



SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL NO CONTEXTO DO TRATAMENTO E REÚSO INDUSTRIAL DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS

HÉLIO GERALDO UBISSE

RESUMO

A crescente escassez de água, agravada pela urbanização, industrialização e mudanças climáticas, representa um desafio significativo para a segurança hídrica e a sustentabilidade ambiental. Neste contexto, o tratamento e o reúso de águas residuárias industriais surgem como estratégias cruciais para reduzir a pressão sobre os recursos hídricos e promover o uso sustentável da água. Este estudo tem como objetivo avaliar as possibilidades e desafios do reúso industrial de águas residuárias tratadas, focando nos aspectos tecnológicos, regulatórios e seus impactos na sustentabilidade ambiental. A revisão foi baseada em literatura recente e diretrizes normativas, utilizando bases de dados científicas e documentos regulatórios. Foram analisadas várias tecnologias de tratamento, incluindo ultrafiltração por membranas, coagulação/floculação e sistemas de lodo ativado, em termos de eficiência na remoção de poluentes como sólidos suspensos totais (SST), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e coliformes. Os resultados revelaram uma diversidade de tecnologias eficazes, mas com variações significativas na qualidade da água tratada conforme a tecnologia e os padrões regulatórios específicos. A análise também mostrou que, apesar dos avanços tecnológicos, há desafios persistentes na conformidade com as normas de reúso, dificultando a ampla adoção dessas práticas no setor industrial. Para promover práticas mais sustentáveis, é fundamental melhorar a eficiência na coleta e tratamento das águas residuárias e fortalecer as diretrizes normativas. Abordar esses desafios é essencial para garantir a sustentabilidade ambiental e fomentar a implementação de práticas de reúso mais eficazes no setor industrial.

Palavras-chave: diretrizes de reúso; industrialização; segurança hídrica; tecnologias de tratamento; remoção de poluentes

1 INTRODUÇÃO

A crescente escassez de água doce, intensificada pela urbanização, industrialização, mudanças climáticas e aumento populacional, coloca em risco a segurança hídrica e a sustentabilidade ambiental global (Abou-Shady, 2017; Mohammadi; Tang; Sillanpää, 2021). Nesse contexto, o tratamento e o reúso de águas residuárias industriais emergem como estratégias cruciais para mitigar a pressão sobre os recursos hídricos naturais, reduzir a poluição e promover o uso sustentável da água (Tortajada, 2020).

O reúso de águas tratadas é uma prática amplamente adotada em diversos países, sendo utilizada em atividades como irrigação, recarga de aquíferos, aplicações industriais e usos urbanos (Angelakis et al., 2018). Apesar de seu potencial, a implementação eficaz do reúso industrial ainda enfrenta desafios significativos, incluindo a variabilidade na qualidade das águas residuárias, os altos custos associados e a necessidade de conformidade com regulamentos rigorosos (Kumar; Verma; Swami, 2023).

Ademais, as especificações técnicas para o reúso variam de acordo com a finalidade pretendida, exigindo tratamentos específicos para garantir a segurança ambiental e a saúde pública (Canaj et al., 2021). Embora o tratamento de águas residuárias tenha sido amplamente

estudado, a integração desses processos com normas e diretrizes para o reúso industrial ainda demanda maior atenção, especialmente no que se refere ao desenvolvimento de tecnologias inovadoras e à superação de barreiras regulatórias (Sapkota, 2019).

Este estudo tem como objetivo avaliar as possibilidades e desafios do reúso industrial de águas residuárias tratadas, com foco nos aspectos tecnológicos, regulatórios e seus impactos na sustentabilidade ambiental, visando fornecer uma base para a implementação de práticas mais sustentáveis no setor industrial.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi baseado em uma revisão de literatura e consultas a fontes especializadas. Foram utilizadas bases de dados científicas como Science Direct, PubMed, Web of Science, Scopus e Google Scholar para selecionar artigos relevantes dos últimos 10 anos, focados no tratamento e reúso de águas residuárias, sustentabilidade ambiental e diretrizes regulatórias. Palavras-chave como “reúso de água” e “inovações tecnológicas” guiaram a seleção dos estudos. Além disso, foram consultadas normativas e diretrizes de órgãos reguladores, como a Resolução nº 54/2005 do CNRH (Brasil) e o Guia de Reúso de Água da EPA (EUA). Os dados coletados foram analisados para identificar padrões e desafios no reúso de águas residuárias no setor industrial, resultando em um panorama abrangente sobre as tecnologias e impactos dessa prática, contribuindo para o desenvolvimento de soluções sustentáveis na indústria.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As diretrizes de reúso de águas residuárias adotadas como forma de contribuir para metas ambientais e tornar a água acessível para usos potenciais nos processos de produção industrial, como resfriamento, lavagem de agregados, concretagem, controle de incêndios, entre outros. No caso do reúso de água para fins industriais, poucos países publicaram as diretrizes de reúso de águas residuárias tratadas, com destaque para Austrália, Canadá, EUA, Espanha e Brasil. Os tipos de reúso são categorizadas em classes baseadas na qualidade da água tratada.

Uma comparação de remoção de DBO, DQO, SST, E. coli, coliformes e correção de pH usando diferentes tratamentos (físicos, químicos, biológicos e combinados) para tratamento de águas residuárias. Os poluentes presentes em águas residuárias como sólidos suspensos totais (SST) podem ser reduzidos por uma série de tecnologias convencionais, tais como ultrafiltração por membranas (Figoli et al. 2020), coagulação/floculação (Suman; Ahmad; Ahmad (2019); Oraeki; Skouteris; Ouki (2018), e lodo ativado convencional (Sperling, 2016).

Entre as tecnologias disponíveis, a ultrafiltração por membranas (UF), do grupo dos sistemas de tratamento físico de águas residuárias, possui uma ampla aplicação, com alta eficiência na remoção diversos poluentes (Awad et al., 2021), podendo atingindo concentrações que variam entre 0 a 1, 1 mg/L (Al-Ani et al., 2020; Zagklis et al., 2021), correspondente a cerca de 98 a 100 % de remoção de SST. A UF apresenta alta capacidade de remoção de turbidez, cerca de 0,2 NTU, equivalente a 99,5 % (Al-Ani et al., 2020; Bray et al., 2021) e remoção total de coliformes totais (Falsanisi; Liberti; Notarnicola, 2010). Combinando com sistema de zonas húmidas construídas a UF removeu 100% de coliformes totais (Akhmad; Darman; Hamzens, 2022).

A eficiência da remoção de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) através da ultrafiltração por membranas também mereceu atenção dos pesquisadores, o valor médio da das concentrações atingiu cerca de 6,7 mg/L, equivalente a 97% (Al-Ani et al., 2020; Bray et al., 2021). Os valores encontrados nesses estudos encontram-se dentro dos limites permitidos regulamentados para reúso da água no sector industrial.

No tratamento de águas residuárias por coagulação/Floculação, os valores médios de concentração de SST, foram cerca de 35,8 mg/L, correspondente a 91% da eficiência da remoção (Oraeki; Skouteris; Ouki, 2018; Suman; Ahmad; Ahmad, 2018) e redução de pH para

7,6 (Suman; Ahmad; Ahmad, 2018). A remoção de turbidez foi em média 99%, cerca de 1,9 NTU (Gilpavas; Dobrosz-Gómez; Gómez-García, 2017; Suman; Ahmad; Ahmad, 2018). As concentrações do DQO após tratamento pelo sistema de coagulação foram estimadas em 9,6 mg/L, cerca de 97% da capacidade de remoção (Putri; Kartohardjono, 2018) e no DBO a as concentrações foram de 149,8 mg/L corresponde a 67 % da capacidade de remoção (Suman; Ahmad; Ahmad, 2018).

Comparados os resultados esses resultados encontrados na revisão sobre tratamento de águas residuárias pelo sistema de coagulação/floculação com parâmetro de qualidade água de reúso apresentados no Quadro 1, as concentrações de SST estão acima dos limites admitidos para o reúso industrial em todas classes no EUA (EPA, 2012) e na Espanha (Espanha, 2007).

As concentrações de turbidez estão acima do recomendado na Austrália para reúso industrial em áreas de contato direto com os alimentos ou superfícies de contato com alimentos e na Espanha, em torres de resfriamento e condensadores. As concentrações de turbidez, estão nos limites admissíveis para reúso em áreas de contato não alimentar na Austrália e em todas classes definida na norma do Brasil. As concentrações de DBO estão dentro dos limites admissíveis em todos regulamentos que apresentam este parâmetro como qualidade de água para reúso (ABNT, 1997; Austrália, 2002; Canadá, 2013; EPA, 2012).

O tratamento de águas residuárias através do sistema de lodo ativado convencional também mostrou altas taxas de remoção de SST (30 mg/L), DQO (83 mg/L e DBO 28 mg/L) com cerca de 90, 85 e 87% respectivamente (Von Sperling; Perroni, 2016). Com a exceção do DQO (não indicado nos regulamentos), estas concentrações encontram-se dentro dos limites definidos para reúso de água no setor industrial em todas classes conforme os regulamentos da Austrália (Austrália, 2002), Canadá (Canadá, 2013) e EUA (EPA, 2012).

O tratamento de águas residuárias, utilizando Biorreatores com membranas anaeróbia, mostrou altas taxa remoção de SST (15,6 mg/L) cerca de 94,8 % (Ayyoub et al., 2022; Garg; Chaudhry, 2017), 99% (1,8 NMP/100ml) de E.coli (Subtil; Hespanhol; Mierzwa, 2013), 95% (14,5 NMP/100ml) de Coliformes totais (Bani-Melhem et al., 2015), remoção total de coliformes fecais (Bani-Melhem et al., 2015). A remoção média de DQO foi de 97,5%, correspondente a 21,7 mg/L (Garg; Chaudhry, 2017; Ji et al., 2020) e 95,5, 7% (25,9 mg/L) de remoção de DBO (Ayyoub et al., 2022; Ji et al., 2020)(Canadá, 2013). As concentrações de SST, DBO e coliformes revisadas estão dentro dos limites de reúso de águas residuárias no setor industrial na Austrália, Canadá e EUA.

As águas residuárias tratadas com base em Biorreatores com membranas anaeróbia, podem ser aproveitadas no setor industrial para diferentes finalidades, nomeadamente resfriamento sem recirculação, em torres de resfriamento (EPA, 2012), no processo industrial de sistema aberto, com possível contato humano (Austrália, 2002), processo industrial de sistema fechado (sem contato humano) e em torres de resfriamento, água de processo e alimentação de caldeira (Canadá, 2013).

No geral, os sistemas biológicos de tratamento de águas residuárias e com larga aplicação em escala real (Noyola et al., 2012) foram revisado, o sistema de lodo ativado com aeração prolongada, as contrações de SST foram estimadas em 28mg/L (89% de remoção) de SST e 30mg/L (90%) de DBO. O sistema de reator UASB combinado com biofiltro aerado soubermo, reduziu em cerca de 90% (30mg/L) de SST e 88% (35 mg/L) de DBO. A combinação do reator UASB com filtro anaeróbio, mostrou capacidade de redução de SST e DBO em 85% (60 mg/L) e 88% (35mg/L) respectivamente. O sistema de zonas húmidas construídas apresenta 90 % (30 mg/L) na remoção de SST e 88% (35mg/L) no DBO (Von Sperling; Perroni, 2016). As concentrações de SST e DBO das águas residuárias tratadas com o sistema de lodo ativado com aeração prolongada estão dentro dos limites recomendados pelas normas reúso no Canadá, com tem potencial de aplicação em torres de resfriamento, água de processo e alimentação de caldeira no setor industrial (Canadá, 2013) nos EUA, para todas classes de reúso

industrial (EPA, 2012).

O sistema de reator UASB combinado com biofiltro aerado submerso; sistema combinado de reator UASB com filtro anaeróbio e sistema de zonas húmidas construídas, apresentam qualidade de água com potencial aproveitamento em torres de resfriamento, água de processo e alimentação de caldeira conforme definido no documento normativo de reúso (Canada, 2013). A combinação do reator UASB com filtro anaeróbio apresenta valores de concentração de DBO admissíveis para reúso industrial na Austrália, em processos industriais de sistema fechado (sem contato humano) (Austrália, 2002). As águas residuárias tratadas, tratadas com o sistema de zona húmidas construídas, as concentrações de SST atenderam aos limites dos regulamentos dos EUA, Canadá e Espanha. E os limites do DBO estão dentro dos limites admissíveis para reúso industrial no Canadá e Austrália.

4 CONCLUSÃO

Há uma diversidade de tecnologias eficazes para o tratamento de águas residuárias, oferecendo várias possibilidades de reúso no setor industrial. No entanto, a qualidade da água tratada varia conforme a tecnologia empregada e os padrões regulatórios específicos para diferentes usos industriais. Para promover práticas mais sustentáveis, é fundamental aprimorar a eficiência na coleta e no tratamento das águas residuárias, bem como fortalecer as diretrizes normativas. Apesar dos avanços tecnológicos, ainda existem desafios significativos na conformidade das águas tratadas com as normas de reúso em diferentes contextos industriais. Esses desafios dificultam a ampla adoção dessas práticas, o que é essencial para garantir a sustentabilidade ambiental no setor.

REFERÊNCIAS

- ABOU-SHADY, A. Recycling of polluted wastewater for agriculture purpose using electrodialysis: Perspective for large scale application. **Chemical Engineering Journal**, v. 323, p. 1–18, set. 2017.
- AKHMAD, A. G.; DARMAN, S.; HAMZENS, W. P. S. The Combining Constructed Wetland and Ultrafiltration to Increase Total Coliform Removal Efficiency of Wastewater. v. 17, 2022.
- AL-ANI, F. H. et al. Experimental Investigation of the Effect of Implanting TiO₂-NPs on PVC for Long-Term UF Membrane Performance to Treat Refinery Wastewater. **Membranes**, v. 10, n. 4, p. 77, 21 abr. 2020.
- ANGELAKIS, A. N. et al. Water Reuse: From Ancient to Modern Times and the Future. **Frontiers in Environmental Science**, v. 6, p. 26, 11 Maio 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS- ABNT. NBR 13969: Tanques sépticos-Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos-Projeto, construção e operação. ABNT. . 1997.
- AUSTRÁLIA. **Environmental Guidelines for the Use of Recycled Water in Tasmania**. Environment Division/ Department of Primary Industries, Water and Environment, , 2002. Disponível em: <https://epa.tas.gov.au/Documents/Use_of_Recycled_Water_December_2002.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2023
- AUSTRÁLIA. **Water reuse guideline for food businesses in NSW considering reusing**

water. NSW Food Authority, , 2008.

AYYOUB, H. et al. Membrane bioreactor (MBR) performance in fish canning industrial wastewater treatment. **Water Practice and Technology**, v. 17, n. 6, p. 1358–1368, 1 jun. 2022.

BANI-MELHEM, K. et al. On the performance of real grey water treatment using a submerged membrane bioreactor system. **Journal of Membrane Science**, v. 476, p. 40–49, fev. 2015.

BRASIL. **Resolução nº 54, de 28 de novembro de 2005. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água, e dá outras providências.** Diário Oficial da União, Brasília, nov., , 2005.

BRAY, R. T. et al. Ultrafiltration Process in Disinfection and Advanced Treatment of Tertiary Treated Wastewater. **Membranes**, v. 11, n. 3, p. 221, 20 mar. 2021.

CANADA. Reclaimed Water Guideline: a Companion Document to the Municipal Wastewater Regulation Made Under the Environmental Management Act. n. Canadá: B.C. Ministry of Environment, 2013.

CANAJ, K. et al. Life cycle-based evaluation of environmental impacts and external costs of treated wastewater reuse for irrigation: A case study in southern Italy. **Journal of Cleaner Production**, v. 293, p. 126142, abr. 2021.

EPA. **Potable water guidelines.** , 2021. Disponível em: <<https://www.epa.gov/ground-water-and-drinking-water/potable-water-reuse-and-drinking-water>>. Acesso em: 26 nov. 2023

ESPANHA. **Spanish Regulations for Water Reuse: Royal Decree 1620/2007 of 7 December.** Catalunha: Universidade Politécnica da Catalunha, , 2007. Disponível em: <<https://www.asersagua.es/Asersa/Documentos/Spanish%20Regulations%20for%20Water%20Reuse%20EN.pdf>>

GARG, S.; CHAUDHRY, S. Treatment of Wastewater of Food Industry by Membrane Bioreactor. **IARJSET**, v. 4, n. 6, p. 153–156, 20 jun. 2017.

GILPAVAS, E.; DOBROSZ-GÓMEZ, I.; GÓMEZ-GARCÍA, M. Á. Coagulation-flocculation sequential with Fenton or Photo-Fenton processes as an alternative for the industrial textile wastewater treatment. **Journal of Environmental Management**, v. 191, p. 189–197, abr. 2017.

JI, J. et al. Application of two anaerobic membrane bioreactors with different pore size membranes for municipal wastewater treatment. **Science of The Total Environment**, v. 745, p. 140903, nov. 2020.

KUMAR, S.; VERMA, A.; SWAMI, P. K. Reuse of wastewater in agriculture, irrigation, and domestic use: a backlook, an aheadlook, and a forwardlook. V. 12, n. 1, 2023.

NOYOLA, A. et al. Typology of Municipal Wastewater Treatment Technologies in Latin America. **CLEAN – Soil, Air, Water**, v. 40, n. 9, p. 926–932, set. 2012.

ORAEKI, T.; SKOUTERIS, G.; OUKI, S. Optimization of coagulation-flocculation process in the treatment of wastewater from the brick-manufacturing industry. **Water Practice and Technology**, v. 13, n. 4, p. 780–793, 1 dez. 2018.

PUTRI, S. S.; KARTOHARDJONO, S. Combination of Coagulation-flocculation and Ultrafiltration Processes using Cellulose Acetate Membrane for Wastewater Treatment of Tofu Industry. **E3S Web of Conferences**, v. 67, p. 04005, 2018.

SAPKOTA, A. R. Water reuse, food production and public health: Adopting transdisciplinary, systems-based approaches to achieve water and food security in a changing climate. **Environmental Research**, v. 171, p. 576–580, abr. 2019.

SUBTIL, E. L.; HESPANHOL, I.; MIERZWA, J. C. Submerged Membrane Bioreactor (sMBR): a promising alternative to wastewater treatment for water reuse. **Ambiente e Agua - An Interdisciplinary Journal of Applied Science**, v. 8, n. 3, p. 129–142, 20 dez. 2013.

SUMAN, A.; AHMAD, T.; AHMAD, K. Dairy wastewater treatment using water treatment sludge as coagulant: a novel treatment approach. **Environment, Development and Sustainability**, v. 20, n. 4, p. 1615–1625, ago. 2018.

TORTAJADA, C. Contributions of recycled wastewater to clean water and sanitation Sustainable Development Goals. **npj Clean Water**, v. 3, n. 1, p. 22, 30 abr. 2020.

VON SPERLING, M.; PERRONI, A. **Urban Wastewater Treatment in Brazil**. [s.l.] Inter-American Development Bank, ago. 2016. Disponível em: <<https://publications.iadb.org/handle/11319/7783>>. Acesso em: 2 dez. 2023