cenários pelo Método ReCiPe 2016



Fonte: Autora, 2025.

Com base na análise comparativa dos impactos ambientais associados aos diferentes cenários de tratamento de efluente industrial oriundo de lavanderias de beneficiamento de jeans, utilizando as metodologias CML-IA e ReCiPe 2016, foi possível identificar a alternativa de tratamento com melhor desempenho ambiental ao longo de um horizonte temporal de 30 anos.

Pelo método CML-IA, que abrange categorias como aquecimento global, toxicidade humana, ecotoxicidade aquática de água doce, ecotoxicidade terrestre, acidificação e

eutrofização, observou-se que o cenário 2 - correspondente ao efluente tratado exclusivamente pela ETE da lavanderia - apresentou os maiores impactos ambientais, como demonstrado na Figura 49. Esse resultado evidencia que, embora o tratamento convencional seja eficaz na remoção de carga orgânica e sólidos suspensos, ele está associado a uma elevada carga ambiental indireta, especialmente devido ao uso intensivo de insumos químicos e energia, cujos efeitos são ampliados na análise de longo prazo.

Em contraste, o cenário 1, que representa o efluente bruto sem tratamento, apresentou impacto reduzido nas categorias globais, mas liderou isoladamente na categoria de eutrofização, conforme Figura 50. Isso reflete o alto potencial poluidor direto desse tipo de efluente, sobretudo no que tange à degradação da qualidade dos corpos hídricos receptores devido ao aporte de nutrientes. O cenário 3, no qual a fotocatálise heterogênea é aplicada diretamente ao efluente bruto, apresentou desempenho intermediário: apesar de melhorar os resultados frente ao cenário sem tratamento, ainda manteve um impacto significativo na categoria de eutrofização. O melhor desempenho foi observado no cenário 4, que associa o tratamento convencional ao processo de fotocatálise heterogênea irradiada por luz solar. Essa combinação resultou nos menores valores de impacto ambiental em todas as categorias, evidenciando a sinergia entre os processos e sua eficácia na mitigação de efeitos ambientais adversos.

A avaliação realizada com base no método ReCiPe 2016 - que contempla categorias como aquecimento global, acidificação terrestre, eutrofização de água doce, ecotoxicidade terrestre e toxicidade humana carcinogênica - corroborou os padrões identificados pelo CML-IA. Novamente, o cenário 2 apresentou as maiores contribuições em todas as categorias, reiterando o elevado custo ambiental do tratamento físico-químico convencional. O cenário 1 confirmou sua criticidade na categoria de eutrofização de água doce, enquanto o cenário 3 apresentou leve melhora, mas ainda com impactos significativos. O cenário 4 manteve-se como a alternativa de menor impacto, com reduções expressivas em todas as categorias, particularmente naquelas de maior relevância ambiental, como eutrofização e toxicidade humana.

Para possibilitar a comparação entre os resultados obtidos na fotocatálise heterogênea sob irradiação solar e os dados provenientes da Análise do Ciclo de Vida (ACV), apresenta-se a Tabela 18.

Tabela 18 – Comparação dos resultados obtidos na fotocatálise heterogênea irradiada por luz solar com os resultados obtidos pela ACV

| Fotocatálise heterogênea irradiada por luz solar | | | | | | |
|---|------------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Parâmetros | Cenário 1 | Cenário 2 | Cenário 3 (T3) | Cenário 3 (T4) | Cenário 4 (T4) | Cenário 4 (T7) |

| Cor (μc) | 1801,67 | 714,00 | $772 \pm 5,66$ | $758 \pm 1,63$ | $59 \pm 0,27$ | $282,67 \pm 0,16$ |
|--|-----------------|-----------------|---|---|---|---|
| Turbidez (NTU) | 118,00 | 24,27 | $28,67 \pm 0,08$ | $38,67 \pm 0,14$ | $5,91 \pm 0,01$ | $14,97 \pm 0,02$ |
| DQO (mg L^{-1}) | 2786,91 | 1775,80 | $998,89 \pm 0$ | $656,90 \pm 0$ | $1615,96 \pm 0,048$ | $1010,04 \pm 0$ |
| ACV: CML-IA | | | | | | |
| Categorias | Cenário 1 | Cenário 2 | Cenário 3 (T3) | Cenário 3 (T4) | Cenário 4 (T4) | Cenário 4 (T7) |
| Aquecimento global (kg CO₂ eq) | 0 | 0,53479057 | $6,62 \times 10^{-3}$ | $6,62 \times 10^{-3}$ | $6,62 \times 10^{-3}$ | $6,62 \times 10^{-3}$ |
| Toxicidade Humana (kg 1,4-DCB) | 0 | 0,82872044 | $8,51 \times 10^{-3}$ | $8,51 \times 10^{-3}$ | $8,5 \times 10^{-3}$ | $8,5 \times 10^{-3}$ |
| Ecotoxicidade aquática em água doce (kg P eq) | 0 | 1,0099608 | $7,09 \times 10^{-3}$ | $7,09 \times 10^{-3}$ | $7,09 \times 10^{-3}$ | $6,62 \times 10^{-3}$ |
| Ecotoxicidade terrestre (kg 1,4-DCB) | 0 | 0,005201876 | $4,5 \times 10^{-5}$ | $4,5 \times 10^{-5}$ | $6,62 \times 10^{-3}$ | $6,62 \times 10^{-3}$ |
| Acidificação (kg SO₂ eq) | 0 | 0,002815361 | $4,94 \times 10^{-6}$ | $4,94 \times 10^{-6}$ | $8,51 \times 10^{-3}$ | $8,51 \times 10^{-3}$ |
| Eutrofização (KGPO₄ eq) | 0,12262 | 0,079217238 | $4,40 \times 10^{-2}$ | $2,89 \times 10^{-2}$ | $7,09 \times 10^{-3}$ | $6,62 \times 10^{-3}$ |
| ACV: ReCiPe 2016 | | | | | | |
| Categorias | Cenário 1 | Cenário 2 | Cenário 3 (T3) | Cenário 3 (T4) | Cenário 4 (T4) | Cenário 4 (T7) |
| Aquecimento global (kg CO₂ eq) | 0 | 0,641638 | $7,48 \times 10^{-3}$ | $7,48 \times 10^{-3}$ | $7,48 \times 10^{-3}$ | $7,48 \times 10^{-3}$ |
| Acidificação terrestre (Kg SO₂ eq) | 0 | 0,002286 | $4,03 \times 10^{-5}$ | $4,03 \times 10^{-5}$ | $4,03 \times 10^{-5}$ | $4,03 \times 10^{-5}$ |
| Eutrofização de água doce (Kg P eq) | 0,047391 | 0,030475 | $1,70 \times 10^{-2}$ | $1,12 \times 10^{-2}$ | $2,75 \times 10^{-2}$ | $1,72 \times 10^{-2}$ |
| Ecotoxicidade terrestre (Kg 1,4-DCB) | 0 | 0,550832 | $7,23 \times 10^{-3}$ | $7,23 \times 10^{-3}$ | $7,23 \times 10^{-3}$ | $7,23 \times 10^{-3}$ |
| Toxicidade humana (Kg 1,4-DCB) | 0 | 0,000261 | $3,36 \times 10^{-6}$ | $3,36 \times 10^{-6}$ | $3,36 \times 10^{-6}$ | $3,36 \times 10^{-6}$ |

Fonte: Autora, 2025.

Os resultados apresentados na Tabela 18 demonstram que a fotocatálise heterogênea irradiada por luz solar é eficaz na redução da cor e da turbidez de efluentes têxteis, tanto quando aplicada diretamente ao efluente bruto (Cenário 3) quanto como etapa complementar ao tratamento convencional da ETE da lavanderia (Cenário 4). Verifica-se que a cor é reduzida de 1801,67 μc (Cenário 1) para até 59 μc no Cenário 4, enquanto a turbidez diminui de 118 NTU para 5,91 NTU, evidenciando o potencial do processo como etapa de polimento final. Em relação à DQO, observa-se uma redução significativa nos cenários com fotocatálise, embora algumas variações apontem para a formação de subprodutos intermediários, o que reforça a importância da otimização do tempo de exposição e da dosagem de reagentes. A ACV indica

que os impactos ambientais adicionais associados à fotocatálise são mínimos frente aos benefícios proporcionados pela remoção de poluentes recalcitrantes. De modo geral, os cenários com fotocatálise apresentam menores potenciais de toxicidade, eutrofização e aquecimento global em comparação ao efluente bruto e ao efluente tratado apenas pela ETE. Assim, a integração entre o tratamento convencional e a fotocatálise (Cenário 4) destaca-se como a alternativa mais eficiente, conciliando desempenho técnico e viabilidade ambiental.

Diante desses resultados, conclui-se que o Cenário 4, que associa o tratamento convencional da ETE à fotocatálise heterogênea solar, apresenta o melhor desempenho ambiental no horizonte de 30 anos. Essa configuração evidencia elevada eficiência na remoção de poluentes persistentes e contribui para a mitigação dos impactos associados ao ciclo de vida dos processos envolvidos. Assim, a adoção de processos oxidativos avançados como etapa complementar ao tratamento físico-químico convencional configura-se como uma solução tecnicamente viável e ambientalmente mais sustentável para a gestão de efluentes industriais têxteis.

6 CONCLUSÕES

A caracterização inicial dos efluentes demonstrou que o tratamento convencional da ETE (Cenário 2) promoveu reduções significativas nos parâmetros de cor, turbidez e DQO, alcançando eficiências médias de 60,37%, 79,44% e 36,28%, respectivamente. Entretanto, os níveis residuais de poluentes permaneceram elevados, indicando a necessidade da adoção de processos complementares, sobretudo quando se busca atender a padrões mais rigorosos de qualidade da água para fins de reuso.

Nesse contexto, a aplicação da fotocatálise heterogênea irradiada por luz solar apresentou desempenho superior ao tratamento convencional isolado, com elevada eficiência na remoção de cor e turbidez. Nos cenários em que foi aplicada ao efluente bruto (Cenário 3) e ao efluente previamente tratado pela ETE (Cenário 4), foram obtidas reduções de cor de até 93,98% e de turbidez de até 77%, além de diminuição da DQO de até 75,01% no efluente bruto. Esses resultados evidenciam o potencial da tecnologia como etapa de polimento, reforçando sua contribuição para a melhoria da qualidade dos efluentes têxteis.

A ACV realizada apontou que os impactos ambientais decorrentes da aplicação da fotocatálise são relativamente baixos quando comparados aos benefícios alcançados na remoção de poluentes recalcitrantes. Os impactos mais relevantes estiveram relacionados à produção e uso do TiO₂, enquanto a contribuição do H₂O₂ foi praticamente desprezível. Entre os cenários avaliados, aquele que integrou o tratamento convencional da ETE com a fotocatálise (Cenário 4) apresentou o melhor desempenho ambiental, em especial nas condições otimizadas (T7), destacando-se pela menor contribuição para eutrofização e ecotoxicidade aquática, além de apresentar baixos valores de aquecimento global e toxicidade humana.

Dentre as condições experimentais, o tratamento T7 — composto por 0,5 g L⁻¹ de TiO₂, 1 mL L⁻¹ de H₂O₂ e tempo de exposição à radiação solar de 4 horas — obteve os melhores resultados, comprovando que a otimização conjunta dos parâmetros operacionais é fundamental para maximizar a eficiência do processo. Ressalta-se, entretanto, que o desempenho do sistema depende diretamente da intensidade da radiação solar disponível, o que pode representar limitações sazonais em sua aplicação prática. Períodos de menor insolação ou condições climáticas adversas tendem a reduzir o rendimento do processo, exigindo estratégias de mitigação, como o uso de sistemas híbridos de irradiação ou o ajuste do tempo de exposição conforme a variabilidade da luminosidade.

Dessa forma, a integração da fotocatálise heterogênea irradiada por luz solar ao tratamento físico-químico convencional mostra-se como uma alternativa tecnicamente viável e ambientalmente promissora para a gestão de efluentes têxteis. Tal abordagem amplia as

possibilidades de reuso da água tratada, ao mesmo tempo em que contribui para a mitigação dos impactos ambientais do setor, alinhando-se às demandas contemporâneas por soluções industriais mais sustentáveis.

Além dos resultados técnicos e ambientais obtidos, este trabalho se destaca pela inovação ao integrar a ACV à avaliação da fotocatálise heterogênea irradiada por luz solar aplicada ao tratamento de efluentes têxteis reais. Ao aliar a eficiência do processo oxidativo com a mensuração de seus impactos ambientais, a pesquisa oferece uma visão mais abrangente e alinhada às exigências de sustentabilidade, superando análises restritas apenas a parâmetros físico-químicos e ampliando a aplicabilidade prática dos resultados para a indústria.

Do ponto de vista pessoal e científico, considero que este estudo representa uma contribuição significativa para o debate sobre tecnologias de tratamento de efluentes em regiões de forte atividade têxtil, como o Agreste pernambucano. Sua originalidade está em demonstrar que é possível articular inovação tecnológica, avaliação ambiental e potencial de reuso da água em um mesmo estudo, apontando caminhos concretos para a redução de impactos e para o uso mais racional dos recursos hídricos. Nesse sentido, esta dissertação não apenas avança o conhecimento acadêmico, mas também dialoga com desafios reais da sociedade, fomentando novas pesquisas e incentivando a aplicação prática de soluções sustentáveis na indústria têxtil.

Para trabalhos futuros, recomenda-se:

- Aprofundar os estudos de cinética química do processo, a fim de estimar parâmetros como energia de ativação, taxas de reação e rotas de degradação dos poluentes;
- Investigar a aplicação de catalisadores alternativos ou modificados, visando reduzir a dependência exclusiva do TiO₂ e os impactos ambientais associados ao seu uso;
- Avaliar técnicas complementares de recuperação do catalisador em suspensão, como filtração por membranas ou centrifugação, com o objetivo de assegurar maior reproduzibilidade e confiabilidade nos resultados analíticos;
- Considerar a aplicação do processo em diferentes épocas do ano, de modo a compreender a influência da variabilidade da radiação solar sobre sua viabilidade prática.

REFERÊNCIAS

- AHMED, S. et al. Are we overestimating the contribution of microplastics from industrial laundry? **Journal of Hazardous Materials**, [S.I.], v. 425, p. 138425, 2025. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/40306245/>. Acesso em: 25 jun. 2025.
- AHMED, A. et al. Assessment of conventional treatment for industrial laundry wastewater: challenges and opportunities for sustainable reuse. **Journal of Environmental Management**, v. 349, p. 119070, 2023.
- ALMEIDA, F. A.; MEDEIROS, L. T.; QUEIROZ, R. P.; SOUZA, M. J. Anaerobic treatment followed by electrochemical oxidation for textile wastewater. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [S.I.], v. 10, n. 4, p. 107–114, 2022.
- ALMEIDA, A. B. B. de. O reúso de águas cinzas na agricultura familiar: benefícios, desafios e perspectivas no semiárido nordestino. [S.I.], 2024. Trabalho acadêmico (Graduação).
- ALVES, S. H.; CASTRO, V. F.; LIMA, N. P. Sustentabilidade em fibras celulósicas: desempenho de tingimento com corantes naturais e quitosana em malha de algodão orgânico e lyocell. [S.I.], 2023. Trabalho acadêmico (Especialização).
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA); WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 24. ed. Washington, DC: APHA Press, 2023.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA; COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO – CETESB. Guia nacional de coleta e preservação de amostras. São Paulo: ANA/CETESB, 2011. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/>. Acesso em: 11 jul. 2025.
- APAC – AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA. Bacias hidrográficas – Rio Capibaribe. Recife: APAC, 2023. Disponível em: <https://www.apac.pe.gov.br/bacias-hidrograficas-rio-capibaribe/162-bacias-hidrograficas-rio-capibaribe/193-bacia-do-rio-capibaribe>. Acesso em: 26 jul. 2023.
- ARAÚJO, B. A. et al. Processos oxidativos avançados aplicados no tratamento de efluentes da produção de membranas: revisão de literatura. **Research, Society and Development**, [S.I.], v. 10, n. 4, e27210414253, 2021.
- ARAÚJO, S. C. et al. Biological treatment of real textile wastewater containing sulphate, salinity, and surfactant through an anaerobic–aerobic system. **Water Science & Technology**, v. 85, n. 10, p. 2882-2894, 2022.
- ARSLAN-ALATON, I.; SOYKAN, C.; BAYSAL, A.; ARSLAN, E. Photocatalytic degradation of textile wastewater using UV/TiO₂. **Environmental Technology**, [S.I.], v. 36, n. 15, p. 1957–1965, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9800: critérios para lançamento de efluentes líquidos industriais no sistema coletor público de esgoto sanitário — procedimento. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9898:1997 – Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 14040:2011 – Gestão ambiental: avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

AZEVEDO, P. G. F.; OLIVEIRA, D. C. S.; CAVALCANTI, L. A. P. Processos físicos e químicos para o tratamento de efluentes: uma revisão integrativa. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, São Paulo, v. 7, n. 17, p. 1667–1678, 2020.

AZIMI, S. C.; SHIRINI, F.; PENDASHTEH, A. R. Advanced oxidation process as a green technology for dyes removal from wastewater: a review. **Iranian Journal of Chemistry and Chemical Engineering**, [S.l.], v. 40, n. 5, p. 1467–1489, 2021.

BAGHERI, O. et al. Preparation of agar functionalized graphene oxide-immobilized copper ferrite aerogel for dye degradation via dark-Fenton oxidative process. **International Journal of Biological Macromolecules**, [S.l.], v. 253, 2023.

BONACINI, B. C. Ciclo de vida de uma camiseta de algodão: análise dos impactos ambientais da indústria têxtil. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

BATISTA, I. R. et al. Processos oxidativos avançados (POAs): uma revisão da importância de fotocatálise na descoloração de corantes têxteis como o verde malaquita. [S.l.], 2022. Trabalho acadêmico.

BEYAZIT, N.; KARACA, H. Performance comparison of UV, UV/H₂O₂, UV/Fe²⁺, H₂O₂/Fe²⁺, UV/H₂O₂/Fe²⁺ processes in the removal of COD and color from textile wastewater. **Journal of Scientific Reports-A**, [S.l.], n. 45, p. 236–252, 31 dez. 2020.

BORGES, K. Case e Diagnóstico: Polo de confecção têxtil do Agreste Pernambucano. **Empreender 360**, 30 out. 2020. Disponível em: <https://empreender360.org.br/case-ediagnostico-polo-de-confeccao-textil-do-agreste-pernambucano/>. Acesso em: 04 jul. 2023.

BOUGDOUR, N. et al. Textile wastewater treatment by peroxydisulfate/Fe (II)/UV: operating cost evaluation and phytotoxicity studies. **Chemistry Africa**, v. 3, p. 153–160, 2020.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. **Diário Oficial da União: seção 1**, Brasília, DF, 18 mar. 2005.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. **Diário Oficial da União: seção 1**, Brasília, DF, 16 maio 2011.

BRITO, J. J. et al. Sapateiros, agricultores e artesãos no Agreste Pernambucano: o trabalho local até o fim do calçado de couro em Toritama-PE (1960–1990). [S.l.], 2025. Manuscrito em preparação.

BURAS, M. P.; DONADO, F. S. Identifying and estimating the location of sources of industrial pollution in the sewage network. **Sensors**, v. 21, n. 10, p. 3426, 2021.

BUTHIYAPPAN, A. et al. Textile wastewater treatment efficiency by Fenton oxidation with integration of membrane separation system. **Chemical Engineering Communications**, v. 206, n. 4, p. 541–557, 2019.

BRAZ, A. K. S. Imobilização de lacase em nanocompósitos magnéticos com potencial aplicação para remoção de corantes em efluente têxtil. [S.l.], 2023. Trabalho acadêmico (Mestrado).

CAMPOLLO, F. A. Poluição: causas, consequências e soluções. São Paulo: Editora Senac, 2023.

CARVALHO, L. de. Impactos ambientais causados pela indústria têxtil no Brasil. [S.l.], 2024. Trabalho acadêmico.

CAVALCANTI, A. M.; SANTOS, G. F. A indústria têxtil no Brasil: uma análise da importância da competitividade frente ao contexto mundial. **Exacta**, v. 20, n. 3, p. 706–726, 2022.

CBHSF. Moda e água: a revolução é urgente e envolve sociedade, empresas e governos. 2019. Disponível em: <https://cbhsaofrancisco.org.br/noticias/novidades/moda-e-agua-a-revolucao-e-urgente-e-envolve-sociedade-empresas-e-governos/>. Acesso em: 15 jul. 2023.

CECI, M. Com incentivos, indústria têxtil se consolida no Nordeste. **Tribuna do Norte**, 2018. Disponível em: <http://www.tribunadonorte.com.br/noticia/com-incentivos-industria-textilse-consolidada-no-nordeste/404095>. Acesso em: 05 jul. 2023.

CHAGAS, Crystofelly Câmara das. *Processos oxidativos avançados: revisão dos POAs aplicados ao tratamento de efluentes*. 2022.

CHAVES, N. O.; CARVALHO, L. C. F.; OLIVEIRA, R. M. P. B. As principais técnicas utilizadas para remoção de corantes das águas residuais da indústria têxtil: uma revisão. **Perspectivas da Ciência e Tecnologia**, v. 14, 2022.

CHRISTIAN, D. et al. Recent techniques of textile industrial wastewater treatment: A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 77, p. 277–285, 2023.

CNRH. Resolução nº 54, de 28 de novembro de 2005. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reuso direto não potável de água, e dá outras providências. Brasília, DF: **Diário Oficial da União**, 2006.

CNRH. Resolução nº 121, de 16 de dezembro de 2010. Estabelece diretrizes e critérios para a prática de reuso direto não potável de água na modalidade agrícola e florestal, definida na Resolução CNRH nº 54, de 28 de novembro de 2005. Brasília, DF: **Diário Oficial da União**, 2011.

COMPANHIA PERNAMBUCANA DE RECURSOS HÍDRICOS (CPRH). Instrução Normativa CPRH nº 003/2022. Estabelece diretrizes para o controle, monitoramento e gestão

de atividades potencialmente poluidoras no estado de Pernambuco. Publicada em 18 de julho de 2022. Disponível em: https://www2.cprh.pe.gov.br/wp-content/uploads/2022/08/SEI_GOVPE-27542815-GOVPE-Instrucao-Normativa.pdf. Acesso em: 19 jul. 2024.

COMPANHIA PERNAMBUCANA DE RECURSOS HÍDRICOS (CPRH). Diagnóstico Ambiental das Lavanderias de Toritama-PE. 2005. Disponível em: <http://www.cprh.pe.gov.br/downloads/toritama.pdf>. Acesso em: 24 jul. 2024.

COSTA, L. T. A.; AGUIAR, A. K. Kinetic study of the effect of methylene blue on the decolorization of other dyes by Fenton processes | Estudo cinético do efeito do azul de metíleno na descoloração de outros corantes por processos Fenton. **Periódico Tche Química**, v. 16, n. 32, p. 885–893, 2019.

COSTA, G. R. et al. Saneamento básico: sua relação com o meio ambiente e a saúde pública. **Paramétrica**, v. 14, n. 1, 2022.

DA ROCHA SANTANA, R. M. et al. Sunlight irradiated pyrite-Fenton system for advanced oxidative treatment of textile dyes mixture. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 233, n. 5, 2022.

DA SILVA, E. E.; DE CASTRO KRAKAUER, P. V.; CODA, R. Empresas startups: análise do ciclo de vida a partir do modelo de Lester, Parnell e Carraher (2003). **Revista Ibero-Americana de Estratégia**, v. 19, n. 1, p. 81–103, 2020.

DA SILVA CRUZ, S. P. et al. As pesquisas sobre ciclos de vida profissional docente: revisão da literatura. **Revista Formação em Movimento**, v. 2, n. 4, p. 439–458, 2020.

DA SILVA FILHO, A. R. A. et al. Análise da importância do reuso da água em lavanderias de beneficiamento de jeans. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 6, p. e40710614402, 2021a.

DA SILVA FILHO, A. R. A. et al. Classificação, caracterização e diagnóstico das lavanderias de beneficiamento de jeans na cidade de Caruaru-PE, no Agreste Pernambucano. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 1, p. e57810112186, 2021b.

DA SILVA MARQUES, M. et al. Análise bibliométrica sobre o uso de água residuária na agricultura. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 3, p. e30311326105, 2022.

DA PAIXÃO, M. M.; DE OLIVEIRA PEREIRA, R.; SANTOS, A. S. P. A regulamentação dos poluentes emergentes no contexto internacional do reúso potável de água. [S.l.], 2023. Trabalho acadêmico.

DANTAS, Anny Beatriz Barbosa. *Princípios da fotocatálise heterogênea: uma revisão*. 2022.

DEOGAONKAR-BARIDE, S. et al. Application of electron beam treatment for degradation of pollutants in real textile wastewater. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 230, 2025.

DE ALMEIDA, J. R. et al. **Sustentabilidade ambiental**. [S.l.]: AYA Editora, 2025.

- DE FÁTIMA, D. Educação ambiental aplicada aos problemas sociais: estudo de caso matadouro municipal na cidade de Santa Cruz do Capibaribe-PE. 2012. Trabalho acadêmico.
- DE MATOS, A. T. Poluição ambiental: impactos no meio físico. Viçosa: Editora UFV, 2020.
- DE SÁ ROCHA, C. M. R. et al. Análise do consumo de água e produtos químicos em indústrias têxteis no Agreste Pernambucano. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 1, p. 581–594, 2021.
- DE OLIVEIRA, M. A. S. et al. Degradation of a textile dye mixture via heterogeneous photo-Fenton process using magnetite as a catalyst. **Environmental Engineering and Management Journal**, v. 22, n. 7, p. 1303–1311, 2023.
- DE SOUZA, Z. S. B. et al. A comparative study of photo-Fenton process assisted by natural sunlight, UV-A, or visible LED light irradiation for degradation of real textile wastewater: factorial designs, kinetics, cost assessment, and phytotoxicity studies. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 19, p. 23912–23928, 2021.
- DE SOUZA SCHORR, A. Tratamento de águas e efluentes. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 2022.
- DO CARMO DIAS, G. et al. Enhanced degradation of Direct Red 80 dye via Fenton-like process mediated by cobalt ferrite: generated superoxide radicals and singlet oxygen. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 31, n. 19, p. 28025–28039, 2024.
- DOMINGUES, F. S. et al. Hydrogen peroxide-assisted photocatalytic degradation of textile wastewater using titanium dioxide and zinc oxide. **Environmental Technology (United Kingdom)**, v. 40, n. 10, p. 1223–1232, 2019.
- DUARTE, A. D.; DA SILVA, G. L. Aplicação da ferramenta de Análise de Ciclo de Vida (ACV) no processo de tratamento de efluentes em uma lavanderia de beneficiamento de jeans. **Exacta**, v. 18, n. 2, p. 355–367, 2020.
- ESTEVES, E.; PEIXOTO, C. O império do jeans em Toritama: uma cidade revestida de fábricas. **Leia Já**, 2021. Disponível em: <http://especiais.leiajá.com/descosturandoacrise/materia2.html>. Acesso em: 09 jul. 2023.
- FABER, T. M.; OLIVEIRA, A. L. Reflexões sobre avanços e tendências na aplicação de projetos para tratamento de efluentes industriais. **Revista Interface Tecnológica**, v. 21, n. 1, p. 812–824, 2024.
- FAVERO, B. M. et al. Evaluation of the efficiency of coagulation/flocculation and Fenton process in reduction of colour, turbidity and COD of a textile effluent. **Environmental Technology (United Kingdom)**, v. 41, n. 12, p. 1580–1589, 2020.
- FERREIRA DE JESUS, M. F. Processos oxidativos avançados: uma breve revisão. [S.l.], 2021. Trabalho acadêmico.

FERREIRA, H. F. Avaliação da sustentabilidade energética e ambiental e seus impactos no desenvolvimento sustentável numa empresa do setor têxtil. 2024. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Minho, Braga, Portugal.

FEUZER-MATOS, A. J. et al. Treatment of wastewater containing new and non-biodegradable textile dyes: efficacy of combined advanced oxidation and adsorption processes. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 233, n. 7, 2022.

FONTANA, M. et al. Efficiency of heterogeneous photocatalysis with titanium dioxide in the alteration of physicochemical and toxicological parameters of textile effluent. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 231, n. 1, p. 24, 2020.

FONTANA, L. C. et al. Characterization and treatment of wastewater from industrial laundries using coagulation–flocculation: environmental risk assessment of the treated effluent. **Science of the Total Environment**, v. 798, p. 149259, 2021

FUNDAÇÃO ELLEN MACARTHUR. 2022. Disponível em: <https://ellenmacarthurfoundation.org/>. Acesso em: 15 jun. 2023.

GAR ALALM, M.; TAWFIK, A.; OOKAWARA, S. Solar photocatalytic degradation of textile wastewater using TiO₂-coated nonwoven fabric: process optimization and performance evaluation. **Environmental Technology & Innovation**, v. 21, p. 101321, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101321>.

GARCIA, J. C. Degradação fotocatalítica artificial e solar de efluentes têxteis por processos oxidativos avançados utilizando TiO₂. 2006. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

GARCIA, V. S. G.; ROSA, J. M.; BORRELY, S. I. Toxicity and color reduction of a textile effluent containing reactive red 239 dye by electron beam irradiation. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 172, 2020.

GAZOLA, L. Análise das legislações estaduais brasileiras sob ensaios ecotoxicológicos como ferramenta no controle de lançamento de efluentes industriais. 2020. Dissertação (Mestrado em Perícias Criminais Ambientais) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

GUIDOLIN, T. O. et al. Fenton-like process evaluation of textile effluent discolouration using pyrite tailings: influence of dissolved iron. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 11, n. 6, p. 111081, 2023.

GOMES, L. R. et al. Fenton oxidation for textile wastewater treatment. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 9, p. 10038–10047, 2020.

HANELA, S. D. et al. Removal of Reactive Black 5 from textile wastewater by ozone and photo-Fenton: influence of industrial matrix effects. [S.l.], 2020. Trabalho acadêmico.

HOSSAIN, M. D. et al. Biological treatment of textile wastewater by total aerobic mixed bacteria and comparison with chemical Fenton process. **Pollution**, v. 8, n. 4, p. 1418–1433, 2022.

HU, E.; SHANG, S.; CHIU, K. Removal of reactive dyes in textile effluents by catalytic ozonation pursuing on-site effluent recycling. **Molecules**, v. 24, n. 15, p. 2755, 2019.

HUTAGALUNG, S. S. et al. Combination of ozone-based advanced oxidation process and nanobubbles generation toward textile wastewater recovery. **Frontiers in Environmental Science**, v. 11, 2023.

IBICT – INSTITUTO BRASILEIRO DE INFORMAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA. Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida: histórico, estrutura e avanços. Brasília: IBICT, 2023. Disponível em: <https://acv.ibict.br>. Acesso em: 23 jun. 2025.

IBERDROLA. A poluição da água: como não colocar em perigo a nossa fonte de vida. *Poluição da água*. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/poluicao-da-agua>. Acesso em: 22 ago. 2023.

JADHAV, A. P. et al. Synchrotron X-ray assisted degradation of industrial wastewater by advanced oxidation process. **Radiation Physics and Chemistry**, v. 197, 2022.

JUSTINO, N. M. et al. Seasonal degradation of textile effluents through the solar photo-Fenton process mediated by ferrioxalate: discoloration and behavior of solids. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 24, p. 33–43, 2019.

JÚNIOR, W. A. G. P.; DE AZEVEDO, F. R. P. Corantes sintéticos e seus impactos ambientais: desafios, legislação e inovações tecnológicas sustentáveis. **Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação**, v. 10, n. 12, p. 3972–3991, 2024.

KANJAL, M. I. et al. A study of treatment of reactive red 45 dye by advanced oxidation processes and toxicity evaluation using bioassays. **Sustainability (Switzerland)**, v. 15, n. 9, 2023.

KIM, J. et al. Solar photocatalytic Fenton process for textile wastewater treatment. **Environmental Technology**, v. 44, n. 2, p. 123–134, 2023.

KIRAN, S. et al. Photocatalysis using titanium dioxide for treatment of textile wastewater containing disperse dyes. **Chiang Mai Journal of Science**, v. 45, p. 2730–2739, 2018.

KLANOVICZ, N. et al. Advanced oxidation processes applied for color removal of textile effluent using a home-made peroxidase from rice bran. **Bioprocess and Biosystems Engineering**, v. 43, n. 2, p. 261–272, 2020.

LEBRON, Y. A. R. et al. Integrated photo-Fenton and membrane-based techniques for textile effluent reclamation. **Separation and Purification Technology**, v. 272, 2021.

LIMA SANTOS KLIENCHEN DALARI, B. et al. Application of heterogeneous photo-Fenton process using chitosan beads for textile wastewater treatment. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 8, n. 4, 2020.

LIMA, I. L. P. Inovação nas rotas tecnológicas para implantação da ecologia industrial e economia circular no setor têxtil do Agreste de Pernambuco: estudo de preceitos para a

sustentabilidade setorial. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2022.

LINO, L. F. M. Aplicação de processos oxidativos avançados no tratamento de efluentes da indústria têxtil e degradação de corantes. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental) – Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2021.

LIU, Y.; MAULIDANY, N.; ZENG, P.; HEO, S. Decolourization of azo, anthraquinone and triphenylmethane dyes using aerobic granules: acclimatization and long-term stability. **Chemosphere**, v. 263, p. 128312, 2021.

LUCENA, C. Y. S. et al. O reuso de águas residuais como meio de convivência com a seca no semiárido do Nordeste Brasileiro. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 4, p. 1–17, 2018.

LOPES, Taís Rodrigues. *Processos oxidativos avançados no tratamento de efluentes contendo fenol e formol*. 50 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Biossistemas) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo, Campus Avaré, 2023.

MACÊDO, J. S. Avaliação do uso de água e geração de efluentes no processo de beneficiamento de jeans: estudo de caso lavanderias industriais de Toritama/PE. 2022. Trabalho acadêmico.

MAHMOUD, M. E.; ABD EL-HALEEM, D. A.; EL-MAGHRABY, M. M. Solar light-driven TiO₂/H₂O₂ photocatalytic degradation of textile dye wastewater: optimization and kinetic study. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 29, n. 10, p. 14752–14764, 2022.

MARQUES, C. F.; CONCEIÇÃO, V. M. da. Alternativas tecnológicas de tratamento de efluentes têxteis: uma revisão bibliométrica. **Revista Internacional de Ciências**, v. 12, n. 3, p. 194–212, 2022.

MENDES, Andrielle Karine Ribeiro. *Avaliação de processos oxidativos avançados para a degradação de metilparabeno na forma pura, monoclorada e diclorada*. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

MCARTHUR, J. W.; RASMUSSEN, K. Change of pace: accelerations and advances during the Millennium Development Goal era. **World Development**, v. 105, p. 132–143, 2018.

MENEZES, P. K. de et al. Educação ambiental. [S.l.], 2021. Trabalho acadêmico.

MIRZA, N. R. et al. A review of the textile wastewater treatment technologies with special focus on advanced oxidation processes (AOPs), membrane separation and integrated AOP-membrane processes. **Desalination and Water Treatment**, v. 206, p. 83–107, 2020.

MOHAMMADHOSSEINI, S. et al. UV and visible light induced photodegradation of Reactive Red 198 dye and textile factory wastewater on Fe₂O₃/Bentonite/TiO₂ nanocomposite. **Minerals**, v. 12, n. 11, p. 1417, 2022.

MORAES, J. F. R. de. Integração de tecnologias para a descoloração de efluentes têxteis por fotocatálise: uma análise teórica. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

MORAIS, P. A. Poluição hídrica no contexto brasileiro: uma análise de produções da revista Química Nova na Escola. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Licenciatura em Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2022.

MOTA, S. Reuso de águas no Brasil: situação atual e perspectivas. **Revista AIDIS de Ingeniería y Ciencias Ambientales. Investigación, desarrollo y práctica**, v. 15, n. 2, p. 666–684, 2022.

MOURA, P. G. et al. Água de reúso: uma alternativa sustentável para o Brasil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 25, p. 791–808, 2020.

NARIMATSU, B. M. G. et al. Corantes naturais como alternativa sustentável na indústria têxtil. *Revista Valore*, v. 5, p. 5030, 2020.

NETO, J. G. P.; OLIVEIRA, H. S. de; SILVEIRA, K. C. da. Desenvolvimento local-regional no Nordeste brasileiro: um estudo situacional do arranjo produtivo local de caprinovinocultura de Pernambuco. **Revista Contexto Geográfico**, v. 3, n. 6, p. 36–46, 2018.

NÓBREGA, M. C. P. Características das águas de poços rasos nas margens do Rio Capibaribe na planície de Recife. 2023. Dissertação (Mestrado em Gestão de Recursos Ambientais) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2023.

OLIVEIRA, D. C. S.; AZEVEDO, P. G. F.; CAVALCANTI, L. A. P. Processos biológicos para o tratamento de efluentes: uma revisão integrativa. **Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade**, v. 8, n. 18, p. 397–415, 2021.

PANTOLFI, V. S. V. et al. Revisão sistemática das características empregadas para qualificar um Arranjo Produtivo Local (APL). **Revista Gestão & Conexões**, v. 12, n. 1, p. 92–105, 2023.

PARLAMENTO EUROPEU. O impacto da produção e dos resíduos têxteis no ambiente (infografia). 2023. Disponível em:
<https://www.europarl.europa.eu/news/pt/headlines/society/20201208STO93327/o-impacto-da-producao-e-dos-residuos-texteis-no-ambiente>. Acesso em: 07 ago. 2023.

PEREIRA, Rafael Gallo. *Ensaio de fitotoxicidade do corante alimentar mix blue jeans frente a Lactuca sativa L. e Allium cepa L.* 2022. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

PAUL, D.; CHAKRABORTY, S. Sustainable wet processing of textiles: a review. **Journal of Cleaner Production**, v. 298, p. 126638, 2021. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126638>.

PIPIL, H. et al. Comparison of TiO₂ catalysis and Fenton's treatment for rapid degradation of Remazol Red Dye in textile industry effluent. **Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali**, v. 33, n. 1, p. 105–114, 2022.

PODCAMENI, M. G.; LUSTOSA, M. C. J.; MARCELINO, I. S. Sustentabilidade e território: um diálogo através dos arranjos e sistemas produtivo e inovativos locais. Rio de Janeiro: RedeSist, 2020.

PORTO, C. G. D. Processos oxidativos avançados (POAs) no tratamento de efluentes têxteis aplicáveis ao arranjo produtivo local de confecções do Agreste Pernambucano (APLCAPE): uma breve revisão. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso.

PORTO, C. G. D. et al. Processos oxidativos avançados no tratamento de efluentes têxteis aplicáveis ao arranjo produtivo local de confecções do Agreste Pernambucano. **Research, Society and Development**, v. 13, n. 1, p. e11013144840, 2024.

POURGHOLI, M. et al. Removal of dye and COD from textile wastewater using AOP (UV/O₃, UV/H₂O₂, O₃/H₂O₂ and UV/H₂O₂/O₃). **Journal of Environmental Health and Sustainable Development**, v. 3, n. 4, p. 630–636, 2018.

RAMOS, M. D. N. et al. Análise crítica das características de efluentes industriais do setor têxtil no Brasil. **Revista Virtual de Química**, v. 12, p. 913–929, 2020a.

RAMOS, J. L. et al. Advanced oxidative processes in the treatment of wastewater: mechanistic possibilities in pollutant degradation. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 14, n. 4, p. 372–388, 2020b.

RIBEIRO, V.A.S ; FERRARI, A.M.; TAVARES, C.R.G. Fotocatálise aplicada ao tratamento de efluentes de lavanderia de jeans: comparação entre TiO₂ e ZnO na eficiência de remoção de cor. **Brazilian Journal of Business**, v. 2, n. 3, p. 62-72, 2020. DOI: 10.34140/bjv2n3-062.

RIBEIRO, M. S.; OLIVEIRA, R. A.; FERREIRA, L. F. R. Avaliação de coagulantes alternativos no tratamento de efluentes têxteis de lavanderias industriais. **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, n. 3, p. 535–545, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522022196834>.

ROCHA, R. A. et al. Caracterização do tratamento de efluente da indústria têxtil, Teresina-PI. [S.I.], 2020. Trabalho acadêmico.

ROCHA, S. A. Água, elemento representativo da ecologia integral. **Ecologia Integral**, p. 85, 2021.

ROCHA, C. M. R. S. et al. Análise do consumo de água e produtos químicos em indústrias têxteis no Agreste Pernambucano. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 12, n. 1, p. 581–594, 2021.

RODRIGUES, T. O. Introdução à metodologia de Avaliação do Ciclo de Vida — ACV. Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento para Manutenção e Validação do Sistema de Inventários do Ciclo de Vida do Brasil, 2021.

RODRIGUES, Y. P. Análise das ferramentas de gestão ambiental na indústria têxtil: uma revisão bibliométrica. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso.

RODRIGUES, Matheus da Silva. Técnica de coagulação/flocação combinada com processo de separação por membrana, aplicada ao tratamento de efluente de lavanderia de jeans. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

RODRÍGUEZ, J. M. et al. Ozone treatment for the removal of textile dyes from wastewater. **Journal of Hazardous Materials**, v. 342, p. 295–301, 2018.

ROSA, J. M. et al. Application of continuous H₂O₂/UV advanced oxidative process as an option to reduce the consumption of inputs, costs and environmental impacts of textile effluents. **Journal of Cleaner Production**, v. 246, 2020.

RYTCHYSKYI, J. M. F.; ALMEIDA, C. A. S. M. de; CEDRIM, M. B. M. Reuso da água: uma revisão do ponto de vista legal. **Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 470–485, 2021.

SALGADO, A. T. de S. Avaliação de processos de tratamento para remoção de corante índigo de efluentes industriais têxteis. 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química Industrial) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024.

SANTANA, R. M. R. et al. Degradation of textile dyes employing advanced oxidative processes: kinetic, equilibrium modeling, and toxicity study of seeds and bacteria. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 230, n. 6, p. 1–13, 2019.

SANTANA, R. M. D. R.; NAPOLEÃO, D. C.; DUARTE, M. M. M. B. Treatment of textile matrices using Fenton processes: influence of operational parameters on degradation kinetics, ecotoxicity evaluation and application in real wastewater. **Journal of Environmental Science and Health - Part A Toxic/Hazardous Substances and Environmental Engineering**, v. 56, n. 10, p. 1165–1178, 2021.

SANTANA, I. L. da S. Degradação do corante têxtil preto direto 22 empregando processos oxidativos avançados eletroquímicos e homogêneos. 2022. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2022.

SANTANA, R. M. D. R. et al. Efficient microbial cellulose/Fe₃O₄ nanocomposite for photocatalytic degradation by advanced oxidation process of textile dyes. **Chemosphere**, v. 326, 2023.

SANTOS, M. A. et al. Coagulation-flocculation treatment of textile wastewater using FeCl₃. **Journal of Environmental Management**, v. 169, p. 274–281, 2016.

SANTOS, H. M. N. et al. Sistema de lagoas de estabilização e lagoa aerada para redução da carga orgânica e nitrogênio de percolado de aterro sanitário. [S.I.], 2022. Trabalho acadêmico.

SANTOS, L. M. dos et al. Reúso de águas residuais na irrigação: mapeamento sistemático na literatura. **Meio Ambiente (Brasil)**, v. 5, n. 3, 2023.

SANTOS, R. B. dos. Poluição aquática: impactos e soluções para os animais marinhos. [S.I.], 2023. Trabalho acadêmico.

SCHMIDT, M. B. et al. Desenvolvimento de membrana catalítica polimérica para aplicação no processo de destilação por membranas para recuperação de águas residuais têxteis. [S.I.], 2023. Trabalho acadêmico.

SEBRAE. Estudo econômico das indústrias de confecções de Toritama/PE. Toritama, PE: SEBRAE, 2019.

SEMALTI, P. et al. Visible-light driven noble metal (Au, Ag) permeated multicomponent Cu₂ZnSnS₄ nanocrystals: a potential low-cost photocatalyst for textile effluents and heavy metal removal. **Environmental Research**, v. 217, p. 114875, 2023.

SHAJEELAMMAL, J. et al. Removal of methylene blue and azo reactive dyes from aqueous solution and textile effluent via modified pulsed low-frequency ultrasound cavitation process. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 11, p. 29258–29280, 2023.

SILVA, V. F. Tratamento fotocatalítico de efluente têxtil empregando TiO₂ em pó e suportado. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2011.

SILVA, R. F. Remoção de corante de efluente têxtil por processo oxidativo avançado. 2015. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.

SILVA, B. L.; XAVIER, M. G. P. Inovação e tecnologia em lavanderias de jeans do polo têxtil do Agreste Pernambucano e a implementação das atividades de reuso de água. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 6, p. 41458–41476, 2020.

SILVA, B. L. Inovação e tecnologia na indústria de beneficiamento de denim do Agreste de Pernambuco: reuso de água para vantagem competitiva em lavanderias de jeans. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso.

SILVA, G. L. da; DUARTE, A. D. Aplicação da ferramenta de Análise de Ciclo de Vida (ACV) no processo de tratamento de efluentes em uma lavanderia de beneficiamento de jeans. **Exacta**, v. 18, n. 2, p. 355–367, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5585/ExactaEP.v18n2.8370>.

SILVA, R. F. et al. Life cycle analysis of dye degradation using advanced oxidative processes. **Chemical Engineering Transactions**, v. 86, p. 589–594, 2021.

SILVA, M. B. et al. Tratamento biológico com lodo granular aeróbio de efluente de laticínio. [S.I.], 2021b. Trabalho acadêmico.

SILVA, R. G.; MARTINELLI, D. P. Arranjos Produtivos Locais (APL) e fatores formadores das dimensões do desenvolvimento local. **Organizações & Sociedade**, v. 28, p. 9–33, 2021.

SILVA, C. P.; GAVAZZA, S.; ARAÚJO, S. P. Tratamento anaeróbio de efluente têxtil: toxicidade a organismos metanogênicos. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, p. 1229–1237, 2022.

SILVA, M. F. V. O. B. Abordagem para a Sustentabilidade 4.0: um estudo na área industrial têxtil. [S.I.], 2023. Trabalho acadêmico.

SILVA, Amanda Tayara Ribeiro da et al. Avaliação do processo de remoção de corante têxtil utilizando cogumelo *Pleurotus ostreatus* e o composto residual de sua produção. 2023.

SILVA, C. G. et al. Bioremediation of textile effluent using *Trametes versicolor*. **Bioresouce Technology**, v. 346, p. 126–133, 2024.

SOUZA. Capibaribe: o 7º rio mais poluído do Brasil. 2017. Disponível em: <https://ferdinandodesousa.com/2017/09/15/capibaribe-o-7-rio-mais-poluido-brasil/>. Acesso em: 26 jul. 2023.

SOUZA, R. M. et al. Biological treatment of textile wastewater using activated sludge. **Waste Management**, v. 58, p. 147–155, 2017.

SOUZA, H. H. J. de. Metodologia PRISMA. [S.l.], 2023. Trabalho acadêmico.

SOUZA NETO, L. M. de. Micro e pequenas empresas do setor de vestuário nos estados de Santa Catarina, São Paulo e Minas Gerais ante as políticas industriais dos governos Lula e Dilma. [S.l.], 2024. Trabalho acadêmico.

TASNEEM, A. et al. Textile wastewater treatment by combination of chemical and phytoremediation processes. **Pollution**, v. 7, n. 1, p. 43–54, 2021.

TASSI, F. G. Metodologias para tratamento de efluentes têxteis: uma revisão. [S.l.], 2022. Trabalho acadêmico.

TAVARES, M. G. et al. Efficiency and toxicity: comparison between the Fenton and electrochemical processes. **Water Science and Technology**, v. 74, n. 5, p. 1143–1154, 2016.

TAVARES, M. G. R. et al. Removal of reactive dyes from aqueous solution by Fenton reaction: kinetic study and phytotoxicity tests. **Water, Air, & Soil Pollution**, v. 231, p. 1–15, 2020.

TAVARES, N. B. Greenwashing na indústria da moda mundial e suas consequências. **Organização Sistêmica**, v. 2, n. 1, p. 77–106, 2022.

TEIXEIRA, L. M. et al. Evaluation of the acute phytotoxicity of phototreated textile effluent using cucumber (*Cucumis sativus*) and radish seeds (*Raphanus sativus*). **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 59, 2024.

THASILU, K.; KARTHIKEYAN, J. Chemical oxidation for degradation of textile dyes using hydrogen peroxide. **International Journal of Control Theory and Applications**, v. 9, n. 19, p. 9055–9062, 2016.

TORRES, N. H. et al. Real textile effluents treatment using coagulation/flocculation followed by electrochemical oxidation process and ecotoxicological assessment. **Chemosphere**, v. 236, p. 124309, 2019.

URBINA-SUAREZ, N. A. et al. Bicarbonate-hydrogen peroxide system for treating dyeing wastewater: degradation of organic pollutants and color removal. **Toxics**, v. 11, n. 4, 2023.

VASCONCELOS, M. W. et al. Textile effluent toxicity trend: a scientometric review. **Journal of Cleaner Production**, p. 132756, 2022.

VELUSAMY, S. et al. A review on heavy metal ions and containing dyes removal through graphene oxide-based adsorption strategies for textile wastewater treatment. **The Chemical Record**, v. 21, p. 1570–1610, 2021.

VIEIRA, L. J. C.; SILVA, I. C. O. da. A produção científica sobre os estudos bibliométricos no Brasil: uma análise a partir da Brapci. **Em Questão**, v. 29, p. e128160, 2023.

WANG, L. et al. Membrane bioreactor (MBR) for the treatment of textile wastewater. **Bioresource Technology**, v. 285, p. 178–184, 2019.

WANG, J.; JIANG, X.; GAO, B. et al. Reviewing textile wastewater produced by industries: characteristics, environmental impacts, and treatment strategies. **Water Science & Technology**, v. 85, n. 7, p. 2076-2093, 2022.

WERJEN. Coagulação e floculação. Disponível em: <https://werjen.com.br/coagulacao-e-floculacao/>. Acesso em: 16 set. 2023.

XAVIER, T. M. C. Polo de confecções do agreste de Pernambuco: formação de aglomerado produtivo e suas dinâmicas espaciais. **Caminhos de Geografia**, v. 21, n. 73, p. 429–444, 2020.

ZAHARIA, C. et al. Textile wastewater treatment in a spinning disc reactor: improved performances—experimental, modeling and SVM optimization. **Processes**, v. 9, n. 11, 2021.

ZAFAR, Z.; FATIMA, R.; KIM, J. Experimental studies on water matrix and influence of textile effluents on photocatalytic degradation of organic wastewater using Fe–TiO₂ nanotubes: towards commercial application. **Environmental Research**, v. 197, p. 111120, 2021.

ZHANG, Y.; RICO, C.; CAMACHO-MUÑOZ, D. et al. Environmental life cycle assessment of solar-based advanced oxidation processes for removal of contaminants of emerging concern. **Journal of Cleaner Production**, v. 276, p. 124166, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124166>.

ZHANG, X. et al. Ultrafiltration and activated carbon adsorption for textile wastewater treatment. **Water Research**, v. 199, p. 117-125, 2021.

ZHANG, M. L. Z. et al. Roles of magnetic particles in magnetic seeding coagulation-flocculation process for surface water treatment. **Elsevier**, v. 212, p. 337-343, 2023.

APÊNDICES

APÊNDICE A – TRABALHOS UTILIZADOS NA REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

| Nº | Plataforma | Referências | Objetivos | Método utilizado | Principais resultados e conclusão |
|----|-------------------------|--------------------------------|---|--|---|
| 1 | Scopus | (THASILU; KARTHIKEYAN, 2016) | Investigar a descoloração de soluções do corante C.I. Reactive Red 243 utilizando o sistema H ₂ O ₂ /UV. Além disso, buscou-se avaliar a influência de produtos químicos adicionados aos banhos de tingimento no processo industrial. | Foi realizado um planejamento fatorial estatístico em dois níveis para analisar a eficiência de remoção de cor. As variáveis estudadas incluíram pH da reação, concentração de H ₂ O ₂ , concentração de ureia e concentração de NaCl. As soluções de corante foram preparadas com concentração de 100 mg/L, e o pH ajustado para 3 ou 11 conforme necessário. As amostras foram irradiadas com UV e a descoloração foi monitorada por espectrofotometria. | Os resultados demonstraram que o sistema H ₂ O ₂ /UV é eficaz na descoloração do corante C.I. Reactive Red 243, alcançando até 99% de remoção de cor em algumas condições. A concentração de H ₂ O ₂ foi a variável mais significativa, com concentrações mais altas acelerando a descoloração. O pH e a concentração de ureia também apresentaram efeitos positivos, enquanto a presença de NaCl teve um efeito negativo, possivelmente devido à captura de radicais hidroxila pelos íons cloreto. O estudo concluiu que o processo H ₂ O ₂ /UV é uma abordagem promissora para a degradação de corantes têxteis, especialmente quando as condições operacionais são otimizadas para maximizar a eficiência de descoloração. |
| 2 | Scopus e Web of Science | (TAVARES <i>et al.</i> , 2016) | Determinar o método mais eficaz para tratar efluentes têxteis contendo o corante Basic Blue 99 (BB). Foram comparados os processos de tratamento eletroquímico e Fenton, utilizando um delineamento experimental 2 ³ para avaliar as interações das condições experimentais na oxidação do BB. | Tratamento Eletroquímico: Realizado na presença de NaCl como eletrólito e com alta densidade de corrente (30 mA/cm ²). Reação de Fenton: Utilizou concentrações de H ₂ O ₂ de 10 mg/L e Fe ²⁺ de 0,5 mmol/L. | Eficiência: O tratamento eletroquímico foi 23 vezes mais rápido que a reação de Fenton, devido à formação de espécies cloradas durante a eletrooxidação, que contribuíram significativamente para a oxidação do corante. Toxicidade: Embora o processo eletroquímico tenha sido mais eficiente, o efluente tratado apresentou maior toxicidade para a germinação e crescimento de <i>Lactuca sativa</i> , indicando alguma biotoxicidade residual. Os resultados demonstraram que ambos os processos foram eficazes na remediação de efluentes contendo o corante BB. No entanto, |

| | | | | | |
|---|----------------|----------------------------------|---|---|---|
| | | | | | é necessário combiná-los com outros processos para garantir a completa adequação do efluente para descarte seguro. |
| 3 | Scopus | (POURGHOLI <i>et al.</i> , 2018) | Avaliar o uso do método experimental em efluente da indústria têxtil Kashan em escala de laboratório e sistema de batelada. | Inicialmente, foram obtidas condições ótimas para O ₃ e H ₂ O ₂ e seguidas por métodos avançados de oxidação (UV/O ₃ , UV/ H ₂ O ₂ , O ₃ / H ₂ O ₂ e UV/ H ₂ O ₂ /O ₃) em diferentes tempos de reação e pH na remoção de corante e DQO. (demanda química de oxigênio). Os resultados foram comparados com o método de repetição complexa. | O tempo de tratamento foi eficaz na remoção da cor ($P<0/001$) estatisticamente. presença de incidência de fortemente numerosos oxidantes e seu efeito agravante através da produção radicais hidroxila ativos. |
| 4 | Web of Science | (KIRAN, <i>et al.</i> , 2018) | Investigar a descoloração de águas residuais têxteis sintéticas usando dióxido de titânio como um agente fotocatalítico. | O estudo preparou águas residuais sintéticas misturando três corantes dispersos e avaliou o tratamento fotocatalítico, tanto artificial quanto assistido por energia solar. Os parâmetros analisados incluíram dose de TiO ₂ , concentração de corantes, pH, concentração de H ₂ O ₂ e temperatura. O tratamento artificial foi realizado com lâmpadas de luz sintética de diferentes intensidades, enquanto o tratamento solar foi feito em horários variados sob condições otimizadas. A eficiência do tratamento foi medida pela redução de carbono orgânico total (COT) e demanda química de oxigênio (DQO). A fotocatálise assistida por energia solar apresentou os melhores resultados em descoloração e mineralização, e os produtos de degradação foram caracterizados por espectroscopia FTIR. | O estudo investigou a eficácia do dióxido de titânio (TiO ₂) como fotocatalisador na descoloração de águas residuais sintéticas da indústria têxtil, contendo uma mistura de três corantes dispersos. Foram avaliados diversos parâmetros para optimizar o processo de fotocatálise, como a dosagem de TiO ₂ , a concentração dos corantes, o pH, a concentração de peróxido de hidrogênio (H ₂ O ₂) e a temperatura. A fotocatálise foi comparada entre tratamento artificial (com lâmpada de luz sintética) e assistida por energia solar, realizada em diferentes horários do dia. A eficácia foi medida por Carbono Orgânico Total (COT) e Demanda Química de Oxigênio (DQO). A fotocatálise assistida por energia solar apresentou melhores resultados em descoloração e mineralização em comparação com a fotocatálise artificial. A análise dos produtos de degradação, utilizando espectroscopia FTIR, revelou as mudanças químicas ocorridas durante o processo. Constatou-se que a fotocatálise solar é uma abordagem eficaz para tratar águas residuais têxteis, |

| | | | | | |
|---|--------------------------------|----------------------------|---|--|--|
| | | | | | melhorando a qualidade da água e removendo corantes de maneira mais eficiente. |
| 5 | <i>Scopus</i> | (COSTA; AGUIAR, 2019) | Avaliar o efeito de um corante, AM, sobre a descoloração de outros, considerados aqui corantes alvos. | Utilizando processos Fenton ($\text{Fe}^{2+}/\text{H}_2\text{O}_2$, $\text{Fe}^{3+}/\text{H}_2\text{O}_2$). | O AM promoveu um incremento na descoloração dos corantes Vermelho de Fenol e Safranina T, pouca influência para o Alaranjado de Metila, enquanto para o Cromotropo 2R houve uma diminuição na sua descoloração. Em geral, o modelo cinético que se ajustou melhor aos dados experimentais foi o de 2ª ordem. Esses resultados demonstram que um corante pode incrementar, ou até mesmo diminuir, a degradação de outros corantes por processos baseados na reação de Fenton. |
| 6 | <i>Scopus e Web of Science</i> | (BUTHIYAPPAN et al., 2019) | Investigar o desempenho de um sistema integrado de tratamento Fenton-Ultrafiltration para tratar efluentes têxteis. | O estudo está dividido em três partes: parte um, o processo Fenton foi otimizado para DQO: H_2O_2 (peso/peso), H_2O_2 : Fe +2 (peso/peso) e pH para atingir maior remoção de degradação e menor geração de lama. A eficiência do processo foi analisada considerando DQO, COT e remoção de cor como parâmetros-chave. Na segunda parte, o processo foi ampliado para 5 L e a eficiência do sistema integrado foi investigada sob condições otimizadas usando dois tipos diferentes de membranas em diferentes pressões operacionais. Na terceira parte, o desempenho do processo de membrana foi estudado em termos de comportamento do fluxo e sua recuperação. | O efluente tratado apresentou valores de COD, TOC e remoção de cor de 48,0 mg/L, 1,2 mg/L e >99%, respectivamente. Esses valores estão em conformidade com os padrões ambientais típicos de descarga. |

| | | | | | |
|---|--------------------------------|----------------------------------|--|---|---|
| 7 | <i>Scopus e Web of Science</i> | (DOMINGUES <i>et al.</i> , 2019) | Investigar a eficiência da degradação photocatalítica de efluentes têxteis reais da indústria Gul Ahmad, em Karachi, Paquistão, utilizando TiO ₂ , ZnO e H ₂ O ₂ como photocatalisadores. | Os experimentos foram conduzidos a 38 °C em um reator com agitação, empregando um processo de foto-oxidação com radiação ultravioleta. Foram avaliadas as taxas de degradação do efluente utilizando TiO ₂ e ZnO sob diferentes valores de pH, bem como a combinação de TiO ₂ com H ₂ O ₂ . | Dióxido de Titânio (TiO ₂): Alcançou uma descoloração máxima de 95,29% a 37 °C e pH 9, em 150 minutos de irradiação. Óxido de Zinco (ZnO): Obteve uma descoloração de 64,41% nas mesmas condições. Combinação de TiO ₂ e H ₂ O ₂ : Resultou em uma descoloração de aproximadamente 86% em 50 minutos de irradiação. Os resultados indicam que o TiO ₂ é mais eficaz que o ZnO na degradação photocatalítica de efluentes têxteis reais. Além disso, a adição de H ₂ O ₂ ao sistema com TiO ₂ acelerou significativamente o processo de descoloração. |
| 8 | <i>Scopus e Web of Science</i> | (SANTANA <i>et al.</i> , 2019) | Avaliar os processos oxidativos avançados (POA) para uso na degradação dos corantes têxteis reativo vermelho 195 e preto direto 22. | Utilizou-se reatores de bancada, além da toxicidade da solução, tanto antes como depois do tratamento. | O modelo cinético no qual os dados experimentais melhor se ajustaram foi o modelo não linear que emprega monitoramento de comprimento de onda e a solução tratada era tóxica usando uma concentração de 10% de <i>Lactuca sativa</i> e <i>Syzygium aromaticum</i> sementes. |
| 9 | <i>Web of Science</i> | (JUSTINO, <i>et al.</i> , 2019) | Avaliar o processo solar foto-Fenton, utilizando ferrioxalato como mediador, para o tratamento primário de efluentes têxteis brutos (E1). Também foi investigada a eficácia do processo como etapa de polimento após o tratamento por lodo ativo em outro efluente (E2). | O acompanhamento foi realizado ao longo de um ano, com análises mensais da eficiência de remoção de cor e comportamento dos sólidos. O estudo foi conduzido sob condições naturais, considerando luz solar, temperatura e características próprias dos efluentes. Os parâmetros operacionais incluíram uma concentração de ferro de 50 mg L ⁻¹ , pH de 5, concentração de H ₂ O ₂ de 525 mg L ⁻¹ , com introdução em doses decrescentes. O oxalato foi adicionado na proporção molar de 1:3 [Fe+3:(C ₂ O ₄) ⁽⁻²⁾]. | Houve aumento considerável na turbidez e nos sólidos em suspensão, atribuído à precipitação do ferro e à ação coagulante resultante. Em dias ensolarados, observou-se uma degradação complexa em E2, resultando em alta capacidade de sedimentação de sólidos no efluente final. Esse processo levou a um sobrenadante límpido, o que não foi observado em dias nublados. Essas conclusões indicam que o processo solar foto-Fenton, quando mediado por ferrioxalato, pode ser uma abordagem eficaz para o tratamento de efluentes têxteis, proporcionando uma significativa remoção de cor e melhorando a qualidade do efluente, especialmente em condições ensolaradas. |

| | | | | | |
|----|-----------------------|--------------------------------|---|---|---|
| 10 | <i>Web of Science</i> | (HU; SHANG; CHIU, 2019) | <p>A ozonização catalítica foi aplicada para degradar corantes residuais presentes em efluentes de enxágue de processos de lavagem com o objetivo de reciclar os efluentes residuais.</p> | <p>A ozonização catalítica foi utilizada para degradar corantes residuais em efluentes de enxágue, com o objetivo de reciclar esses efluentes. Um catalisador magnético foi preparado, consistindo em partículas altamente magnéticas de ferrita de manganês ($MnFe_2O_4$) carregadas em materiais de aerogel de carbono ($MnFe_2O_4@CA$).</p> | <p>O estudo demonstrou que a ozonização catalítica aumenta a eficiência na remoção da Demanda Química de Oxidação (DQO) em 25% em comparação com a ozonização convencional, mantendo uma qualidade de cor aceitável para os tecidos (diferença de cor não superior a 1,0 em Delta E-cmc(2:1)). Os efluentes de enxágue tratados podem ser reciclados, substituindo água doce no processo de lavagem. A ozonização catalítica é apresentada como uma tecnologia promissora para economia de água e tratamento eficaz de efluentes na indústria têxtil, oferecendo uma solução ambientalmente amigável e economicamente viável.</p> |
| 11 | <i>Web of Science</i> | (TORRES, <i>et al.</i> , 2019) | <p>Avaliar a eficiência do processo de oxidação eletroquímica (EO) para tratar efluentes têxteis que foram previamente submetidos ao processo físico-químico de coagulação-flocação (CF).</p> | <p>A metodologia do estudo envolveu duas etapas principais no tratamento de efluentes têxteis. Inicialmente, as amostras foram tratadas por coagulação-flocação (CF) com parâmetros otimizados: concentração de sulfato de alumínio (1,5 mg/L), pH ajustado para 6,0, alcalinidade de 0,675 mg/L e agente flocculante a 61 mg/L. O processo incluiu mistura rápida a 100 rpm por 1 minuto, seguida por mistura lenta a 20-60 rpm durante 20 minutos, resultando em uma redução de 20% no Carbono Orgânico Total (TOC). Posteriormente, os efluentes foram tratados por oxidação eletroquímica usando um eletrodo de Diamante Doped Semicondutores (DSA) com corrente de 300 mA por 180 minutos de eletrólise, alcançando uma redução significativa de 82% no TOC.</p> | <p>O processo de oxidação eletroquímica demonstrou uma alta eficiência na remoção de TOC, alcançando uma redução de 82% após 180 minutos de eletrólise. O tratamento combinado de coagulação-flocação seguido por oxidação eletroquímica foi eficaz na redução da toxicidade dos efluentes. A toxicidade para <i>Lactuca sativa</i> e <i>Raphidocelis subcapitata</i> foi significativamente reduzida, indicando uma melhoria na qualidade dos efluentes tratados.</p> |

| | | | | | |
|----|--------------------------------|---|---|--|--|
| 12 | <i>Scopus e Web of Science</i> | (ROSA <i>et al.</i> , 2020) | Aplicar o processo oxidativo avançado (POA) H ₂ O ₂ /UV como alternativa para reduzir insumos, custos e impactos ambientais de efluentes têxteis. | Realizou-se aplicação do processo oxidativo avançado (POA) H ₂ O ₂ /UV como alternativa para reduzir insumos, custos e impactos ambientais de efluentes têxteis. A contabilidade de custos ambientais foi utilizada para demonstrar os ganhos econômicos, ambientais e sociais do processo | Há uma eficiência de remoção do carbono orgânico total e sal, 93% e 95%, respectivamente, e o consumo de carbonato de sódio e hidróxido de sódio foi reduzido em 33,21% e 25,51%, respectivamente. |
| 13 | <i>Scopus e Web of Science</i> | (FAVERO <i>et al.</i> , 2020) | Investigar a eficiência dos processos físico-químicos de coagulação e floculação e processo oxidativo avançado | Utilizou-se Fenton na redução dos parâmetros de cor, turbidez e Demanda Química de Oxigênio (DQO) de um efluente real de uma indústria têxtil | Tanto no pH 6,0 quanto no pH 7,0, foram observadas reduções em todos os parâmetros analisados, obtendo-se 170,78 mg O ₂ /L de COD, 22,19 mg/L de cor e 0,80 NTU de turbidez (em pH 6,0) e 151,80 mg O ₂ /L de COD, 26,73 mg/L de cor, 0,94 NTU de turbidez (em pH 7,0), que demonstra a eficiência desse processo na redução dos parâmetros analisados. |
| 14 | <i>Scopus e Web of Science</i> | (KLANOVICZ <i>et al.</i> , 2020) | Desenvolver processos de oxidação avançados (POA), utilizando peroxidase de farelo de arroz não comercial para remover cor e toxicidade de águas residuárias têxteis sintéticas. | Utilizou-se um sistema de microondas e shaker, obtivemos 38,9% e 100% de remoção de cor do efluente após tratamento com peroxidase, respectivamente. Além disso, o sistema agitador decanta partículas residuais de corante por meio de filtração, proporcionando à indústria têxtil uma alternativa econômica e ambientalmente viável ao tratamento de efluentes. | Nos resultados dos testes de toxicidade, ambos os sistemas de tratamento danificaram o material genético utilizado. Esse dano ocorre devido ao lançamento industrial de efluentes em corpos d'água; a diluição do efluente reduziu esses danos. Os dados sugerem que a peroxidase como tratamento de efluentes têxteis tem uso potencial em processos industriais, pois a peroxidase do farelo de arroz demonstrou afinidade com corantes. |
| 15 | <i>Scopus e Web of Science</i> | (MIRZA <i>et al.</i> , 2020) | Revisar e avaliar as tecnologias existentes para o tratamento de águas residuais têxteis, com um foco especial nos processos de oxidação avançada (AOPs), separação por membranas e processos integrados de AOP-membrana. | - | Os principais desafios que impedem o desenvolvimento de tais conceitos de processos integrados foram apresentados, o que poderia funcionar como uma referência para futuras pesquisas e desenvolvimento. |
| 16 | <i>Scopus e Web of Science</i> | (LIMA SANTOS KLIENCHEN DALARI <i>et al.</i> , 2020) | Avaliar a eficiência do processo foto-Fenton heterogêneo no tratamento de efluentes têxteis reais. | Utilizou-se grânulos de quitosana como catalisador sólido. | Os resultados obtidos pelos autores apresentaram 91,92 % de descoloração do efluente. Foi possível verificar a eficiência do processo sem precipitação de ferro ao trabalhar com valores de pH acima de 6. |

| | | | | | |
|----|-------------------------|----------------------------------|---|---|---|
| | | | | | Além disso, foi realizada a determinação do comportamento de outros parâmetros, como cor, compostos aromáticos , sólidos dissolvidos e totais, bem como toxicidade. |
| 17 | Scopus e Web of Science | (GARCIA; ROSA; BORRELY, 2020) | Avaliar a eficiência de um tratamento por feixe de elétrons aplicado na toxicidade e redução de cor de um efluente têxtil contendo corante reativo Red 239. | DQO e COT dos efluentes também foram avaliados. Os efluentes avaliados foram submetidos ao tratamento EBI em doses variando de 0,5 a 15 kGy. As bactérias Vibrio fischeri e os crustáceos Daphnia similis foram expostos a efluentes irradiados e não irradiados, a toxicidade foi avaliada através de cálculos de CE50 (concentração efetiva mediana). | A irradiação com EB reduziu com sucesso a toxicidade e a cor do efluente e que aproximadamente 70% de redução de toxicidade foi obtida para ambos os organismos, enquanto 95% de redução de cor foi obtida pela aplicação de 5 kGy. |
| 18 | Scopus | (RAMOS <i>et al.</i> , 2020b) | Apresentar estudos mecânicos dos principais Processos Oxidativos Avançados (POAs) e demonstrar a eficiência dessa tecnologia no tratamento de águas residuais. | O estudo realizou uma revisão abrangente da literatura científica, analisando diferentes POAs, como processos fotoquímicos, processos baseados em ozônio, processos Fenton e processos eletroquímicos. Foram discutidos os mecanismos de geração de radicais livres e a aplicação desses processos no tratamento de águas residuais. | Geração de Radicais Hidroxila: Os POAs são eficazes na geração in situ de radicais hidroxila, que possuem alto potencial de oxidação, capazes de degradar compostos orgânicos complexos, incluindo aqueles resistentes a métodos convencionais. Eficiência na Degradção de Poluentes: A aplicação de POAs demonstrou eficiência significativa na degradação de diversos poluentes orgânicos, como compostos organonitrogenados e organohalogenados, além de oxidar materiais tóxicos. O estudo concluiu que os Processos Oxidativos Avançados oferecem uma abordagem promissora para o tratamento de águas residuais, especialmente na degradação de compostos recalcitrantes que não são facilmente removidos por métodos convencionais. |
| 19 | Web of Science | (BOUGDOUR, <i>et al.</i> , 2020) | Investigar a eficiência de remoção de cores de águas residuais contendo corantes primários diretos mistos e águas residuais reais da indústria têxtil usando o processo PDS (Peroxidissulfato)/Fe(II)/UV. Uma | Foram utilizados dois tipos de amostras: uma mistura simulada de corantes e águas residuais têxteis reais. A mistura simulada continha três corantes reativos (Amarelo Reativo 17, Vermelho Reativo 120 e Azul Reativo 19) combinados em uma receita | A mineralização dos corantes foi alta, com taxas de 96,1% para RY17, 99,2% para RR120, 100% para RB19 e 80% para a mistura de corantes após 2 horas de tratamento. Para águas residuais têxteis reais, a degradação foi de aproximadamente 66%. |

| | | | | | |
|----|-----------------------|---------------------------------|---|---|--|
| | | | mistura simulada, baseada em uma receita industrial e contendo Amarelo Reativo 17 (RY17), Vermelho Reativo 120 (RR120) e Azul Reativo 19 (RB19), foi investigada. | industrial. O processo PDS/Fe(II)/UV foi aplicado por 2 horas para a degradação dos corantes. As condições experimentais incluíram uma pH inicial de 3, concentração de PDS de 1 mM e temperatura de 25°C. | O custo operacional estimado foi de cerca de 93,82 MAD/m ³ (aproximadamente 8,64 EUR/m ³), considerando as condições ótimas do processo. As condições mais econômicas para a degradação dos corantes foram encontradas com um pH inicial de 3, concentração de PDS de 1 mM e temperatura de 25°C. Os produtos de degradação foram pouco tóxicos, aumentando a aplicabilidade do processo para o tratamento de águas residuais e possibilitando a reutilização da água tratada para irrigação. |
| 20 | <i>Web of Science</i> | (TAVARES. <i>et al.</i> , 2020) | Avaliar a eficiência do processo de Fenton na degradação de corantes reativos individuais (azul 19 - RB19, vermelho 195 - RR195 e amarelo 145 - RY145), uma mistura de corantes e um efluente têxtil real. | Foi utilizado um planejamento fatorial completo 2 ³ combinado com a metodologia de superfície de resposta (RSM) para estudar os efeitos de três variáveis: concentração de H ₂ O ₂ , concentração de Fe ²⁺ , e concentração de corante. As reações foram realizadas variando essas concentrações para identificar as condições que maximizaram a redução de absorbância (AR). A análise dos dados foi feita com análise de variância (ANOVA) e modelos estatísticos. Além disso, a cinética de degradação dos corantes foi avaliada para verificar se a redução da absorbância seguia modelos de ordem de reação de primeira ou segunda ordem. Após o tratamento, foi realizada uma avaliação de fitotoxicidade para medir a redução da toxicidade nas soluções tratadas. | O estudo concluiu que o processo de Fenton é altamente eficiente na descoloração de soluções contendo corantes reativos e pode ser uma solução eficaz para o tratamento de águas residuais têxteis. No entanto, soluções mais complexas podem requerer ajustes no tempo de reação e nas condições operacionais para alcançar a eficácia desejada |
| 21 | <i>Web of Science</i> | (FONTANA, <i>et al.</i> , 2020) | Tratar efluentes brutos de uma indústria têxtil utilizando fotocatálise heterogênea com TiO ₂ e UV solar, e comparar a eficácia do tratamento fotocatalítico com o tratamento realizado pelo fabricante. | foram avaliados os seguintes efluentes: efluente bruto (re), efluente tratado pelo fabricante (mte), efluente exposto à fotocatálise na presença de TiO ₂ (pteti), efluente exposto à fotocatálise sem tio ₂ (pte). os parâmetros avaliados foram os físicos, químicos e toxicológicos dos efluentes | Os efluentes MTE, PTETi e PTE apresentaram valores maiores de OD em comparação ao efluente bruto (RE). O efluente tratado pelo fabricante (MTE) apresentou a maior eficiência na degradação da cor. Os efluentes tratados (MTE, PTETi, e PTE) ainda não atenderam às normas brasileiras para DQO. O teste com Allium cepa L. mostrou citotoxicidade para o |

| | | | | | |
|----|-------------------------|--------------------------------|--|--|--|
| | | | | teores de od, degradação da cor, dqo, testes de toxicidade com allium cepa l. e artemia salina l. | efluente MTE em 24 e 48 horas. Efluentes PTETi e PTE não apresentaram citotoxicidade após 24 horas, mas PTETi apresentou uma redução significativa do índice mitótico após 48 horas. No teste com Artemia salina L., efluentes RE e MTE foram tóxicos em concentrações de 100% e 50%, enquanto os efluentes fototratados apresentaram toxicidade apenas em 100%. Os tratamentos photocatalíticos foram mais eficazes que o tratamento aplicado pelo fabricante, mas ainda há necessidade de aprimoramento para atender plenamente às normas e reduzir a toxicidade. |
| 22 | Web of Science | (HANELA, <i>et al.</i> , 2020) | Comparar a eficiência de dois processos avançados de oxidação (POA), ozonização e foto-Fenton, no tratamento de efluentes têxteis. | Os processos avançados de oxidação avaliados foram ozonização e foto-fenton. Uma solução foi preparada para simular as características típicas de efluentes têxteis, contendo corantes, surfactantes e outros contaminantes. E a análise de eficiência foi feita por descoloração e por remoção de carbono orgânico total. | Ambas as tecnologias mostraram alta eficiência na remoção da cor dos efluentes, com a ozonização apresentando um desempenho ligeiramente superior em comparação ao foto-Fenton. O foto-Fenton foi mais eficiente na remoção de TOC do que a ozonização, embora ambos os processos tenham removido apenas parcialmente o TOC. O estudo indicou que, para a descoloração, a ozonização pode ser ligeiramente mais eficaz, enquanto o foto-Fenton oferece uma melhor remoção de compostos orgânicos, tornando-o mais eficiente na redução do TOC. Ambos os métodos demonstraram potencial significativo para o tratamento de águas residuais têxteis. |
| 23 | Scopus e Web of Science | (LEBRON <i>et al.</i> , 2021) | Avaliar a aplicação de um processo avançado de oxidação (AOP, foto-Fenton) combinado com microfiltração (MF) e nanofiltração (NF) | A aplicação foi realizada em dois processos distintos: (1) MF-NF-AOP (c) e (2) MF-AOP-NF; visando o tratamento concentrado de NF no primeiro, e como pré-tratamento de NF no segundo. | Em ambos os casos, a concentração de ferro residual no concentrado de NF e no efluente AOP impediu seu reuso. No entanto, o permeado de NF de ambos os processos de tratamento pode ser considerado para lavagem de fios e lavagem de equipamentos. Além disso, para a combinação MF-NF-AOP (c), o permeado de |

| | | | | | |
|----|--------------------------------|-----------------------------------|--|---|--|
| | | | | | NF atendeu aos requisitos para ser reciclado de volta ao processo. O melhor desempenho do primeiro sistema (MF-NF-AOP (c)) no tratamento de efluentes têxteis foi garantido por seu menor gasto operacional (0,421 US\$/m ³) em comparação com o MF-AOP-NF (0,736 US\$/m ³). No geral, o tratamento combinando MF-NF-AOP (c) foi considerado a alternativa de melhor custo-benefício para o reuso do tratamento de efluentes têxteis. |
| 24 | <i>Scopus</i> | (SILVA <i>et al.</i> , 2021) | Avaliar a Análise do Ciclo de Vida (LCA) da degradação de corantes em 1 m ³ de efluente através de processos oxidativos avançados | Para o Inventário de Ciclo de Vida (ICV), foram considerados os compostos Peróxido de Hidrogênio (H ₂ O ₂) e Sulfato de Ferro (II) (FeSO ₄). A metodologia utilizada para calcular os impactos ambientais foi ReCiPe 2016 Midpoint (I) V1.04 / World (2010) I, abrangendo as categorias de impacto: Aquecimento Global, Eutrofização da Água Doce, Ecotoxicidade da Água Doce e Toxicidade Carcinogênica Humana. As simulações foram realizadas no software SimaPro®, versão Faculty | O processo Photo-Fenton é uma solução viável para a degradação de corantes em efluentes industriais têxteis, pois possuem um alto índice de degradação e utiliza a luz solar, tornando sua aplicação viável para replicação em escala industrial. |
| 25 | <i>Scopus e Web of Science</i> | (SANTANA; NAPOLEÃO; DUARTE, 2021) | Investigar aplicação de tecnologia avançada de oxidação em matrizes têxteis utilizando processos Fenton: | Inicialmente, para uma mistura de corantes têxteis em solução, o processo foto-Fenton/luz solar mostrou-se o mais eficiente dentre os demais sistemas testados. Durante os testes verificou-se que a cinética de degradação depende do pH e das concentrações de catalisador e oxidante. | A eficiência do processo foto-Fenton/luz solar foi inferior à obtida para a solução dos corantes, fato atribuído à maior complexidade da matriz real. No entanto, os dados também indicaram que a combinação de processos de coagulação/flocação e oxidação avançada é a metodologia mais adequada para reduzir a fração de compostos biodegradáveis. |
| 26 | <i>Scopus e Web of Science</i> | (DE SOUZA <i>et al.</i> , 2021) | Avaliar o tratamento do efluente da indústria têxtil via processos oxidativos avançados. | Utilizou-se o processo de foto-Fenton assistidos por diferentes fontes (luz solar natural, UV-A ou lâmpadas LED visíveis). | O uso da lâmpada LED exigiu concentrações de reagentes menores em comparação com as fontes solar e UV-A e que a análise de custo indicou que o uso de lâmpadas LED resultou em redução no consumo elétrico em relação à lâmpada UV-A, bem como redução no custo de reagentes devido à menor concentração de |

| | | | | | |
|----|-------------------------|---------------------------------|---|---|--|
| | | | | | reagentes necessária em relação aos processos assistidos por luz solar natural e UV-A. |
| 27 | Scopus e Web of Science | (ZAHARIA <i>et al.</i> , 2021) | Avaliar a eficiência da tecnologia de disco rotativo (Spinning Disc - SD) no tratamento de efluentes têxteis reais, isoladamente e em combinação com o processo de oxidação avançada de Fenton. | Estudo Experimental: Foram realizados experimentos variando a vazão de alimentação (10–30 L/h) e a velocidade de rotação do disco (100–1500 rpm) para determinar as condições ótimas de remoção de poluentes. Modelagem e Otimização: Utilizou-se algoritmos de aprendizado supervisionado para modelar os dados experimentais e otimizar as condições de operação visando a máxima eficiência na remoção de turbidez e cor. Processo Fenton Adicional: Além do tratamento com o reator de disco rotativo, aplicou-se o processo de oxidação de Fenton para potencializar a remoção de cor e sólidos suspensos. | Eficiência do Reator de Disco Rotativo: O tratamento utilizando apenas a tecnologia SD mostrou-se eficaz, melhorando significativamente os indicadores de qualidade do efluente em curtos períodos de tempo. Remoção de Cor e Sólidos Suspensos: A combinação do reator de disco rotativo com o processo de Fenton resultou em melhorias notáveis, alcançando remoções de 62,84% para cor e 69,46% para sólidos suspensos. Modelagem e Otimização Bem-Sucedidas: A aplicação de algoritmos de aprendizado supervisionado permitiu prever com precisão os resultados do tratamento e otimizar as condições operacionais para máxima eficiência. O estudo demonstrou que a tecnologia de disco rotativo, especialmente quando associada ao processo de oxidação de Fenton, é uma alternativa promissora e eficiente para o tratamento de efluentes têxteis, proporcionando melhorias significativas na qualidade do efluente tratado. |
| 28 | Web of Science | (TASNEEM, <i>et al.</i> , 2021) | Investigar a eficácia da combinação de processos de coagulação-flocação e Fenton, juntamente com a fitorremediação por aguapé (<i>Eichornia crassipes</i>), no tratamento de efluentes têxteis. | Foram analisados níveis de condutividade elétrica, sólidos dissolvidos totais, turbidez, pH, OD, DBO, DQO, carbono orgânico total e metais pesados. Fez-se tratamento com Coagulação-Flocação, tratamento com Processo Fenton com (H ₂ O ₂) e ferro para promover a oxidação dos contaminantes e Fitorremediação com Aguapé. | O estudo conclui que a combinação de coagulação-flocação com fitorremediação é uma abordagem mais eficaz para o tratamento de efluentes têxteis contaminados, superando a combinação do processo Fenton com fitorremediação, especialmente na remoção de metais pesados e na redução dos parâmetros de poluição. Esta combinação oferece uma alternativa sustentável e de baixo custo para o tratamento de águas residuais na indústria têxtil, atendendo melhor aos padrões ambientais estabelecidos. |

| | | | | | |
|----|--------------------------------|---|--|---|--|
| 29 | <i>Web of Science</i> | (ZAFAR; FATIMA; KIM, 2021) | Avaliar a eficácia da fotocatálise para a remoção de corantes têxteis, especificamente o corante vermelho Congo, em diferentes matrizes aquosas e identificar como diversos produtos químicos presentes em águas residuais têxteis afetam esse processo. | O estudo avaliou a eficiência da fotocatálise utilizando nanotubos de Fe-TiO ₂ em diferentes matrizes aquosas: água da torneira, água destilada, água do mar, água da superfície e água ultrapura. Os experimentos mediram a taxa de degradação do corante vermelho Congo, a remoção de carbono orgânico total e a demanda química de oxigênio (DQO). A eficácia do photocatalisador foi avaliada observando-se como as diferentes matrizes aquosas influenciam a fotocatálise, além de analisar a turbidez e a condutividade da água após o tratamento. | O estudo revelou que a eficácia da fotocatálise na remoção de corantes têxteis é afetada por diversos fatores relacionados à qualidade da água, como sais orgânicos, inorgânicos, metais pesados e íons. Avaliou-se a descoloração do corante vermelho Congo e a eficácia na remoção de matéria orgânica e demanda química de oxigênio em diferentes tipos de água (da torneira, desionizada, do mar, superficial e ultrapura). A taxa de degradação fotocatalítica foi menor em águas mais contaminadas devido à interferência de orgânicos e minerais dissolvidos. Embora as taxas de degradação variem, todas as matrizes apresentaram redução significativa na turbidez e condutividade após o tratamento. O estudo também investigou como produtos químicos comuns em efluentes têxteis afetam a fotocatálise, destacando a complexidade e a necessidade de considerar as características específicas da água e dos contaminantes para otimizar o processo. |
| 30 | <i>Scopus e Web of Science</i> | (DA ROCHA SANTANA <i>et al.</i> , 2022) | Avaliar a tecnologia avançada de oxidação através da degradação de uma solução composta por quatro corantes têxteis, mais complexa que as soluções utilizadas em pesquisas semelhantes. | Para tanto, foi aplicado o processo foto-Fenton heterogêneo, utilizando o mineral pirita como catalisador de ferro e a luz solar como fonte de radiação. | De maneira geral, foi evidenciada a adequação do tratamento proposto e o bom uso da pirita nos sistemas heterogêneos de Fenton. |
| 31 | <i>Scopus e Web of Science</i> | (JADHAV <i>et al.</i> , 2022) | Avaliar as soluções aquosas do corante Reactive Red 45. | Para tanto, as soluções foram tratadas com AOP usando apenas radiação UV e gama e, em seguida, na presença de H ₂ O ₂ . | Os processos avançados de oxidação baseados em radiação UV e gama em conjunto com H ₂ O ₂ podem ser aplicados para a degradação e desintoxicação de efluentes de resíduos têxteis de forma eficiente. |
| 32 | <i>Scopus e Web of Science</i> | (FEUZER-MATOS <i>et al.</i> , 2022) | Avaliar avaliou a eficiência de processos oxidativos e adsorptivos para remover corantes novos e recalcitrantes de efluentes têxteis. | Este método foi usado para tratar efluentes têxteis que já haviam sido tratados por um sistema convencional (isto é, precipitação química e tratamento microbiológico), e este efluente tratado duplamente foi analisado para identificar seu potencial de reutilização para usos industriais não potáveis. | O Ti-fotoperoxidação + AC foi o melhor processo para remover corantes recalcitrantes, mas o efluente tratado pode ser usado apenas indiretamente para o processo de limpeza da indústria têxtil. |

| | | | | | |
|----|-----------------------|---|---|---|---|
| 33 | <i>Web of Science</i> | (MOHAMMADHO SSEINI, <i>et al.</i> , 2022) | Sondar a capacidade das nanopartículas de $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Bentonita/TiO}_2$ ($\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{B/TiO}_2$) de atuar como um catalisador na degradação do corante vermelho reativo 198 (RR198) e águas residuais de fábricas têxteis, utilizando irradiação com luz visível e UV. | O estudo utilizou nanopartículas de $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Bentonita/TiO}_2$ como fotocatalisadores para a degradação de corantes e águas residuais têxteis, testando sob luz UV e visível. | Após 60 minutos com luz UV e 90 minutos com luz visível, a degradação completa do corante foi alcançada. A toxicidade dos efluentes também foi significativamente reduzida. O estudo concluiu que o catalisador demonstrou alta eficiência na remoção de poluentes orgânicos e na neutralização da toxicidade, com boa capacidade de separação e reutilização. |
| 34 | <i>Web of Science</i> | (PIPIL, <i>et al.</i> , 2022) | Explorar a eficácia de processos avançados de oxidação - fotocatálise e foto-Fenton, em relação à degradação do corante vermelho Remazol no efluente da indústria têxtil. | A metodologia do estudo envolveu a aplicação de fotocatálise e foto-Fenton para tratar efluentes têxteis contendo o corante vermelho Remazol. A eficácia foi avaliada pela remoção da cor e mineralização do corante. | Os resultados revelaram que ambos os processos foram capazes de eliminar completamente a cor do corante Vermelho Remazol, com uma notável taxa de mineralização de cerca de 85%, alcançada em tempos de reação relativamente curtos (60 minutos para a fotocatálise e 8 minutos para o foto-Fenton). A análise econômica destacou a eficiência custo-efetiva do método foto-Fenton, com um custo de tratamento de aproximadamente 0,0090 dólares por litro de água residual contendo o corante. Embora a fotocatálise tenha apresentado uma velocidade relativamente menor, sua eficácia na remoção e degradação da cor do efluente têxtil em comparação com os métodos biológicos tradicionais foi evidente. Em suma, o estudo conclui que tanto o foto-Fenton quanto a fotocatálise são opções de tratamento viáveis, econômicas e substanciais para combater a toxicidade associada aos efluentes têxteis coloridos. |
| 35 | <i>Web of Science</i> | (HOSSAIN, <i>et al.</i> , 2022) | Comparar a eficácia de dois métodos de tratamento para águas residuais têxteis altamente contaminadas, utilizando um consórcio bacteriano aeróbico misto e um processo Fenton com filtro de areia normal. | O consórcio bacteriano aeróbico misto foi utilizado para tratar as amostras de águas residuais. Este consórcio é composto por uma combinação de bactérias que operam na presença de oxigênio para degradar os contaminantes presentes no efluente. No Condicionamento Experimental o tratamento foi realizado com aeração contínua por um | Os resultados demonstraram que ambos os métodos de tratamento foram eficazes na redução da carga poluente. O consórcio bacteriano aeróbico misto exibiu reduções significativas em TDS (66,67%), CE (60%), DBO (91,67%) e DQO (85,45%). Além disso, esse consórcio apresentou uma degradação simultânea dos corantes, |

| | | | | | |
|----|--------------------------------|-----------------------------------|--|--|---|
| | | | | período de 72 horas, permitindo a biodegradação dos poluentes. Amostras foram retiradas ao longo do tempo para avaliar a eficiência do processo. | resultando na descoloração das águas residuais de verde escuro para transparente. O processo Fenton, por sua vez, mostrou reduções em TDS (74,71%), CE (55,11%), DBO (88,33%) e DQO (83,63%) em comparação com o efluente bruto. A remoção de cor foi de 58,57% para o consórcio bacteriano aeróbio misto após 72 horas de aeração, enquanto o processo Fenton com filtro de areia normal alcançou uma remoção de 80%. As porcentagens de remoção de DBO e DQO indicaram que o consórcio de bactérias mistas aeróbicas apresentou uma eficiência de remoção superior ao processo Fenton com filtro de areia normal. |
| 36 | <i>Scopus e Web of Science</i> | (HUTAGALUNG <i>et al.</i> , 2023) | Investigar a eficácia da integração de processos de oxidação avançada (AOPs) utilizando ozônio e a geração de nanobolhas para tratar e recuperar águas residuais provenientes da indústria têxtil. | realizou uma combinação de processo de oxidação avançada (AOP) baseado em ozônio é acoplada a um gerador de nanobolhas para a geração de nanobolhas de ozônio (NB) utilizadas pelo mesmo para tratar o efluente primário adquirido de efluentes têxteis. | O método combinado gerou com sucesso nanobolhas de ozônio com 99,94% de tamanho distribuído em 216,9 nm. Isso destaca que o aumento da reatividade do ozônio desempenha um papel crucial na melhoria da qualidade da água residual têxtil para ser tecnologicamente eficiente até o momento. |
| 37 | <i>Scopus e Web of Science</i> | (KANJAL <i>et al.</i> , 2023) | Avaliar AOP assistido por irradiação de raios-X síncrotron (3–20 keV) | O processo foi desenvolvido para a degradação de soluções de efluentes industriais de cores únicas e mistas. Experimentos de irradiação foram conduzidos em efluentes industriais obtidos diretamente das indústrias de tecidos. | Os resultados da espectroscopia UV-Vis e da demanda de oxidação química (COD) revelaram que as águas residuais foram degradadas e a eficiência da degradação pode ser ajustada variando a dose de raios-X. A descoloração completa e remoção de ~ 85% em COD foi obtida na dose de raios-X de 15000 mAs. Espécies químicas presentes em águas residuais puras e irradiadas foram analisadas usando técnicas de FTIR. Os espectros de FTIR revelaram a destruição do anel aromático e ligação de nitrogênio de águas residuais sob irradiação de raios-X. A técnica de cromatografia líquida-espectroscopia de massa (LC-MS) foi empregada para identificar e quantificar os |

| | | | | | |
|----|--------------------------------|--------------------------------------|---|--|--|
| | | | | | compostos desconhecidos presentes em soluções de águas residuais puras e irradiadas com raios-X. Ensaios de toxicidade em <i>Escherichia coli</i> gram-negativa (DH5α) mostram claramente a desintoxicação de soluções irradiadas com raios-X. |
| 38 | <i>Scopus</i> | (CHRISTIAN <i>et al.</i> , 2023) | Realizar uma análise abrangente das tecnologias e métodos mais recentes utilizados para o tratamento de águas residuais da indústria têxtil. | O estudo discutiu as técnicas recentes usadas para remover cor, sólidos e carga orgânica dos efluentes, como adsorção, coagulação, processo de Fenton, processo de foto Fenton, ozonização e eletrocoagulação. | Como resultados os autores obtiveram que como existem vários processos de tratamento biológicos, eles estão sendo combinados para otimizar as vantagens de ambos os processos envolvidos e restringir ao mínimo as limitações. Combinando vários processos é possível aumentar a eficiência geral do processo de tratamento para cerca de 90% com um tempo de operação muito menor. |
| 39 | <i>Scopus e Web of Science</i> | (SHAJEELAMMA L <i>et al.</i> , 2023) | Investigar e melhorar a eficiência do processo de cavitação ultrassônica (US) de baixa frequência na remoção de corantes orgânicos, especificamente o corante azul de metileno catiônico (MB), de soluções aquosas e efluentes têxteis. | O processo convencional de cavitação de US pulsado de baixa frequência (22 ± 2 kHz) foi modificado variando a potência do US (50–150 W), o pH inicial da solução (2–10) e a taxa de fluxo de O ₂ (1–4 L min ⁻¹) para aumentar a decomposição do corante catiônico azul de metileno (MB) em uma solução aquosa. | A modificação do processo de cavitação US pulsada de baixa frequência, juntamente com a ativação térmica de PS e o uso de HTN como sonocatalisador, pode remover eficientemente corantes orgânicos de soluções aquosas e efluentes têxteis, tornando-o um método promissor e aplicável comercialmente para o tratamento de águas residuais industriais. |
| 40 | <i>Scopus</i> | (SANTANA <i>et al.</i> , 2023) | Atender as limitações ainda apresentadas pelo processo Fenton quanto ao uso de catalisadores de ferro em suspensão. | Foi desenvolvido um nanocompósito de celulose bacteriana (BC) e magnetita (Fe ₃ O ₄). Provou ser superior aos disponíveis na literatura, exibindo propriedades puramente catalíticas e alta reutilização. Seu sucesso na produção foi verificado através de caracterização analítica, enquanto seu potencial catalítico foi investigado no tratamento de diferentes matrizes têxteis. | Os valores mais ótimos de potência de US, pH inicial da solução, taxa de fluxo de O ₂ , HTN e concentrações de PS para decomposição de 100% MB são observados como 150 W, 2, 2 L min ⁻¹ , 0,3 g L ⁻¹ e 10 mM, respectivamente. A decomposição de corantes industriais azo reativos em uma solução aquosa, bem como em um efluente têxtil, também foi demonstrada usando um processo modificado de cavitação pulsada de baixa frequência envolvendo a ativação térmica de PS sem o uso de HTN, o que justifica sua adequação para uma aplicação comercial. |

| | | | | | |
|----|--------------------------------|--------------------------------------|--|--|--|
| 41 | <i>Scopus e Web of Science</i> | (URBINA-SUAREZ <i>et al.</i> , 2023) | Investigar a eficácia de um sistema combinado de bicarbonato de sódio e peróxido de hidrogênio no tratamento de águas residuais provenientes do processo de tingimento têxtil. | Esse estudo enfoca a remoção da Demanda Química de Oxigênio (COD), cor, Carbono Orgânico Total (TOC) e Nitrogênio Ammoniacal (N-NH ₃) no tratamento de efluentes de curtume por meio de um processo de oxidação avançada (AOPs) usando bicarbonato de sódio (NaHCO ₃), peróxido de hidrogênio (H ₂ O ₂) e temperatura usando um design não fatorial composto central com uma resposta de superfície usando o software Statistica 7.0. | A análise estatística constatou que a concentração de NaHCO ₃ afeta a remoção de cor e N-NH ₃ ; no entanto, não afetou COD e TOC. As condições ótimas do processo para remoção dos diferentes compostos em estudo foram: NaHCO ₃ 1 M, H ₂ O ₂ 2 M e 60 °C, com eficiências de 92,35%, 31,93%, 68,85% e 35,5% N-NH ₃ , COD, cor e TOC respectivamente. Pode-se concluir que os POAs que utilizam H ₂ O ₂ e NaHCO ₃ são recomendados para remoção de cor e N-NH ₃ . |
| 42 | <i>Scopus e Web of Science</i> | (DE OLIVEIRA <i>et al.</i> , 2023) | Avaliar a eficácia do processo Foto-Fenton heterogêneo, utilizando magnetita como catalisador, na degradação de uma solução aquosa e um efluente sintético contendo uma mistura de corantes têxteis. | Soluções Tratadas: Foram preparadas uma solução aquosa (SA) e um efluente sintético (ES) contendo uma mistura dos corantes têxteis Direct Black 22 (DB22), Acid Black 172 (AB172) e Reactive Black 5 (RB5). Processo Foto-Fenton Heterogêneo: Utilizou-se magnetita como catalisador e radiação UV-C para promover a degradação dos corantes. Parâmetros Avaliados: Foram testadas diferentes concentrações de peróxido de hidrogênio ([H ₂ O ₂]), porcentagens de massa/volume de catalisador e valores de pH para identificar as condições mais eficazes. | Condições Ótimas: A melhor eficiência de degradação foi alcançada com [H ₂ O ₂] = 40 mg/L, 0,05% m/V de catalisador e pH = 3. Eficiência de Degradação: Nessas condições, obteve-se até 90,1% de degradação para a solução aquosa e 80,2% para o efluente sintético. Os resultados indicam que o processo Foto-Fenton heterogêneo, utilizando magnetita como catalisador, é uma abordagem promissora para o tratamento de efluentes contendo misturas de corantes têxteis, especialmente sob condições controladas de pH ácido e concentrações adequadas de peróxido de hidrogênio. |
| 43 | <i>Scopus e Web of Science</i> | (BAGHERI <i>et al.</i> , 2023) | Desenvolver um novo material para a descontaminação de águas residuais contendo corantes, utilizando um processo avançado de oxidação. O foco principal foi determinar as condições ideais para a degradação do corante modelo azul de metileno (MB) por meio do processo Fenton escuro, empregando um aerogel de ferrita de cobre imobilizado em óxido de grafeno funcionalizado com ágar (Agar@GO-CuFe ₂ O ₄) como catalisador. | Preparação do Catalisador: O aerogel foi sintetizado funcionalizando o óxido de grafeno com ágar e, em seguida, imobilizando partículas de ferrita de cobre na matriz resultante. Avaliação da Degradação: Foram investigados os efeitos de diferentes parâmetros operacionais, incluindo a concentração inicial do corante (10 a 150 mg/L), volume de H ₂ O ₂ (0,5 a 2,5 mL) e pH (2 a 7), para determinar as condições ótimas de degradação do MB. | Eficiência de Degradação: Sob condições ótimas—concentração inicial de MB de 150 mg/L, 20 mg do catalisador, 2 mL de H ₂ O ₂ (30% p/p), temperatura de 40 °C e pH 6—foi alcançada uma degradação de 99,89% do MB. Os resultados demonstram que o aerogel Agar@GO-CuFe ₂ O ₄ é um catalisador eficaz para a degradação de corantes em águas residuais via processo Fenton escuro, oferecendo uma abordagem promissora para o tratamento de efluentes industriais contendo corantes. |

| | | | | | |
|----|-----------------------|----------------------------------|--|---|---|
| 44 | <i>Web of Science</i> | (SEMALTI, <i>et al.</i> , 2023) | Investigar o potencial dos nanocristais de Cu ₂ ZnSnS ₄ (CZTS) dopados com ouro (Au) e prata (Ag) como photocatalisadores para tratamento de águas residuais. | A metodologia do estudo combina a síntese e caracterização de nanocristais dopados, a avaliação da sua eficácia como photocatalisadores para tratamento de águas residuais, e a análise de sua estabilidade e reciclagem. | As principais conclusões deste estudo destacam o papel significativo das nanopartículas de CZTS (Cu ₂ ZnSnS ₄) dopadas com Au/Ag como photocatalisadores eficientes para a remediação de águas residuais. Alguns pontos notáveis incluem síntese e caracterização, eficiência photocatalítica, reciclagem e estabilidade, aplicação prática e heteroestruturas híbridas. Essas descobertas abrem caminho para o desenvolvimento de tecnologias de remediação de águas residuais mais eficientes e sustentáveis, utilizando materiais nanocristalinos avançados. |
| 45 | <i>Web of Science</i> | (GUIDOLIN, <i>et al.</i> , 2023) | Investigar a descoloração de efluentes têxteis reais usando resíduos piríticos brutos (RPW) como um catalisador de processo tipo Fenton, bem como a influência do tamanho de partícula e pré-tratamento apenas com água destilada. | O RPW foi coletado de uma pilha de resíduos, seguindo a norma ABNT NBR 10007:2004, e moído para obter partículas com diâmetro médio de 0,75 e 1,5 mm. Amostras de RPW e resíduos piríticos lavados (WPW) foram caracterizadas por XRF, FTIR e XRD. As condições operacionais foram avaliadas a partir de um planejamento experimental, variando as concentrações de catalisador, H ₂ O ₂ e o tempo de reação. | Os resultados de XRD mostraram a presença majoritária de FeS ₂ nas amostras e o pré-tratamento removeu impurezas, como quartzo e compostos solúveis, da superfície do catalisador. O planejamento experimental determinou que o tamanho de 0,75 mm foi mais eficiente na remoção de cor do efluente. A condição ótima foi definida como 2 g/L de catalisador, 2 g/L de H ₂ O ₂ e 2 h. A capacidade de degradação da cor do efluente foi maior que 90% para amostras de RPW e WPW. No entanto, WPW liberou menos ferro na solução resultante (10,51 mg/L). O catalisador provou ser estável para uso sequencial e após cinco ciclos, a taxa de descoloração foi maior que 80%. O crescimento da raiz foi verificado para o teste de Allium cepa usando o efluente pós-tratamento e neutralizado. Os resultados indicam um uso potencial de resíduos piríticos da mineração de carvão como catalisadores para o processo Fenton para descoloração real de efluentes têxteis, agregando valor ambientalmente amigável a |

| | | | | | |
|----|--------------------------------|--------------------------------------|--|---|--|
| | | | | | um material considerado um passivo ambiental. |
| 46 | <i>Scopus e Web of Science</i> | (TEIXEIRA <i>et al.</i> , 2024) | Avaliar a fitotoxicidade aguda de um efluente têxtil bruto e tratado por processos photocatalíticos, utilizando sementes de pepino e rabanete como bioindicadores. | Tratamentos Aplicados: O efluente têxtil bruto foi submetido a processos de photocatálise heterogênea e foto-Fenton homogêneo para degradação dos poluentes presentes. Testes de Fitotoxicidade: Sementes de pepino e rabanete foram expostas a amostras do efluente bruto e tratado. Foram observadas taxas de germinação e desenvolvimento das plântulas para avaliar os efeitos fitotóxicos. | Efluente Bruto: As sementes de pepino mostraram sensibilidade ao efluente bruto, indicando toxicidade, enquanto as sementes de rabanete demonstraram maior resistência. Efluente Tratado: Após os tratamentos photocatalíticos, observou-se um aumento na taxa de germinação das sementes, sugerindo redução da fitotoxicidade. Testes Adicionais: Ensaios com cloreto de sódio e sulfato de sódio confirmaram a toxicidade dessas substâncias para ambas as espécies de sementes. Os resultados indicam que os processos de photocatálise heterogênea e foto-Fenton homogêneo são eficazes na redução da fitotoxicidade de efluentes têxteis, tornando-os menos prejudiciais para o desenvolvimento de plantas como pepino e rabanete. |
| 47 | <i>Scopus</i> | (DO CARMO DIAS <i>et al.</i> , 2024) | avaliar a eficácia da ferrita de cobalto (CoFe_2O_4) sintetizada pelo método de combustão na degradação do corante azo Direct Red 80 (DR80) em soluções aquosas. | Síntese do Catalisador: A ferrita de cobalto foi sintetizada utilizando o método de combustão, resultando em partículas esféricas com tamanho médio de 33 ± 12 nm. Caracterização: Técnicas como difração de elétrons de área selecionada (SAED) e difração de raios X (XRD) confirmaram a presença de planos cristalinos característicos da CoFe_2O_4 . Ensaios de Degradação: Foram realizados experimentos para avaliar a eficiência da degradação do DR80, incluindo testes com | Eficiência de Degradação: O catalisador CoFe_2O_4 demonstrou alta eficiência, alcançando quase 100% de remoção do DR80 em 60 minutos, mesmo após cinco ciclos de reutilização. Mecanismo de Degradação: A análise indicou que a degradação ocorreu principalmente via radicais superóxido e oxigênio singlete. Influência da Luz UV: A presença de luz UV acelerou significativamente o processo de |

| | | | | |
|----|---------------|--|--|--|
| | | | <p>adição de persulfato e exposição à luz UV para potencializar o processo.</p> | <p>degradação, reduzindo o tempo necessário para a remoção completa do corante. O estudo demonstrou que a ferrita de cobalto é um catalisador eficaz para a degradação do corante Direct Red 80 em processos Fenton-like, especialmente quando combinada com persulfato e exposição à luz UV, proporcionando uma abordagem promissora para o tratamento de efluentes têxteis contendo corantes azo.</p> |
| 48 | <i>Scopus</i> | (DEOGAONKAR-BARIDE <i>et al.</i> , 2025) | <p>avaliar a eficácia do tratamento com feixe de elétrons na degradação de poluentes presentes em efluentes reais da indústria têxtil. Este método, pertencente aos Processos Avançados de Oxidação (AOPs), utiliza elétrons acelerados para gerar espécies altamente reativas na água, promovendo a decomposição de contaminantes sem a necessidade de aditivos químicos.</p> | <p>Coleta de Amostras: Foram coletadas amostras de diferentes etapas do processo de tratamento de efluentes de uma indústria têxtil, incluindo efluentes dos processos de tingimento e impressão.</p> <p>Tratamento com Feixe de Elétrons: As amostras foram submetidas à irradiação com feixe de elétrons no Electron Beam Center (EBC) em Kharghar, Navi Mumbai, utilizando um acelerador de 10 MeV.</p> <p>Parâmetros Avaliados: Foram aplicadas doses variáveis de irradiação (0–100 kGy) e ajustados os valores de pH para estudar seus efeitos na remoção de cor e redução da DQO. Além disso, a biodegradabilidade foi avaliada através da razão DBO/DQO e de testes de biodegradação utilizando lodo ativado.</p> <p>Remoção de Cor: A irradiação com dose de 10 kGy foi eficaz na remoção da cor dos efluentes provenientes dos processos de tingimento e das entradas da estação de tratamento de efluentes (ETE).</p> <p>Redução de DQO: Embora a remoção de cor tenha sido significativa, não houve redução substancial nos valores de DQO com a dose de 10 kGy. Entretanto, doses mais elevadas e condições de pH alcalino mostraram-se mais eficazes na redução da DQO.</p> <p>Melhoria na Biodegradabilidade: A aplicação de uma dose de 2 kGy seguida de tratamento biológico resultou em uma redução mais rápida da DQO em comparação ao tratamento biológico isolado, indicando que o pré-tratamento com feixe de elétrons aumenta a biodegradabilidade dos efluentes.</p> <p>Em resumo, o tratamento com feixe de elétrons mostrou-se uma técnica promissora para a degradação de poluentes em efluentes têxteis reais, especialmente quando combinado com processos biológicos subsequentes. A otimização da dose de irradiação e do pH pode potencializar a eficiência do processo, tornando-o uma alternativa viável para o tratamento de efluentes industriais complexos.</p> |

APÊNDICE B - CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS APÓS FOTOCATÁLISE HETEROGÊNEA IRRADIADA POR LUZ SOLAR NO EFLUENTE BRUTO

| Parâmetros | Tratamento | Tempo | A1 | A2 | A3 | Média | S | Erro |
|--|------------|-------|-------|-------|-------|---------------|--------------|--------------|
| Cor (μc) | T1 | 2h | 740 | 691 | 709 | 713,33 | 20,24 | 6,75 |
| | T2 | 2h | 707 | 751 | 753 | 737 | 21,23 | 7,08 |
| | T3 | 2h | 796 | 760 | 760 | 772 | 16,97 | 5,66 |
| | T4 | 2h | 752 | 758 | 764 | 758 | 4,90 | 1,63 |
| | T5 | 4h | 756 | 762 | 768 | 762 | 4,90 | 1,63 |
| | T6 | 4h | 694 | 701 | 705 | 700 | 4,55 | 1,52 |
| | T7 | 4h | 566 | 570 | 574 | 570 | 3,27 | 1,09 |
| | T8 | 4h | 806 | 819 | 817 | 814 | 5,72 | 1,91 |
| | Tratamento | Tempo | A1 | A2 | A3 | Média | S | Erro |
| Turbidez (NTU) | T1 | 2h | 105 | 112 | 111 | 109,33 | 3,09 | 1,03 |
| | T2 | 2h | 20,8 | 21 | 22 | 21,27 | 0,52 | 0,17 |
| | T3 | 2h | 29 | 28,5 | 28,5 | 28,67 | 0,24 | 0,08 |
| | T4 | 2h | 39,2 | 38,2 | 38,6 | 38,67 | 0,41 | 0,14 |
| | T5 | 4h | 48,5 | 47,9 | 47,8 | 48,07 | 0,31 | 0,10 |
| | T6 | 4h | 41,2 | 40,7 | 40,6 | 40,83 | 0,26 | 0,09 |
| | T7 | 4h | 27,2 | 27,2 | 27,0 | 27,13 | 0,09 | 0,03 |
| | T8 | 4h | 27 | 57,2 | 57,0 | 47,07 | 14,19 | 4,73 |
| | Tratamento | Tempo | A1 | A2 | A3 | Média | S | Erro |
| Absorbância e DQO (mg.L^{-1}) | T1 | 2h | 0,111 | 0,115 | 0,220 | 0,149 | 0,050 | 0,017 |
| | T2 | 2h | 0,220 | 0,212 | - | 0,216 | 0,004 | 0,002 |
| | T3 | 2h | 0,230 | - | - | 0,230 | - | - |
| | T4 | 2h | - | 0,138 | - | 0,138 | - | - |
| | T5 | 4h | 0,179 | - | - | 0,179 | - | - |
| | T6 | 4h | - | - | - | - | - | - |
| | T7 | 4h | 0,203 | - | - | 0,203 | - | - |
| | T8 | 4h | - | - | - | - | - | - |

A1= Amostra 1; A2= Amostra 2; A3= Amostra 3; S= Desvio padrão.

A DQO utilizada foi calcula de acordo com a curva de biftalato: $3717,3 * x + 143,91$

Fonte: Autora, 2025.

APÊNDICE C - CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS APÓS FOTOCATÁLISE HETEROGÊNEA IRRADIADA POR LUZ SOLAR NO EFLUENTE TRATADO

| Parâmetros | Tratamento | Tempo | A1 | A2 | A3 | Média | S | Erro |
|--|-------------------|--------------|-----------|-----------|-----------|---------------|--------------|--------------|
| Cor (μc) | T1 | 2h | 100 | 93 | 95 | 96 | 2,94 | 0,98 |
| | T2 | 2h | 250 | 281 | 344 | 291,67 | 39,11 | 13,04 |
| | T3 | 2h | 256 | 269 | 289 | 271,33 | 13,57 | 4,52 |
| | T4 | 2h | 58 | 59 | 60 | 59 | 0,82 | 0,27 |
| | T5 | 4h | 101 | 103 | 104 | 102,67 | 1,25 | 0,42 |
| | T6 | 4h | 85 | 90 | 90 | 88,33 | 2,36 | 0,79 |
| | T7 | 4h | 282 | 283 | 283 | 282,67 | 0,47 | 0,16 |
| | T8 | 4h | 43 | 42 | 44 | 43 | 0,82 | 0,27 |
| | Tratamento | Tempo | A1 | A2 | A3 | Média | S | Erro |
| Turbidez (NTU) | T1 | 2h | 8,47 | 8,67 | 8,61 | 8,58 | 0,08 | 0,03 |
| | T2 | 2h | 5,36 | 5,59 | 5,80 | 5,58 | 0,18 | 0,06 |
| | T3 | 2h | 9,96 | 9,84 | 9,92 | 9,91 | 0,05 | 0,02 |
| | T4 | 2h | 5,94 | 5,90 | 5,88 | 5,91 | 0,02 | 0,01 |
| | T5 | 4h | 8,95 | 8,83 | 8,80 | 8,86 | 0,06 | 0,02 |
| | T6 | 4h | 6,88 | 6,81 | 6,74 | 6,81 | 0,06 | 0,02 |
| | T7 | 4h | 15 | 14,9 | 15 | 14,97 | 0,05 | 0,02 |
| | T8 | 4h | 9,81 | 9,73 | 9,75 | 9,76 | 0,03 | 0,01 |
| | Tratamento | Tempo | A1 | A2 | A3 | Média | S | Erro |
| Absorbância e DQO (mg.L^{-1}) | T1 | 2h | 0,244 | 0,428 | 0,223 | 0,298 | 0,092 | 0,031 |
| | T2 | 2h | 0,350 | - | - | 0,350 | - | - |
| | T3 | 2h | 0,152 | - | 0,367 | 0,260 | 0,108 | 0,054 |
| | T4 | 2h | - | 0,299 | 0,493 | 0,396 | 0,097 | 0,048 |
| | T5 | 4h | 0,202 | 0,249 | 0,294 | 0,248 | 0,038 | 0,013 |
| | T6 | 4h | 0,264 | 0,233 | 0,212 | 0,236 | 0,021 | 0,007 |
| | T7 | 4h | - | 0,233 | - | 0,233 | - | - |
| | T8 | 4h | 0,110 | 0,303 | 0,290 | 0,234 | 0,088 | 0,029 |

A1= Amostra 1; A2= Amostra 2; A3= Amostra 3; S= Desvio padrão.

A DQO utilizada foi calcula de acordo com a curva de biftalato: $3717,3 * x + 143,91$

Fonte: Autora, 2025.