

PROCESSOS DE TRATAMENTO DE ÁGUA E REMOÇÃO DE POLUENTES: UMA REVISÃO

Vanessa Alessandra Sousa da Silva

Leonardo Santos Andrade

Resumo: O tratamento de água e a remoção de poluentes constituem etapas essenciais para garantir a disponibilidade e a qualidade desse recurso natural, indispensável à saúde pública e ao equilíbrio ambiental. A crescente complexidade dos contaminantes presentes em efluentes industriais e urbanos, como metais pesados, pesticidas, fármacos e compostos orgânicos persistentes, tem exigido o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes do que os processos convencionais de tratamento. Nesse contexto, destacam-se os Processos Oxidativos Avançados (POA), a adsorção em materiais de alta capacidade, a nanofiltração e a biorremediação, que se mostram eficazes na degradação ou remoção de poluentes recalcitrantes. Além de reduzir riscos à saúde humana, essas tecnologias minimizam os impactos ambientais, favorecem a reutilização da água e contribuem para o cumprimento das legislações ambientais vigentes. Contudo, desafios relacionados ao custo de implantação, consumo energético e geração de subprodutos tóxicos ainda limitam sua aplicação em larga escala. Assim, este trabalho envolverá uma discussão e apresentação de soluções integradas e economicamente viáveis para a consolidação dos processos avançados como alternativas sustentáveis no tratamento de água e na mitigação de impactos ambientais baseado em uma revisão de trabalhos publicados na literatura pertinente.

Palavras-chave: Tratamento de água; Remoção de poluentes; Processos avançados; Impactos ambientais; Sustentabilidade.

INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial para a manutenção da vida e para o desenvolvimento socioeconômico, sendo utilizada em praticamente todos os setores produtivos e nas atividades humanas cotidianas.

* Instituto de Química – UF CAT: e-mail: vanessasilva826@gmail.com; ls_andrade@ufcat.edu.br

Entretanto, a intensificação das atividades industriais, urbanas e agrícolas nas últimas décadas tem provocado um aumento significativo na carga e a variedade de contaminantes presentes em águas superficiais, subterrâneas e efluentes, tornando a etapa de tratamento cada vez mais complexa.

Entre esses contaminantes, destacam-se os metais tóxicos (como chumbo, cádmio e mercúrio), nutrientes (nitrogênio e fósforo), pesticidas, fármacos, compostos orgânicos persistentes (POP) e micropoluentes emergentes, incluindo hormônios, plastificantes e perfluoroalquilados (PFAS). Esses poluentes podem apresentar características recalcitrantes, toxicidade crônica, potencial de bioacumulação e efeitos disruptores endócrinos, tornando sua remoção um desafio para os sistemas convencionais de tratamento (GUO et al., 2022; MORRISON et al., 2023).

Os processos tradicionais, como coagulação-floculação, sedimentação, filtração e tratamento biológico por lodos ativados, embora eficazes para remoção de sólidos suspensos e matéria orgânica biodegradável, mostram-se insuficientes para eliminar compostos recalcitrantes e micropoluentes.

Diante dessas limitações, o interesse e a busca por processos e tecnologias avançadas crescem, no sentido de atender aos padrões de qualidade exigidos para potabilidade, lançamento de efluentes e reúso seguro da água.

Nesse contexto, destacam-se os Processos Oxidativos Avançados (POA), que utilizam espécies altamente reativas (como radicais hidroxila) para degradar contaminantes orgânicos complexos; os processos de adsorção em materiais de alta capacidade (carvão ativado, biochar, zeólitas e materiais avançados); as membranas de separação (microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa), que oferecem barreiras físicas para sólidos, sais e micropoluentes; e a biorremediação, incluindo sistemas convencionais e tecnologias como biorreatores de membranas (MBR) e *wetlands* (Sistemas de tratamento artificiais que simulam os processos naturais) construídos.

Diante desse cenário, a integração de processos surge como estratégia promissora, combinando múltiplas barreiras para maximizar a eficiência, reduzir riscos e viabilizar soluções economicamente sustentáveis.

A adoção de abordagens híbridas, associadas a ferramentas de avaliação de ciclo de vida (LCA) e análise tecnoeconômica, tem se mostrado decisiva para

orientar escolhas tecnológicas alinhadas aos princípios de sustentabilidade e às legislações ambientais vigentes (ROTH et al., 2022; AHMAD et al., 2022).

Além disso, a crescente pressão regulatória e as metas globais de redução de poluição hídrica reforçam a necessidade de inovação contínua e de políticas públicas que incentivem o reúso seguro da água, especialmente em contextos de escassez hídrica e mudanças climáticas.

OBJETIVO

Objetivo geral deste trabalho compreende a realização de uma revisão crítica sobre processos de tratamento de água e remoção de poluentes, com ênfase em POA, adsorção, membranas e biorremediação.

Como objetivos específicos têm-se:

- (i) caracterizar grupos de poluentes;
- (ii) descrever mecanismos e parâmetros;
- (iii) comparar eficiências;
- (iv) avaliar custos/energia;
- (v) discutir integração e riscos;
- (vi) propor indicadores e recomendações para apoio à decisão.

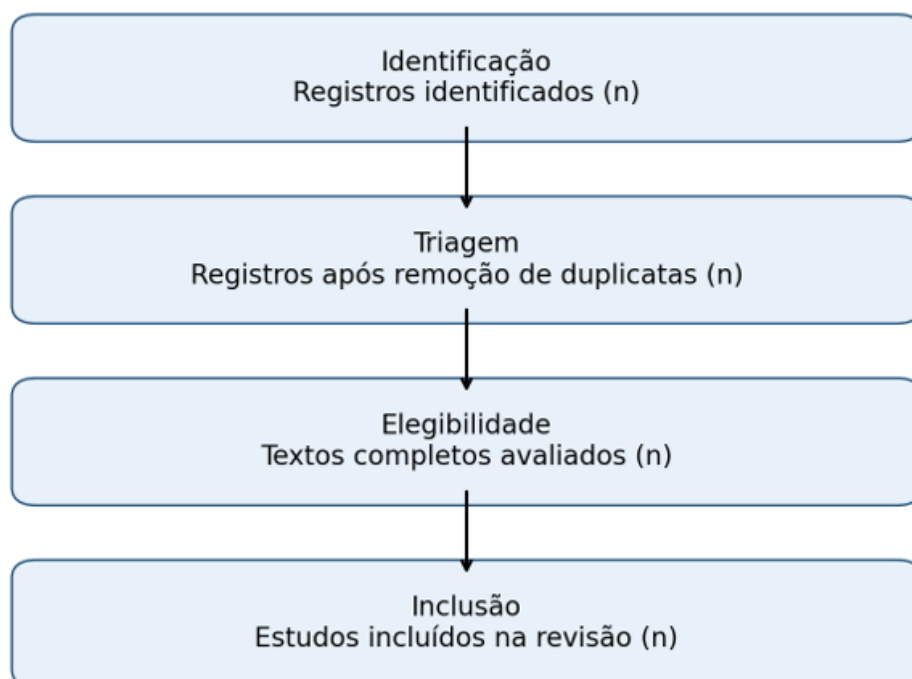
MATERIAIS E MÉTODOS

Este manuscrito apresenta uma revisão crítica sobre os principais processos avançados de tratamento de água e remoção de poluentes, abordando seus mecanismos, desempenho, limitações, custos e potencial de integração, com foco na mitigação de impactos ambientais e na promoção do reúso sustentável. A Figura 1 mostra o fluxograma adotado para a seleção dos estudos descritos neste trabalho.

O tipo de estudo envolveu uma revisão narrativa com elementos sistemáticos (PRISMA). As bases consultadas foram Scopus, Web of Science, PubMed, SciELO e Google Scholar; além de normas técnicas (APHA, WHO, US EPA, ISOABNT).

O período de busca compreendeu os anos de 2010-2025. A estratégia de busca foi feita a partir de termos em português/inglês sobre POA (UV/H₂O₂, ozônio, Fenton, persulfato), adsorção (carvão ativado, biochar), membranas (NF/RO, MBR) e wetlands construídos (GUERRA-RODRÍGUEZ et al., 2018; BISWAL; BALASUBRAMANIAN, 2022).

Figura 1. Fluxograma PRISMA da seleção dos estudos.



Fonte: elaborado pelo(a) autor(a)

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Os Processos Oxidativos Avançados (POA) têm sido amplamente estudados como alternativa para degradação de micropoluentes. Para Morrison et al. (2023), a formação de bromato é um desafio crítico na ozonização, exigindo estratégias de mitigação como controle de pH e uso de amônia.

Segundo Farzanehsa et al. (2023) “a escolha entre UV-Cl e UV/H₂O₂ depende do custo e da formação de subprodutos”, destacando a importância da avaliação econômica e sanitária.

Tratamentos do tipo POA que envolvem uso de radiação UV na presença de H_2O_2 (Processo Foto-Fenton) e ozonização promovem a degradação de micropoluentes e desinfecção dada a geração de oxidantes fortes tais como os radicais hidroxila.

Comparativos entre UV-Cl e UV- H_2O_2 mostram competitividade técnica e econômica do UV-Cl em determinados cenários, condicionada a avaliação de subprodutos DBP (FARZANEHSA et al., 2023).

Persulfato/PMS ativados (radical sulfato e vias não-radicais) ampliam a janela de pH e seletividade, com catalisadores carbonáceos e metálicos (GUERRA-RODRÍGUEZ et al., 2018; OYEKUNLE et al., 2021).

Os processos que utilizam membranas de nanofiltração (NF) e de osmose reversa (RO) oferecem barreiras eficazes contra micropoluentes, mas apresentam desafios relacionados ao *fouling* (acúmulo de materiais orgânicos, inorgânicos, biológicos na superfície ou nos poros da membrana) e à gestão do concentrado (GUO et al., 2022; MA et al., 2024; FUJIOKA et al., 2024). Entretanto, neste processo há rejeição elevada para sais PFAS. Os mecanismos incluem exclusão estérica, repulsão eletrostática e interações específicas conforme grupos funcionais dos PFAS.

Os estudos de Ma et al. (2024) e Fujioka et al. (2024) reforçam que a remoção de PFAS por NF e RO depende da estrutura química e das condições operacionais, com rejeições superiores a 95% em cenários específicos.

Há também os processos de biorremediação que utilizam os bioreatores de membrana (MBR). Este processo combina o processo biológico de lodo ativado com um sistema que utiliza filtração por membrana. Esse método é capaz de remover eficientemente sólidos suspensos e contaminantes. Entretanto, seu desempenho é afetado por temperatura e *fouling*. *Wetlands* construídos oferecem robustez e custo-eficiência para pós-tratamento e reúso, integrando processos naturais e engenharia (TIWARI et al., 2021; BISWAL; BALASUBRAMANIAN, 2022).

Os processos físicos de adsorção envolvendo carvão ativado e biochar demonstram efetividade no polimento de micropoluentes, desempenho e regeneração. Mas dependem do precursor, da ativação e do tipo de interação com o poluente. Além disso, sinergia com processos de biofiltração em sistemas de água

potáveltem sido relatada na literatura (PIAIA et al., 2020; MURTAZA et al., 2022; QIU et al., 2022).

CONCLUSÃO

Não há tecnologia isolada que atenda universalmente à complexidade dos poluentes. A combinação de pré-tratamentos, redução de carga, POA, membranas e etapas de polimento, integrada a monitoramento contínuo e a avaliações ambiental e econômica, constitui a rota mais sólida para assegurar qualidade e promover reúso seguro da água. A escolha do arranjo tecnológico deve considerar características da fonte, metas de qualidade, custos de implantação e operação, consumo energético, gestão de subprodutos e requisitos regulatórios.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família, aos professores e colegas pelas contribuições, e às instituições e bases de dados que viabilizaram esta revisão.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, N. N. R.; ANG, W. L.; TEOW, Y. H.; MOHAMMAD, A. W.; HILAL, N. Nanofiltration membrane processes for water recycling, reuse and product recovery within various industries: a review. *Journal of Water Process Engineering*, v. 45, 2022. DOI: 10.1016/j.jwpe.2021.102478.
- AMEN, R.; IBRAHIM, A.; SHAFQAT, W.; HASSAN, E. B. A critical review on PFAS removal from water: removal mechanism and future challenges. *Sustainability*, v. 15, n. 23, 2023. DOI: 10.3390/su152316173.
- AZEVEDO, S. M. F. O.; et al. *Processos oxidativos avançados para tratamento de água e efluentes*. 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2018.

- BISWAL, B. K.; BALASUBRAMANIAN, R. Constructed wetlands for reclamation and reuse of wastewater and urban stormwater: a review. *Frontiers in Environmental Science*, v. 10, 2022. DOI: 10.3389/fenvs.2022.836289.
- BUEHLMANN, P. H. Balancing bromate formation, organics oxidation, and pathogen inactivation: the impact of bromate suppression techniques on ozonation system performance in reuse waters. Master Thesis, Virginia Tech, 2019. Disponível em: https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/93530/Buehlmann_PH_T_2019.pdf. Acesso em: 10 dez. 2025.
- FARZANEHSA, M.; VAUGHAN, L. C.; ZAMYADI, A.; KHAN, S. J. Comparison of UV-Cl and UV-H₂O₂ advanced oxidation processes in the degradation of contaminants from water and wastewater: a review. *WaterandEnvironmentJournal*, 2023.
- FARZANEHSA, M.; VAUGHAN, L. C.; ZAMYADI, A.; KHAN, S. J. *Comparison of UV-Cl and UV-H₂O₂ advanced oxidation processes in the degradation of contaminants from water and wastewater: a review. WaterandEnvironmentJournal*, 2023.
- FUJIOKA, T.; TAKEUCHI, H.; TAHARA, H.; MURAKAMI, H.; BOIVIN, S. Effects of functional groups of polyfluoroalkyl substances on their removal by nanofiltration. *WaterResearch X*, v. 24, 2024.
- GUERRA-RODRÍGUEZ, S.; RODRÍGUEZ, E.; SINGH, D. N.; RODRÍGUEZ-CHUECA, J. Assessment of sulfate radical-based advanced oxidation processes for water and wastewater treatment: a review. *Water*, v. 10, n. 12, 2018. DOI: 10.3390/w10121828.
- GUO, H.; LI, X.; YANG, W.; YAO, Z.; MEI, Y.; PENG, L. E.; YANG, Z.; SHAO, S.; TANG, C. Y. Nanofiltration for drinking water treatment: a review. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, v. 16, p. 681–698, 2022. DOI: 10.1007/s11705-021-2103-5.

- GUO, H.; LI, X.; YANG, W.; YAO, Z.; MEI, Y.; PENG, L. E.; YANG, Z.; SHAO, S.; TANG, C. Y. Nanofiltration for drinking water treatment: a review. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, v. 16, p. 681–698, 2022.
- MA, Q.; KHUSID, B.; LEI, Q.; LIU, F.; ZHANG, W.; SONG, Z. Evaluation of commercial nanofiltration and reverse osmosis membrane filtration to remove PFAS: effects of transmembrane pressures and water matrices. *Water Environment Research*, v. 96, 2024.
- METCALF & EDDY. Tratamento de efluentes e recuperação de recursos. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.
- MORRISON, C. M.; HOGARD, S.; PEARCE, R.; et al.; WERT, E. C.; VON GUNTEN, U. Critical review on bromate formation during ozonation and control options for its minimization. *Environmental Science & Technology*, v. 57, 2023.
- MORRISON, C. M.; HOGARD, S.; PEARCE, R.; WERT, E. C.; VON GUNTEN, U. Critical review on bromate formation during ozonation and control options for its minimization. *Environmental Science & Technology*, v. 57, 2023.
- MURTAZA, G.; AHMED, Z.; DAI, D.-Q.; IQBAL, R.; et al. A review of mechanism and adsorption capacities of biochar-based engineered composites for removing aquatic pollutants from contaminated water. *Frontiers in Environmental Science*, v. 10, 2022. DOI: 10.3389/fenvs.2022.1035865.
- PIAIA, L.; BLOKLAND, M.; VAN DER WAL, A.; LANGENHOFF, A. Biodegradation and adsorption of micropollutants by biological activated carbon from a drinking water production plant. *Journal of Hazardous Materials*, v. 388, 2020.
- QIU, M.; LIU, L.; LING, Q.; et al. Biochar for the removal of contaminants from soil and water: a review. *Biochar*, v. 4, art. 19, 2022. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42773-022-00146-1>. Acesso em: 10 dez. 2025.
- RODRIGUES, A. C. Aplicação de processos oxidativos avançados para remoção de micropoluentes em águas de abastecimento. 2020. 130 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2020.

ROSLAN, N. N.; LAU, H. L. H.; SUHAIMI, N. A. A.; et al. Recent advances in AOPs for degrading pharmaceuticals in wastewater-A review. *Catalysts*, v. 14, n. 3, 2024. DOI: 10.3390/catal14030189.

ROTH, C.; WÜNSCH, R.; DINKEL, F.; et al. Micropollutant abatement with UV/H₂O₂ oxidation or low-pressure reverse osmosis? A comparative life cycle assessment for drinking water production. *Journal of Cleaner Production*, v. 336, 2022.

SILVA, J. P. Tecnologias emergentes para remoção de micropoluentes em águas residuárias. 2019. 145 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

SPERLING, M. V. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. 4. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014.

THOR, J.; DITTMANN, D.; MEYER, A.; et al. Transformation of persistent organic micropollutants by UV and UV/H₂O₂ in WWTP effluent. *Water Supply*, v. 25, n. 1, 2025. DOI: 10.2166/ws.2024.261.

TIWARI, B.; OUARDA, Y.; DROGUI, P.; et al. Fate of pharmaceuticals in a submerged membrane bioreactor treating hospital wastewater. *Frontiers in Water*, v. 3, 2021. DOI: 10.3389/frwa.2021.730479.