

ANÁLISES QUÍMICAS PARA O TRATAMENTO DE EFLUENTE INDUSTRIAL FARMACÊUTICO

André Henrique Araújo Reis*

Dra. Lorena R. F. de Sousa *

Resumo: A indústria farmacêutica é reconhecida pela geração de efluentes com elevada complexidade química, contendo compostos biologicamente ativos, metabólitos e micropoluentes emergentes, que representam riscos ambientais significativos quando descartados de forma inadequada. Diante desse contexto, o presente artigo teve como objetivo analisar, por meio de revisão da literatura científica, os principais impactos ambientais associados aos efluentes farmacêuticos, bem como as tecnologias empregadas em seu tratamento, com ênfase em soluções avançadas e sustentáveis. A metodologia baseou-se em uma revisão bibliográfica de estudos publicados entre 2020 e 2025, selecionados a partir de bases científicas reconhecidas, permitindo uma análise qualitativa dos métodos de tratamento, aspectos regulatórios e estratégias de monitoramento. Os resultados indicam que os sistemas convencionais de tratamento, embora eficientes na remoção de parâmetros físico-químicos clássicos, apresentam limitações quanto à remoção de micropoluentes farmacêuticos. Em contrapartida, tecnologias como filtração por membranas, adsorção com carvão ativado e processos oxidativos avançados demonstram maior eficiência, especialmente quando aplicadas de forma integrada. Observou-se, ainda, a existência de lacunas na legislação ambiental brasileira no que se refere a parâmetros específicos para esses contaminantes. Portanto a mitigação dos impactos ambientais dos efluentes farmacêuticos exige abordagens integradas, aliando inovação tecnológica, monitoramento eficiente e avanços regulatórios, de modo a promover a proteção dos recursos hídricos e a sustentabilidade ambiental.

Palavras-chave: Efluentes farmacêuticos; Química analítica; Tratamento de efluentes; Contaminantes emergentes; Monitoramento ambiental

* Instituto de Química – UFCAT: andre.reis@semed.manaus.am.gov.br; orientadora: lorennarf@ufcat.edu.br

INTRODUÇÃO

A indústria farmacêutica desempenha papel fundamental na promoção da saúde e no desenvolvimento socioeconômico, sendo responsável pela produção de medicamentos indispensáveis à prevenção, ao tratamento e ao controle de diversas enfermidades. Contudo, paralelamente aos benefícios gerados por esse setor, observa-se a produção significativa de resíduos líquidos provenientes de diferentes etapas do processo industrial, como a síntese de fármacos, a formulação de produtos, a limpeza de equipamentos e o descarte de matérias-primas e solventes. Esses efluentes apresentam composição complexa, frequentemente caracterizada pela presença de compostos orgânicos, substâncias biologicamente ativas, solventes, metais pesados e microrganismos, o que exige atenção especial quanto ao seu tratamento e ao destino final.

A presença de fármacos e de seus metabólitos em corpos hídricos tem se consolidado como uma preocupação ambiental crescente, uma vez que muitos desses compostos são considerados contaminantes emergentes. Mesmo em baixas concentrações, essas substâncias podem provocar efeitos adversos em organismos aquáticos, interferir em processos ecológicos e contribuir para o desenvolvimento da resistência antimicrobiana. Além disso, sistemas convencionais de tratamento de efluentes nem sempre são plenamente eficazes na remoção desses contaminantes, favorecendo sua persistência no ambiente aquático e ampliando os riscos à saúde humana e aos ecossistemas.

Nesse cenário, destaca-se a importância da química analítica como ferramenta essencial para a caracterização, o monitoramento e a avaliação da eficiência dos processos de tratamento de efluentes industriais farmacêuticos. A diversidade crescente de fármacos e a complexidade de seus resíduos demandam o aprimoramento contínuo das técnicas analíticas voltadas à detecção e quantificação desses compostos. Embora a literatura científica apresente avanços significativos nessa área, tais estudos encontram-se, muitas vezes, dispersos, o que evidencia a necessidade de sistematização e análise crítica das informações disponíveis.

Sob a perspectiva ambiental, o descarte inadequado de efluentes farmacêuticos representa uma ameaça direta à qualidade dos recursos hídricos e à integridade dos ecossistemas aquáticos. Do ponto de vista social, a contaminação da

água por fármacos pode impactar a saúde pública, especialmente em regiões onde a água tratada é destinada ao abastecimento humano ou a atividades agrícolas. Assim, o uso de análises químicas confiáveis torna-se fundamental tanto para o atendimento às normas ambientais vigentes quanto para o suporte à tomada de decisões relacionadas à gestão ambiental e à sustentabilidade das atividades industriais.

Diante da complexidade dos efluentes gerados pela indústria farmacêutica e dos desafios associados ao seu tratamento, emerge a necessidade de compreender como a produção científica tem abordado o uso das análises químicas nesse contexto, bem como quais técnicas analíticas têm se mostrado mais eficazes na detecção de contaminantes e no acompanhamento da eficiência dos processos de tratamento. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho é analisar e discutir, com base na literatura científica, as técnicas de química analítica aplicadas à caracterização e ao tratamento de efluentes industriais farmacêuticos, bem como seus impactos ambientais, contribuindo para a consolidação de práticas mais seguras e sustentáveis no monitoramento ambiental desse setor.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Efluentes da Indústria Farmacêutica

Os efluentes gerados pela indústria farmacêutica decorrem de múltiplas etapas do processo produtivo. De acordo com Saviano (2022), essas etapas incluem a síntese de ingredientes farmacêuticos ativos (IFAs), a formulação de medicamentos, a lavagem de reatores e tubulações, as purgas de utilidades, a limpeza de pisos e áreas classificadas, além de descargas associadas a perdas de matéria-prima e solventes. Segundo Gomes (2024), em razão da diversidade de rotas sintéticas e do uso intensivo de água e reagentes, esses efluentes apresentam elevada variabilidade sazonal e operacional, o que dificulta a padronização e a eficiência dos processos de tratamento.

Quanto à composição, segundo Escher (2019) são frequentemente relatados resíduos de antibióticos, anti-inflamatórios, hormônios e outros fármacos, além de metabólitos e subprodutos de síntese. Também são comuns compostos orgânicos recalcitrantes e solventes (por exemplo, alcoóis, cetonas, aromáticos), com potencial

de elevar a carga orgânica e a toxicidade do efluente. Pacheco (2025) afirma que em alguns cenários industriais, há ainda registro de metais associados a catalisadores e etapas de síntese, bem como sais e agentes auxiliares.

Impactos Ambientais

Um aspecto crítico associado aos efluentes farmacêuticos é a persistência ambiental de muitos compostos, sobretudo aqueles com alta estabilidade química e baixa biodegradabilidade. Para Moreira (2025) mesmo após tratamento convencional, concentrações residuais podem permanecer e alcançar corpos hídricos, onde interagem com organismos e matrizes ambientais, favorecendo transporte, transformação e possível bioacumulação, a depender das propriedades físico-químicas e das condições do meio.

Além disso, o descarte inadequado de efluentes que contêm antibióticos tem sido relacionado ao aumento da resistência antimicrobiana (RAM) no ambiente. Isso ocorre porque esses resíduos favorecem a pressão seletiva sobre microrganismos e facilitam a transferência horizontal de genes de resistência em ambientes aquáticos e em estações de tratamento de efluentes. Como destaca Macuácuá (2022), os efluentes industriais, especialmente aqueles oriundos de plantas farmacêuticas, podem funcionar como verdadeiros ambientes disseminação de bactérias resistentes e de genes de resistência, ampliando os riscos tanto para os ecossistemas quanto para a saúde pública.

Legislação e Normas Ambientais

No Brasil, a Resolução CONAMA nº 430/2011 estabelece condições, parâmetros e diretrizes para o lançamento de efluentes em corpos receptores, complementando e atualizando disposições relacionadas ao controle de qualidade ambiental em recursos hídricos. Embora a norma seja essencial para o controle de aspectos gerais do lançamento, ela não define, de forma específica, limites numéricos para a grande diversidade de fármacos e metabólitos como contaminantes

emergentes, reforçando a necessidade de monitoramento direcionado por meio de métodos analíticos sensíveis (Brasil, 2011).

No âmbito sanitário, a RDC ANVISA nº 306/2004 regulamenta o gerenciamento de resíduos de serviços de saúde, abrangendo resíduos com potencial risco biológico e químico, incluindo materiais associados a medicamentos e atividades de saúde. Apesar de contribuir para organização e responsabilização no manejo de resíduos, ainda persistem desafios quando se trata do controle específico de contaminantes farmacêuticos em efluentes líquidos industriais e urbanos (Brasil, 2004).

Métodos de Tratamento Descritos na Literatura

Segundo Ferreira (2021), os métodos convencionais mais relatados para efluentes farmacêuticos incluem processos biológicos (como lodos ativados) e físico-químicos (como coagulação-floculação). Embora sejam amplamente aplicados por custo e maturidade tecnológica, podem apresentar eficiência limitada para compostos recalcitrantes e micropoluentes, sobretudo quando a matriz do efluente possui alta toxicidade, variação de carga orgânica e presença de solventes e antibióticos.

Diante dessas limitações, cresce o interesse por tecnologias avançadas e combinações (tratamentos híbridos). Para Albuquerque (2020), entre elas, destacam-se os Processos Oxidativos Avançados (POAs), como ozonização, processos Fenton/foto-Fenton e fotocátalise, devido à capacidade de degradar moléculas persistentes e, em muitos casos, promover mineralização parcial ou total.

Sousa (2025), aponta, entretanto, que variáveis operacionais (pH, matriz, consumo energético, formação de subprodutos) e questões de escalonamento e custos ainda são barreiras importantes para aplicação plena em larga escala (HÜBNER et al., 2024; AZIZ et al., 2025).

No trabalho de Nóbrega (2016) tecnologias por membranas (como nanofiltração e osmose reversa) são destacadas por elevada eficiência de separação e potencial para reuso de água, porém podem ter custos mais elevados, maior demanda energética e desafios relacionados ao fouling e ao manejo do concentrado/rejeito.

A adsorção em carvão ativado e materiais alternativos aparece como opção versátil e relativamente simples, com bons resultados para várias classes de

fármacos; contudo, seu desempenho depende de propriedades do adsorvente, competição na matriz e estratégias de regeneração/descarta do material, o que impacta custo e sustentabilidade do processo (Melo et al., 2024).

Em síntese, a literatura converge para a ideia de que efluentes farmacêuticos frequentemente exigem arranjos integrados (por exemplo, tratamento biológico + Processos Oxidativos Avançados + adsorção/membranas), desenhados conforme a classe de contaminantes e as metas de remoção/reuso.

Química Analítica Aplicada ao Monitoramento de Efluentes

No trabalho de Aguiar (2025) o monitoramento de efluentes envolve parâmetros físico-químicos básicos, como pH, turbidez, sólidos suspensos, DBO e DQO, que são essenciais para avaliar carga orgânica, estabilidade do processo e conformidade com diretrizes de lançamento. A Resolução CONAMA nº 430/2011 dá suporte a esse controle ao estabelecer condições e parâmetros gerais para a gestão do lançamento de efluentes, o que torna esses indicadores fundamentais para rotinas de controle e auditoria ambiental (BRASIL, 2011).

Para Melo (2024), entretanto, para contaminantes farmacêuticos em baixas concentrações, a literatura aponta a necessidade de técnicas instrumentais com elevada sensibilidade e seletividade. Entre as mais empregadas destacam-se: cromatografia líquida (HPLC/UHPLC), frequentemente acoplada à espectrometria de massas em tandem (LC-MS/MS); cromatografia gasosa acoplada à espectrometria de massas (GC-MS) para analitos compatíveis; espectrometria de massas de alta resolução (HRMS) para triagem e identificação de compostos e subprodutos; além de espectrofotometria UV-Vis em aplicações mais gerais e métodos eletroquímicos em propostas de monitoramento rápido e/ou de menor custo.

De modo geral, LC-MS/MS é frequentemente destacada como referência para quantificação de fármacos e metabólitos em matrizes complexas, enquanto HRMS vem ganhando espaço na detecção não-alvo (screening) e na investigação de produtos de transformação. A seleção da técnica, contudo, depende do objetivo (triagem vs. quantificação), do limite de detecção requerido, da classe do composto, da disponibilidade instrumental e do custo por amostra.

Eficiência do Tratamento Avaliada Por Análises Químicas

De acordo com Silva (2017), a avaliação da eficiência do tratamento de efluentes farmacêuticos não deve se restringir à redução de DQO/DBO, pois é possível observar boa remoção de carga orgânica global sem, necessariamente, remover micropoluentes específicos. Por isso, a literatura reforça a necessidade de integrar indicadores clássicos (DQO, DBO, sólidos, pH) com quantificação direta de fármacos, metabólitos e produtos de transformação, além de análises complementares (por exemplo, ecotoxicidade e indicadores associados à resistência antimicrobiana, quando aplicável)

Em termos críticos, Ribeiro (2016) sugere que:

- ✓ Compostos mais biodegradáveis podem responder bem a sistemas biológicos;
- ✓ Moléculas recalcitrantes e persistentes tendem a demandar etapas avançadas (POAs, membranas e/ou adsorção);
- ✓ Antibióticos exigem atenção especial pelo risco de seleção de resistência, tornando relevante combinar remoção química com monitoramento direcionado por LC-MS/MS/HRMS e, quando previsto no escopo do estudo, indicadores relacionados à RAM.

Assim, a eficiência é melhor compreendida quando os resultados analíticos são interpretados por classe de fármaco (antibióticos, hormônios, anti-inflamatórios etc.) e por tecnologia aplicada, permitindo discutir não apenas “remoção”, mas também risco residual e adequação do efluente tratado aos usos e padrões de descarte.

METODOLOGIA

Nossa pesquisa, no que tange à abordagem, classifica-se como qualitativa, pois esse tipo de pesquisa, não se preocupa com representatividade numérica, mas, sim, com o aprofundamento da compreensão de um grupo social, de uma organização, etc. Os pesquisadores que adotam a abordagem qualitativa opõem-se ao pressuposto que defende um modelo único de pesquisa para todas as ciências, já que as ciências sociais têm sua especificidade, o que pressupõe uma metodologia própria” (Gerhardt; Silveira, 2009), e foi desenvolvida por meio de uma pesquisa de revisão bibliográfica. A escolha desse tipo de pesquisa se justifica pela necessidade

de analisar e discutir, com base na literatura científica, as técnicas de química analítica aplicadas à caracterização e ao tratamento de efluentes industriais farmacêuticos, bem como seus impactos ambientais,

Em relação aos objetivos, entendemos que nossa pesquisa se caracteriza como exploratória, pois “Este tipo de pesquisa tem como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a construir hipóteses” (Gerhardt; Silveira, 2009).

Em nosso estudo, adotou-se a revisão bibliográfica como procedimento metodológico central, considerando sua pertinência para a sistematização, análise e interpretação crítica do conhecimento já produzido sobre a temática investigada. Tal abordagem permitiu reunir e examinar contribuições teóricas relevantes, com o propósito de identificar os principais contaminantes relatados em efluentes da indústria farmacêutica; levantar as análises químicas utilizadas para a caracterização desses efluentes e avaliar os métodos de tratamento discutidos na literatura científica;

Além disso, a análise das produções selecionadas permitiu estabelecer uma relação consistente entre os resultados obtidos e as implicações ambientais decorrentes do descarte de efluentes farmacêuticos, evidenciando os potenciais riscos aos ecossistemas.

Por meio dessa pesquisa, foi possível mapear o estado da arte sobre o tema e identificar lacunas na literatura que podem ser aprofundadas em estudos futuros.

A pesquisa bibliográfica é feita a partir do levantamento de referências teóricas já analisadas, e publicadas por meios escritos e eletrônicos, como livros, artigos científicos, páginas de web sites. Qualquer trabalho científico inicia-se com uma pesquisa bibliográfica, que permite ao pesquisador conhecer o que já se estudou sobre o assunto. Existem, porém, pesquisas científicas que se baseiam unicamente na pesquisa bibliográfica, procurando referências teóricas publicadas com o objetivo de recolher informações ou conhecimentos prévios sobre o problema a respeito do qual se procura a resposta (Fonseca, 2002 apud Gerhardt; Silveira, 2009).

A pesquisa bibliográfica foi realizada a partir de fontes secundárias, como artigos científicos, dissertações, teses e publicações de periódicos especializados

Percurso Metodológico

O percurso metodológico desta pesquisa foi desenvolvido em etapas, de acordo com a metodologia de revisão bibliográfica adotada. As etapas a seguir descrevem o processo desde a definição dos critérios de seleção de fontes até a análise dos dados coletados.

A primeira etapa consistiu na definição das fontes de pesquisa, que foram extraídas da base de dados acadêmica: Google Acadêmico e Periódicos CAPES e na escolha das palavras-chave: Efluentes farmacêuticos; Química analítica; Tratamento de efluentes; Contaminantes emergentes; Monitoramento ambiental. A partir dessas palavras, elaboramos o descritor a ser utilizado nas buscas: ("Indústria farmacêutica" OR Fármacos) AND ("Análises químicas" OR "Química analítica") AND ("Tratamento de efluentes"). Tendo como resultados, 1.310 pesquisas, entre artigos, trabalhos de conclusão de curso e dissertações.

Em seguida, definimos os critérios de exclusão e de inclusão. Como critério de exclusão, utilizamos um filtro temporal, delimitado entre os anos de 2020 e 2025, que resultou na eliminação de 927 trabalhos, reduzindo o total para 383 obras.

O recorte temporal de 2020 a 2025 foi adotado por representar um período de intensificação das pesquisas relacionadas aos efluentes industriais farmacêuticos, aos contaminantes emergentes e aos impactos ambientais associados ao seu descarte. Segundo Costa (2023) e Oliveira (2025) a partir de 2020, observa-se um crescimento significativo de estudos voltados à aplicação de técnicas avançadas de química analítica, como cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas, impulsionado pela necessidade de maior sensibilidade e seletividade na detecção de fármacos e seus metabólitos em matrizes aquáticas complexas.

Além disso de acordo com Campos (2025), esse período concentra discussões mais recentes sobre resistência antimicrobiana e a identificação de efluentes farmacêuticos como potenciais fontes de disseminação de genes de resistência, tema amplamente abordado após 2020.

Assim, a delimitação temporal adotada permite reunir estudos que refletem o estado atual do conhecimento científico, tecnológico e metodológico, garantindo que a revisão de literatura esteja alinhada às práticas mais recentes e relevantes para a avaliação ambiental de efluentes industriais farmacêuticos.

Em seguida, aplicou-se o segundo critério de exclusão, que consistiu em descartar pesquisas que não abordavam diretamente o Tratamento de Efluente

Industrial Farmacêutico. Nessa etapa, foram excluídos 320 trabalhos, restando 63 pesquisas para análise.

Definido o critério de exclusão, passamos para o critério de inclusão, que consistiu em selecionar apenas os trabalhos que contemplassem nossas palavras-chave e que tivessem relação direta com nossa temática. Com base nesse filtro, cinquenta e cinco (55) trabalhos foram excluídos por não atenderem a esse requisito.

Os trabalhos selecionados foram organizados cronologicamente, a fim de facilitar a análise e comparação. Para melhor sistematização, um quadro foi elaborado, no qual foram registrados os dados principais de cada artigo, como o ano de publicação, autor(es), título e tipo de trabalho.

Na terceira etapa finalizamos nosso levantamento, após aplicar o critério de exclusão e o critério de inclusão, com 10 trabalhos selecionados. Todos os documentos que foram analisados estão apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 – Dados bibliográficos

	Ano	Título	Autores	Tipo
1	2020	Panorama da pesquisa sobre tratamento e reúso de efluentes da indústria de antibióticos	ROCHA, Antônio Carlos de Lima; KLIGERMAN, Débora Cynamon; OLIVEIRA, Jaime Lopes da Mota.	Artigo
2	2021	Avaliação de Estação de Tratamento de Efluentes Com Foco em Melhoria da Qualidade da Água de Reuso: Estudo de Caso em uma Indústria Farmacêutica	CUNHA, Rodrigo J. Gonçalves; NAKADA, Liane Yuri Kondo; LONGO, Regina Márcia; URBAN, Rodrigo Custodio	Artigo
3	2021	Estimativa de custos do tratamento de efluentes da indústria farmacêutica por osmose inversa	PEREIRA, Eduardo Maksoud Torrecilha Borges	TCC
4	2022	Efluentes na indústria farmacêutica: aspectos regulatórios e principais métodos de tratamento	SAVIANO, Camila Gonso; DAHER, Maria Carolina Frade; GIORGETTI, Leandro	Artigo

5	2023	Tratamento de Efluente Farmacêutico por Meio de Processo Anaeróbio e Processos Oxidativos Avançados em Reator de Leito Fluidizado	MARTINS, Fernanda Lisboa; TERAN, Francisco J. Cuba; BACELAR, Juliana Miranda; CUBA, Renata Medici Frayne; COSTA, Jordana Fernandes.	Artigo
6	2023	Desempenho de um reator Aeróbio Anóxico operado em batelada sequencial para o tratamento de efluentes de indústria farmacêutica	TERAN, Francisco J. Cuba; BITTAR, Mona Grimouth; CUBA, Renata M. Frayne.	Artigo
7	2024	Micropoluentes farmacêuticos: presença e eficiência de remoção de fármacos em estações de tratamento de esgoto no Brasil	ANTELO, Matheus Ribas Gerpe	TCC
8	2024	Predição da condutividade da água purificada para uso na indústria farmacêutica	FERNANDES, Ítalo Oliveira	Dissertação
9	2024	Estudo Reflexivo Sobre a Tecnologia de Membrana Para Filtração e Tratamento de Água e Efluente em Setores Produtivos	OLIVEIRA, Anderson Fernandes et al	Artigo
10	2005	Produção do carvão ativado, a partir das podas do Ziziphus Joazeiro e avaliação da utilização no tratamento de efluentes residenciais de Crateús.	ALVES, Alessandra Oliveira Timbó	TCC

Fonte: Elaborado pelo autor

RESULTADOS

Dedicamos esta seção para apresentar os resultados das análises feitas, bem como descrever a revisão bibliográfica de cada um dos trabalhos selecionados. No quadro 2 podemos verificar uma descrição breve dos objetivos de cada trabalho selecionado.

Quadro 2 – Objetivos

Autores	Objetivos
ROCHA, Antônio Carlos de Lima; et al. (2022)	Analisaram a produção científica sobre tratamento e reúso de efluentes de antibióticos, destacando riscos ambientais.
CUNHA, Rodrigo J. Gonçalves; et al. (2021)	Avaliaram a eficiência de estações de tratamento com foco no reúso da água.
PEREIRA, Eduardo Maksoud T. Borges (2021)	Discutiu a viabilidade econômica da osmose inversa
SAVIANO, Camila Gonso; et al. (2022)	Analisaram aspectos regulatórios e métodos de tratamento
MARTINS, Fernanda Lisboa; et al. (2023)	Analisaram a remoção de micropoluentes farmacêuticos por processos anaeróbios combinados a processos oxidativos avançados, evidenciando a eficácia de soluções integradas.
TERAN, Francisco J. Cuba; et al. (2023)	Evidenciaram a eficiência de processos biológicos associados a tecnologias avançadas como alternativas seguras para a mitigação dos impactos ambientais.
ANTELO, Matheus R. Gerpe (2024)	Analisou a ocorrência e os impactos ambientais de micropoluentes emergentes em ambientes aquáticos.
FERNANDES, Ítalo Oliveira (2024)	Avaliou modelos preditivos aplicados à condutividade elétrica como ferramenta de monitoramento da qualidade dos efluentes.
OLIVEIRA, Anderson Fernandes et al. (2024)	Discutiram o uso da tecnologia de membranas no tratamento de água e efluentes industriais, com destaque para o setor farmacêutico.
ALVES, Alessandra O. Timbó (2025)	Avaliou a eficiência do carvão ativado de origem vegetal como alternativa sustentável e de baixo custo para o tratamento de efluentes.

Fonte: Elaborado pelo autor

Rocha, Kligerman e Oliveira (2020) apresentaram um panorama da produção científica sobre o tratamento e o reúso de efluentes da indústria de antibióticos, destacando os riscos ambientais associados à liberação de compostos biologicamente ativos. Os autores evidenciam que os tratamentos convencionais são limitados na remoção de antibióticos e seus metabólitos, o que pode contribuir para a resistência antimicrobiana. Além disso, apontam que o reúso de efluentes ainda é pouco explorado no setor farmacêutico brasileiro, em função de barreiras regulatórias,

custos operacionais e da ausência de diretrizes específicas.

Cunha et al. (2021) demonstraram que a otimização de estações de tratamento de efluentes em indústrias farmacêuticas pode resultar em melhorias significativas na qualidade da água tratada, possibilitando seu reúso em atividades não potáveis. Apesar da eficiência observada na redução de parâmetros como DQO, DBO e sólidos suspensos, os autores ressaltam a necessidade de monitoramento contínuo, uma vez que micropoluentes farmacêuticos podem permanecer no efluente mesmo quando os padrões legais são atendidos.

Pereira (2021) destacou a osmose inversa como uma tecnologia altamente eficiente para o polimento de efluentes farmacêuticos, especialmente na remoção de sais e micropoluentes. No entanto, o estudo evidencia que os custos de implantação e operação representam um entrave à sua aplicação em larga escala. Complementarmente, Saviano et al. (2022), Martins et al. (2023) e Teran et al. (2023) reforçam que a combinação de métodos físicos, químicos e biológicos, incluindo processos oxidativos avançados e reatores biológicos otimizados, constitui uma estratégia eficaz e ambientalmente segura para o tratamento de efluentes farmacêuticos, sobretudo diante das lacunas regulatórias existentes.

Antelo (2024) analisou a ocorrência e a persistência de micropoluentes emergentes em ambientes aquáticos, evidenciando que compostos farmacêuticos e outros contaminantes, mesmo em baixas concentrações, apresentam elevado potencial ecotoxicológico. O autor destaca que os sistemas convencionais de tratamento são limitados na remoção desses compostos, reforçando a necessidade de tecnologias complementares e abordagens integradas para reduzir os riscos ambientais associados aos efluentes complexos.

Fernandes (2024) investigou o uso da condutividade elétrica como ferramenta preditiva para o monitoramento e a gestão da qualidade de efluentes. O estudo demonstra que modelos matemáticos podem auxiliar no controle operacional dos sistemas de tratamento, reduzindo custos e aumentando a eficiência do monitoramento ambiental. Essa abordagem se mostra especialmente relevante para efluentes farmacêuticos, cuja composição variável dificulta o acompanhamento contínuo por métodos tradicionais.

Oliveira et al. (2024) discutiram a aplicação da tecnologia de membranas no tratamento de água e efluentes industriais, destacando sua elevada eficiência e o

potencial para o reúso da água, apesar dos desafios relacionados a custos e manutenção. Complementarmente, Alves (2025) evidenciou a eficiência do carvão ativado de origem vegetal como alternativa sustentável e de baixo custo para o tratamento de efluentes, reforçando a importância de soluções tecnológicas que conciliem desempenho ambiental, viabilidade econômica e sustentabilidade.

DISCUSSÕES

Os resultados deste estudo evidenciam que o tratamento de efluentes da indústria farmacêutica continua sendo um desafio ambiental significativo, principalmente em função da complexidade química desses efluentes e da presença de micropoluentes persistentes. Embora os sistemas convencionais sejam eficazes na remoção de parâmetros clássicos, como DBO, DQO e sólidos suspensos, a literatura analisada demonstra que eles apresentam limitações importantes na remoção de compostos farmacêuticos, hormônios e contaminantes emergentes.

Diante desse cenário, os estudos reforçam a necessidade de tecnologias complementares e integradas, capazes de ampliar a eficiência dos sistemas de tratamento. Processos avançados, como filtração por membranas, adsorção e processos oxidativos avançados, destacam-se como alternativas eficazes na mitigação dos impactos ambientais. No entanto, apesar da elevada eficiência técnica, essas tecnologias ainda enfrentam desafios relacionados a custos, manutenção e viabilidade operacional, especialmente em indústrias de médio e pequeno porte, o que demanda planejamento cuidadoso e integração entre diferentes etapas de tratamento.

Além dos aspectos tecnológicos, a análise evidencia a importância do monitoramento contínuo e do aprimoramento do arcabouço regulatório. Ferramentas preditivas e indicadores complementares surgem como estratégias relevantes para o controle da qualidade dos efluentes, enquanto as lacunas na legislação brasileira reforçam a necessidade de normas mais específicas para micropoluentes farmacêuticos. Assim, a mitigação dos impactos ambientais desses efluentes requer uma abordagem sistêmica, que integre inovação tecnológica, monitoramento eficiente e avanços regulatórios, fortalecendo a articulação entre ciência, tecnologia e políticas públicas.

CONCLUSÕES

Este estudo possibilitou uma análise integrada da literatura recente sobre o tratamento de efluentes da indústria farmacêutica, evidenciando os desafios ambientais associados ao descarte inadequado desses efluentes. A complexidade de sua composição, marcada pela presença de micropoluentes persistentes, demonstra que os sistemas convencionais de tratamento, embora eficazes para parâmetros clássicos, não são suficientes para garantir a proteção ambiental.

Os trabalhos analisados indicam que a adoção de tecnologias complementares e integradas, como filtração por membranas, adsorção e processos oxidativos avançados, amplia significativamente a eficiência dos sistemas de tratamento. Destaca-se, ainda, o potencial de soluções sustentáveis e de menor custo, como o uso de carvão ativado de origem vegetal, que se mostram alternativas viáveis para a redução da carga poluidora e para a promoção do uso mais racional dos recursos hídricos.

Outro aspecto relevante refere-se à necessidade de aprimoramento do monitoramento da qualidade dos efluentes, incorporando indicadores e ferramentas preditivas que auxiliem no controle operacional e na prevenção de impactos ambientais. Além disso, a análise evidencia lacunas na legislação ambiental brasileira, sobretudo no que diz respeito à ausência de parâmetros específicos para micropoluentes farmacêuticos, o que reforça a urgência de avanços normativos alinhados às evidências científicas.

Portanto, a mitigação dos impactos ambientais dos efluentes farmacêuticos exige uma abordagem integrada, aliando inovação tecnológica, monitoramento eficiente e políticas públicas atualizadas, contribuindo para a proteção dos recursos hídricos e da saúde ambiental.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, Brenda Nunes de. **Análise de dimensionamento de estação de tratamento de efluentes de uma indústria de avicultura**. 2025. 109 f. TCC (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Ceará,

Fortaleza, 2025. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/80848>.

Acesso em: 02 jan. 2026.

ALBUQUERQUE, Maria V. da Conceição et al. Remoção de cianobactérias e cianotoxinas presentes em águas de reservatórios eutrofizados por processos oxidativos avançados (POAs) / Removal of cyanbacteria and cyanotoxins present in waters from eutrophized reservoir by advanced oxidative process (AOPs). **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 6, n. 8, p. 61234–61248, 2020. DOI: 10.34117/bjdv6n8-514. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/15469>.

Acesso em: 01 jan. 2026.

ALVES, Alessandra Oliveira Timbó. **Produção do carvão ativado, a partir das podas do Ziziphus Joazeiro e avaliação da utilização no tratamento de efluentes residenciais de Crateús**. 2025. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Campus de Crateús, Universidade Federal do Ceará, Crateús, 2025. Disponível em: Acesso em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/82260>. Acesso em: 09 jan. 2026.

ANTELO, Matheus Ribas Gerpe. **Micropoluentes farmacêuticos: presença e eficiência de remoção de fármacos em estações de tratamento de esgoto no brasil**. 2024. 74 f. TCC (Graduação) - Curso de Química Industrial, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2024. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/25606>. Acesso em: 09 jan. 2026.

BRASIL. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (**ANVISA**). Resolução da Diretoria Colegiada - RDC nº 306, de 7 de dezembro de 2004. Disponível em: <https://acesse.one/mcSVc>. Acesso em: 22 dez. 2025.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (**CONAMA**). Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&view=processo&id=1835. Acesso em: 22 dez. 2025.

CAMPOS, Roger Francisco Ferreira de; PAGIORO, Thomaz Aurélio. Compostos emergentes: características, fontes de geração e presença no meio ambiente. **Natural Resources**, [S. l.], v. 15, n. 1, p. e8636, 2025. DOI: 10.6008/CBPC2237-9290.2025.001.0001. Disponível em:

<https://www.sustenere.inf.br/index.php/naturalresources/article/view/8636>.

Acesso em: 07 jan. 2026.

- COSTA, Rafaela dos Santos. **Contaminantes emergentes: uma abordagem ecológica, sanitária e social da poluição por fármacos**. Orientador: Júlio Alejandro Navoni. 2023. 321f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Centro de Biociências, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/53570>. Acesso em: 06 jan. 2026.
- CUNHA, Rodrigo J. Gonçalves; NAKADA, Liane Yuri Kondo; LONGO, Regina Márcia; URBAN, Rodrigo Custodio. Avaliação de Estação de Tratamento de Efluentes Com Foco em Melhoria da Qualidade da Água de Reuso: Estudo de Caso em uma Indústria Farmacêutica. **Revista AIDIS de ingeniería y ciencias ambientales: Investigación, desarrollo y práctica**, [S. l.], v. 14, n. 3, p. 1413–1428, 2021. Disponível em: <https://revistas.unam.mx/index.php/aidis/article/view/76528>. Acesso em: 08 jan. 2026.
- ESCHER, Maya Andria da Silva; PINHEIRO, Juliana Heloisa Pinê Américo; TORRES, Nádia Hortense; FERREIRA, Luiz Fernando Romanholo. O PROBLEMA AMBIENTAL DA CONTAMINAÇÃO DE RECURSOS HÍDRICOS POR PRODUTOS FARMACÊUTICOS. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, Rio de Janeiro, n. 51, pág. 141–148, 2019. DOI: 10.5327/Z2176-947820190469. Disponível em: https://www.rbciamb.com.br/Publicacoes_RBCIAMB/article/view/469. Acesso em: 20 dez. 2025.
- FERNANDES, Ítalo Oliveira. **Predição da condutividade da água purificada para uso na indústria farmacêutica**. Orientador: Dr. Daniel Sabino Amorim de Araújo. 2024. 153f. Dissertação (Mestrado Profissional em Tecnologia da Informação) - Instituto Metrôpole Digital, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/60577>. Acesso em: 09 jan. 2026.
- FERREIRA, Ana Carla da Fonseca. **Remoção de matéria orgânica de efluente de carcinicultura por meio de tratamento físico-químico (coagulação-floculação) e biológico (lodo ativado)**. 2021. 90f. Dissertação (Mestrado em

- Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/45777>. Acesso em: 28 dez. 2025.
- GERHARDT, Tatiana Engel; SILVEIRA, Denise Tolfo. **Métodos de Pesquisa**, Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2009. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/cursopgdr/downloadsSerie/derad005.pdf>. Acesso em: 05 jan. 2026.
- GOMES, Diony do Nascimento. **O efeito das variações sazonais nos parâmetros de qualidade de uma estação de tratamento de água no Ceará**. 2024. 64 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2024. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/79236>. Acesso em: 20 dez. 2025.
- MACUÁCUA, Xadrique Vitorino. **Análise espacial da produção de plantas medicinais prioritárias no estado do Amazonas**. 2022. 125 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Ambiente e Sustentabilidade na Amazônia) - Universidade Federal do Amazonas, Manaus (AM), 2022. Disponível em: <https://tede.ufam.edu.br/handle/tede/9224>. Acesso em: 21 dez. 2025.
- MARTINS, Fernanda Lisboa; TERAN, Francisco J. Cuba; BACELAR, Juliana Miranda; CUBA, Renata Medici Frayne; COSTA, Jordana Fernandes. Tratamento de Efluente Farmacêutico por Meio de Processo Anaeróbio e Processos Oxidativos Avançados em Reator de Leito Fluidizado. **Cuadernos de Educación y Desarrollo - QUALIS A4**, [S. l.], v. 15, n. 5, p. 4280–4291, 2023. DOI: 10.55905/cuadv15n5-020. Disponível em: <https://ojs.cuadernoseducacion.com/ojs/index.php/ced/article/view/1262>. Acesso em: 08 jan. 2026.
- MELO, Lucyana Santos de Mendonça. **Caracterização química e identidade genética de Dalbergia ecastaphyllum para produção de extratos padronizados**. 2016. 111 f. Tese (Pós-Graduação em Biotecnologia) - Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2016. Disponível em: <https://ri.ufs.br/handle/riufs/3269>. Acesso em: 02 jan. 2026.
- MELO, Samara Farias de. **Adsorção de hidroxiclороquina de efluentes aquosos utilizando o carvão ativado de eucalipto**. 2024. 49 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Centro de Tecnologia,

Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2024. Disponível em: <http://www.repositorio.ufal.br/jspui/handle/123456789/14337>. Acesso em: 02 jan. 2026.

MOREIRA, Emerson Ribeiro. **Análise da biossustentabilidade em recursos hídricos para mitigação de impactos ambientais pelo lançamento de efluentes domésticos em corpos hídricos na região de Araraquara/SP.** 2025. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia de Biomateriais e Bioprocessos) – Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Farmacêuticas, Araraquara, 2025. Disponível em: <https://hdl.handle.net/11449/295985>. Acesso em: 21 dez. 2025.

NÓBREGA, Romerito Moraes da. **Eficiência de membranas filtrantes de nanofiltração e osmose inversa no pós-tratamento de esgoto doméstico.** 2016. 48 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil), Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/40551>. Acesso em: 01 jan. 2026.

OLIVEIRA, Anderson Fernandes et al. Estudo Reflexivo Sobre a Tecnologia de Membrana Para Filtração e Tratamento de Água e Efluente em Setores Produtivos. **Revista Contemporânea**, [S. l.], v. 4, n. 7, p. e4990, 2024. DOI: 10.56083/RCV4N7-038. Disponível em: <https://ojs.revistacontemporanea.com/ojs/index.php/home/article/view/4990>. Acesso em: 09 jan. 2026.

OLIVEIRA, Jonas Victor Rocha. **Análise comparativa de processos oxidativos avançados em tratamento de efluentes e águas residuárias.** 2025. 52 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) — Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2025. Disponível em: <http://repositorio.ufc.br/handle/riufc/82590>. Acesso em: 06 jan. 2026.

PACHECO, Gabriele N.; PEREIRA, Félix M.; GUIMARÃES, Daniela HP. Simplification of transesterification kinetics in biodiesel production using statistical criteria. **Chemical Engineering Communications**, p. 1-26, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/00986445.2025.2502773>. Acesso em: 20 dez. 2025.

- PEREIRA, Eduardo Maksoud Torrecilha Borges. **Estimativa de custos do tratamento de efluentes da indústria farmacêutica por osmose inversa**. 2021. 52 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia Química) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2021. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/13864>. Acesso em: 08 jan. 2026.
- RIBEIRO, Libânia da Silva et al. Monitoramento físico-químico de um biorreator com resíduos sólidos urbanos em escala piloto na cidade de Campina Grande (PB). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 21, n. 01, p. 01-09, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41520201600100110157>. Acesso em: 02 jan. 2026.
- ROCHA, Antônio Carlos de Lima; KLIGERMAN, Débora Cynamon; OLIVEIRA, Jaime Lopes da Mota. Panorama da pesquisa sobre tratamento e reúso de efluentes da indústria de antibióticos. **Saúde em Debate**, v. 43, p. 165-180, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sdeb/a/VLxrrjcfJCY5Xqmc5SNc/?lang=pt>. Acesso em: 08 jan. 2026.
- SAVIANO, Camila Gonso; DAHER, Maria Carolina Frade; GIORGETTI, Leandro. Efluentes na indústria farmacêutica: aspectos regulatórios e principais métodos de tratamento. **Research, Society and Development**, [S. l.] , v. 11, n. 14, p. e66111436192, 2022. Disponível em: <https://rsdjournal.org/rsd/article/view/36192>. Acesso em: 11 jan. 2026.
- SILVA, Rosivania Ferreira da. **Avaliação da viabilidade de reúso da água cinza tratada em filtro biológico**. 2017. 67 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) - Unidade Delmiro Gouveia - Campus do Sertão, Universidade Federal de Alagoas, Delmiro Gouveia, 2017. Disponível em: <http://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/3709>. Acesso em: 02 jan. 2026.
- SOUSA, Ronaldo Pio Rodrigues de. **Obtenção De Ésteres De Cadeia Curta, Média E Longa Com Lipases Imobilizadas Em Reações Multicompetitivas: estudo preliminar de viabilidade técnico-econômica**. 2025. 197 f. Tese (Doutorado em Bioquímica) - Instituto de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2025. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/handle/11422/28052>. Acesso em: 01 jan. 2026.

TERAN, Francisco J. Cuba; BITTAR, Mona Grimouth; CUBA, Renata M. Frayne. Desempenho de um reator Aeróbio Anóxico operado em batelada sequencial para o tratamento de efluentes de indústria farmacêutica. **Cuadernos de Educación y Desarrollo - QUALIS A4**, [S. l.], v. 15, n. 4, p. 3005–3034, 2023. Disponível em: <https://ojs.cuadernoseducacion.com/ojs/index.php/ced/article/view/1256>. Acesso em: 08 jan. 2026.