



## Inteligência Artificial e Membranas Inteligentes: Sinergia para o Controle de Bioincrustação e Melhoria da Eficiência na Remoção de Micropoluentes Emergentes – Revisão Crítica

### *Artificial Intelligence and Smart Membranes: Synergy for Biofouling Control and Improving Efficiency in the Removal of Emerging Micropollutants – Critical Review*

Alexandre da Silva Sales

Érico Rodrigues Gomes

Gilvan Moreira da Paz

Natássia da Silva Sales

**Resumo:** Micropoluentes emergentes (MPEs), como fármacos, microplásticos e PFAS, apresentam elevada persistência ambiental, bioacumulação e riscos à saúde humana e aos ecossistemas aquáticos. As estações de tratamento de águas residuais (ETARs) convencionais não foram projetadas para removê-los eficientemente, o que impulsiona a busca por tecnologias avançadas. Nesse contexto, membranas inteligentes (MIs) e inteligência artificial (IA) surgem como soluções promissoras. As MIs, desenvolvidas com nanomateriais, óxido de grafeno, estruturas metal-orgânicas e revestimentos antifouling, oferecem seletividade ajustável, resistência à bioincrustação e capacidade de adsorção e degradação catalítica. A integração com IA, por meio de machine learning, deep learning e modelos híbridos, permite prever incrustações, otimizar ciclos de operação, realizar controle em tempo real e detectar anomalias. Essa sinergia aumenta a eficiência na remoção de MPEs, reduz consumo energético e prolonga a duração das membranas. Apesar de desafios técnicos e de escalabilidade, trata-se de uma abordagem estratégica para sistemas de tratamento mais sustentáveis e adaptativos.

**Palavras-chave:** bioincrustação; micropoluentes emergentes; tratamento de águas; sustentabilidade.

**Abstract:** Emerging micropollutants (EMPs), such as pharmaceuticals, pesticides, microplastics, and PFAS, are highly persistent, bioaccumulative and pose risks to human health and aquatic ecosystems. Conventional wastewater treatment plants (WWTPs) are not designed for the effective removal, which drives the development of advanced technologies. In this context, smart membranes (SMs) and artificial intelligence (AI) emerge as promising solutions. SMs, engineered with nanomaterials, graphene oxide, metal-organic frameworks, and antifouling coatings, provide tunable selectivity, resistance to biofouling, and enhanced adsorption and catalytic degradation capabilities. The integration of AI, through machine learning, deep learning, and hybrid models, enables fouling prediction, optimization of operational cycles, real-time control, and anomaly detection. This synergy enhances pollutant removal efficiency, reduces energy and chemical consumption, and extends membrane lifetime. Despite technical and scalability challenges, the AI-SM approach represents a strategic pathway toward more sustainable, adaptive, and efficient wastewater treatment systems.

**Keywords:** micropollutants; biofouling; wastewater treatment; sustainability.

## INTRODUÇÃO

Fármacos, micro e nanoplasticos e substâncias perfluoroalquílicas e polifluoroalquílicas (PFAS) são micropoluentes emergentes (MPEs) conhecidos por sua persistência ambiental, propriedades bioacumulativas e ampla distribuição, levando a potenciais efeitos adversos na saúde humana e na biota (Baresel *et al.*, 2025).

Múltiplas fontes foram identificadas como contribuintes para a poluição de MPEs no ambiente aquático, destacando-se as excreções humanas e animais, descarte inadequado de medicamentos, o escoamento agrícola, os lixiviados de aterros sanitários e fossas sépticas, bem como as descargas de efluentes hospitalares e de estações de tratamento de águas residuais (ETARs), onde as ETARs são consideradas uma fonte crucial de contaminação por MPEs (Abbas *et al.*, 2022).

A persistência e a bioacumulação de MPEs em organismos podem comprometer suas funções metabólicas e fisiológicas, o que reforça a urgência de sua remoção para mitigar riscos à saúde (Bhatt, Bhandari & Bilal, 2022). Para esse fim, diversos métodos são aplicados na purificação de efluentes hídricos, abrangendo tanto técnicas convencionais quanto avançadas. Dentre os métodos convencionais, destacam-se processos físicos e físico-químicos como ebulição, cloração, coagulação, sedimentação, floculação, precipitação química, adsorção por carvão ativado, filtragem por areia e desinfecção solar (Pathak *et al.*, 2020). Já as técnicas avançadas abrangem tecnologias como: método de troca iônica, processos de oxidação modernos, fotocatalise, destilação, osmose reversa, desmineralização, filtragem por membrana, purificação ultravioleta, abordagens baseadas em nanotecnologia e, mais recentemente, inteligência artificial (IA) e membranas inteligentes (MIs) (Masood *et al.*, 2022; Mustafa *et al.*, 2025).

Os recentes avanços em IA e MIs apresentam novas oportunidades para monitoramento em tempo real, análise preditiva e otimização de sistemas de tratamento (Gaudio *et al.*, 2021), além de melhorar o desempenho ao fornecer alta seletividade sem reduzir a permeabilidade, alta estabilidade mecânica e alta resistência contra incrustações, podendo atender a requisitos como limite de peso molecular de corte, eficiências de remoção e qualidade de águas residuais (Yildirim & Candan, 2023).

Assim, a integração entre membranas inteligentes, desenvolvidas com materiais avançados de alta seletividade e resistência à bioincrustação, e técnicas de Inteligência Artificial, como as baseadas em *machine learning* (ML) e no monitoramento em tempo real, oferece um caminho promissor para superar limitações operacionais no tratamento de águas residuais (Suquet *et al.*, 2020; Zou *et al.*, 2022). Essa abordagem possibilita otimização dinâmica de parâmetros, aumento da eficiência na remoção de micropoluentes, redução de consumo

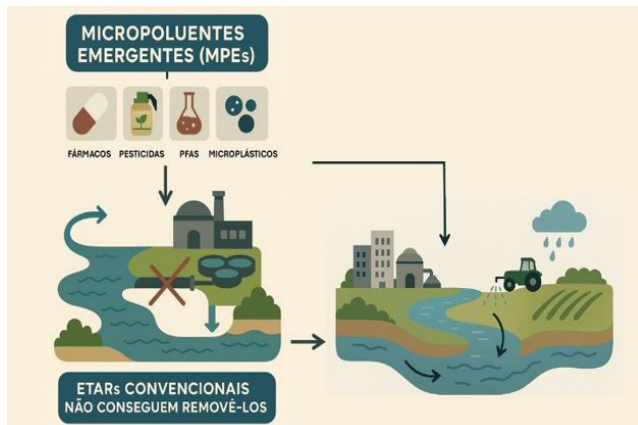
energético e prolongamento da vida útil das membranas, contribuindo para sistemas mais sustentáveis, adaptativos e economicamente viáveis (Gaudio *et al.*, 2021; Mustafa *et al.*, 2025).

O presente trabalho tem como objetivo revisar criticamente a aplicação integrada de Inteligência Artificial e Membranas Inteligentes no tratamento de águas residuais, com ênfase na prevenção e controle da bioincrustação e na otimização da remoção de micropoluentes emergentes, abordando (i) a caracterização dos principais micropoluentes e os desafios associados à sua remoção por tecnologias convencionais; (ii) os avanços recentes em materiais e funcionalidades de membranas inteligentes; (iii) as técnicas de IA aplicadas à modelagem preditiva, monitoramento e controle adaptativo de processos de separação; e (iv) as evidências experimentais e perspectivas futuras para a implementação em escala real. Busca-se, assim, fornecer uma base técnica e científica que apoie o desenvolvimento de soluções integradas, eficientes e sustentáveis para o tratamento avançado de efluentes.

## MICROPOLUENTES: TIPOS, FONTES E DESAFIOS DE REMOÇÃO

Os micropoluentes abrangem um grupo crescente de poluentes emergentes, incluindo produtos químicos industriais, resíduos farmacêuticos, hormônios, produtos de higiene pessoal e outras substâncias tóxicas (Bhatt, Bhandari & Bilal, 2022).

Embora a poluição por MPEs possa ter origem natural, ocasionada por atividades vulcânicas, mineralização e matéria orgânica, a principal fonte de introdução ambiental desses compostos é originada pelas atividades humanas, como indústrias, agricultura, setores farmacêuticos e atividades domésticas (Tang *et al.*, 2019). A entrada desses compostos no ambiente ocorre por múltiplas vias, como apresentado na Figura 1, incluindo lançamento direto em sistemas aquáticos, escoamento superficial pluvial ou de degelo, precipitação atmosférica, infiltração subterrânea e, principalmente, lançamento de efluentes de redes de tratamento em corpos hídricos (Saleem *et al.*, 2024).

**Figura 1 - Entrada dos MPEs no ciclo da água.**

Fonte: autoria própria.

Desse modo, os MPEs podem atingir as águas subterrâneas e superficiais e, dependendo de sua concentração, esses poluentes podem provocar efeitos adversos na biota, impactando crescimento, reprodução e saúde geral, além de ocasionar efeitos de toxicidade crônica ou aguda, desregulação endócrina, resistência microbiana a antibióticos e outros riscos toxicológicos a seres vivos e à saúde humana (Geissen *et al.*, 2015).

As atuais Estações de Tratamento de Águas Residuais (ETARs) enfrentam desafios como remoção incompleta dos poluentes, geração de lodo tóxico, altos custos e a necessidade de pessoal qualificado (Gupta *et al.*, 2024). As ETARs não são projetadas para eliminar tais poluentes (Liu *et al.*, 2021; Acarer, 2023).

Isso ocorre por causa da diversidade de MPEs, cada qual com suas propriedades e comportamentos distintos, como os produtos farmacêuticos que apresentam baixa biodegradabilidade e boa hidrofiliabilidade, o que dificulta sua remoção da água com técnicas convencionais de tratamento de águas residuais. Além disso, podem reagir com outros micropoluentes, como os microplásticos, frequentemente presentes em águas residuais, que atuam como transportadores dos produtos nocivos que aderem à sua superfície (Koelmans, Bakir & Vijverberg, 2022).

Assim, a crescente presença de micropoluentes emergentes na água, devido a diversas fontes industriais e domésticas, demanda abordagens avançadas de tratamento para garantir a qualidade da água potável e proteger o meio ambiente. Esses poluentes persistentes exigem tecnologias mais eficazes que as convencionais para sua remoção (Graça, 2025).

## MEMBRANAS INTELIGENTES PARA TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUAIS

Membranas inteligentes (MIs), também designadas como membranas responsivas a estímulos, têm despertado crescente interesse na comunidade científica (Pan *et al.*, 2023). A atratividade desses materiais reside em suas propriedades singulares, como seletividade e permeabilidade ajustáveis, além de atributos que podem ser modificados de maneira reversível (Tufani & Ozaydin Ince, 2017).

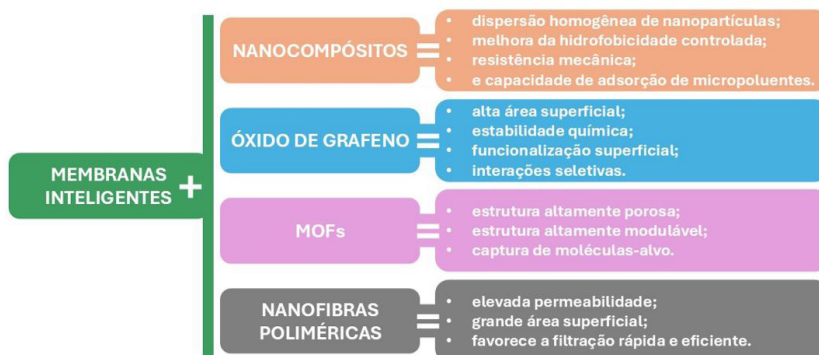
Essa nova geração de membranas é desenvolvida pela incorporação de materiais sensíveis a estímulos em substratos de membrana. As MIs multifuncionais, resultantes dessa integração, possuem a capacidade de autoajustar suas características físico-químicas em resposta a estímulos ambientais, tais como temperatura, pH, luz ou outros sinais específicos (Zou *et al.*, 2022).

A estrutura inteligente dessas membranas oferece o potencial de aprimorar significativamente o desempenho em processos de separação. Suas principais vantagens incluem a capacidade de fornecer alta seletividade sem comprometer a permeabilidade, demonstrar elevada estabilidade mecânica e apresentar resistência superior ao processo de incrustação (Pan *et al.*, 2023). Tais atributos permitem que as MIs atendam a requisitos rigorosos de corte de peso molecular, elevadas eficiências de remoção e melhoria da qualidade dos efluentes, superando as limitações das membranas convencionais (Yildirim & Candan, 2023).

### Materiais e Estruturas Avançadas em MIs

O desenvolvimento de membranas inteligentes (MIs) para tratamento de águas residuais tem sido impulsionado pela incorporação de materiais e estruturas avançadas que visam aprimorar a seletividade, a resistência à bioincrustação (biofouling) e a durabilidade operacional (Sengur-Tasdemir *et al.*, 2016). Entre os principais avanços, demonstrados na Figura 2, destacam-se os nanocompósitos (Yusuf *et al.*, 2020), o óxido de grafeno (Yu *et al.*, 2021), as estruturas metal-orgânicas (MOFs) (Cheng *et al.*, 2022) e as nanofibras poliméricas (Fang *et al.*, 2025), cada qual conferindo propriedades específicas ao material de separação. Os nanocompósitos permitem a dispersão homogênea de nanopartículas funcionais na matriz polimérica, melhorando características como hidrofobicidade controlada, resistência mecânica e capacidade de adsorção de micropoluentes (Namdeti *et al.*, 2025). O óxido de grafeno e suas formas reduzidas oferecem alta área superficial, estabilidade química e a possibilidade de funcionalização superficial, favorecendo interações seletivas com contaminantes orgânicos e inorgânicos (Sun *et al.*, 2022). Já as MOFs destacam-se pela estrutura cristalina altamente porosa e modulável, permitindo projetar sítios ativos específicos para a captura de moléculas-alvo (Hu *et al.*, 2025). As nanofibras poliméricas, obtidas por processos como eletrospinação, apresentam elevada permeabilidade e grande área superficial, favorecendo a filtração rápida e eficiente (Shi *et al.*, 2022).

**Figura 2 - Principais avanços em MIs por incorporação de materiais avançados.**



Fonte: autoria própria.

Outro avanço relevante é a aplicação de revestimentos antifouling e hidrofílicos/hidrofóbicos seletivos, que visam minimizar a formação de biofilmes e o acúmulo de sólidos na superfície da membrana (Yan *et al.*, 2020; Wei *et al.*, 2020). Revestimentos hidrofílicos promovem a formação de camadas de hidratação que reduzem a adesão de partículas e microrganismos, enquanto revestimentos hidrofóbicos seletivos são úteis na rejeição de óleos e compostos apolares presentes em efluentes industriais (Hao *et al.*, 2019). Estratégias híbridas, que combinam propriedades hidrofílicas e hidrofóbicas, vêm ganhando destaque por permitir a adaptação dinâmica das características da superfície conforme a composição do efluente (Ali *et al.*, 2020).

Por fim, a adsorção seletiva de micropoluentes representa uma área em franca expansão, especialmente no tratamento de contaminantes emergentes como fármacos, pesticidas, hormônios e PFAS (Qalyoubi, Al-Othman & Al-Asheh, 2021). Essa funcionalidade pode incluir a incorporação de grupos funcionais específicos (carboxilas, aminas, sulfonas), enzimas imobilizadas ou catalisadores fotoativos, de modo a favorecer interações eletrostáticas, ligações de hidrogênio ou degradação fotocatalítica (Liu *et al.*, 2014). A aplicação combinada dessas estratégias, como materiais nanoestruturados, revestimentos de superfície e funcionalização seletiva, confere às membranas inteligentes um papel estratégico no avanço de sistemas de tratamento de águas residuais de alta eficiência e longa vida útil (Anjum *et al.*, 2019; Chu *et al.*, 2020).

## Mecanismos de Desempenho em MIs

O desempenho das membranas inteligentes (MIs) está diretamente associado aos mecanismos pelos quais ocorre a separação, remoção ou degradação dos contaminantes presentes nas águas residuais, onde esses mecanismos combinam processos físicos, químicos e, em alguns casos, reações catalíticas, permitindo que as MIs atuem de forma mais eficiente e seletiva frente a uma vasta lista de micropoluentes (Pan *et al.*, 2023).

A filtração física baseia-se na retenção por exclusão de tamanho, na qual partículas, microrganismos e macromoléculas são barrados devido à dimensão dos poros ou canais de transporte da membrana (Rastgar *et al.*, 2022). Esse mecanismo é predominante em processos como microfiltração (MF) (Asad *et al.*, 2021) e ultrafiltração (UF) (Liu; Jiang; LI, 2023), mas também está presente em escalas menores, como na nanofiltração (NF) (Gui *et al.*, 2025) e osmose reversa (OR) (Yang *et al.*, 2024), onde a seletividade é reforçada por interações químicas. Já a filtração química envolve interações eletrostáticas, forças de van der Waals e ligações de hidrogênio entre a superfície da membrana e as moléculas-alvo, permitindo separação adicional com base em carga, polaridade ou grupos funcionais específicos. Essa combinação amplia a eficiência na retenção de compostos como pesticidas, hormônios e PFAS, que dificilmente seriam removidos por barreiras físicas isoladas (Al-Shami *et al.*, 2025).

Assim, as membranas inteligentes (MIs) frequentemente incorporam materiais adsorventes, como óxido de grafeno, MOFs, carvão ativado e polímeros de alta área superficial, capazes de reter seletivamente micropoluentes orgânicos e inorgânicos por interações eletrostáticas, formação de complexos metálicos ou troca iônica, mostrando eficácia para fármacos, corantes e contaminantes emergentes hidrofóbicos (Solcova, Dlaskova & Kastanek, 2025). E a integração de catalisadores fotoativos ou redox amplia o desempenho, permitindo a degradação *in situ* de poluentes por foto-oxidação, geração de radicais hidroxila, reações de oxidação, reduzindo a incrustação e prolongando a vida útil da membrana (Argurio *et al.*, 2018).

Além disso, destacam-se mecanismos de autolimpeza ativadas por estímulos externos, como luz ultravioleta, campos elétricos, variações de pH ou temperatura, que promovem a degradação de matéria orgânica acumulada ou a limpeza eletroquímica via camadas condutivas (Pantuso *et al.*, 2023), bem como estratégias regenerativas assistidas, possibilitando a recuperação das propriedades originais, menor uso de água e produtos químicos e maior sustentabilidade operacional (Liu *et al.*, 2024).

## Desafios Operacionais

Apesar dos avanços significativos no design e na funcionalização de membranas inteligentes, diversos desafios operacionais ainda limitam sua aplicação em escala real. A bioincrustação, causada pela adesão e crescimento de microrganismos na superfície, continua sendo um dos principais fatores de perda de desempenho, frequentemente associada à formação de biofilmes resistentes (Tong *et al.*, 2020). Além disso, a incrustação orgânica e inorgânica, decorrente da deposição de matéria orgânica solúvel, sais minerais e partículas coloidais, compromete a integridade da membrana e reduz sua eficiência (Shahid *et al.*, 2020). Esses processos resultam na redução progressiva do fluxo e da permeabilidade, exigindo limpezas frequentes e aumentando os custos de operação e manutenção. E, conseqüentemente, afeta a durabilidade, já que a degradação estrutural após

sucessivos ciclos de limpeza pode diminuir a vida útil do material (Pantuso *et al.*, 2023).

## INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL APLICADA A PROCESSOS DE MEMBRANAS.

### Principais Técnicas de IA

A aplicação de Inteligência Artificial (IA) em processos de membranas tem avançado rapidamente como alternativa para enfrentar os principais desafios da tecnologia, incluindo bioincrustação, perda de fluxo e altos custos operacionais (Gaudio *et al.*, 2021). Métodos de *machine learning* (ML) e deep learning (DL) têm se destacado pela capacidade de analisar grandes conjuntos de dados e prever parâmetros críticos, como pressão transmembrana, fluxo de permeado e intensidade de incrustação (Wu *et al.*, 2025; Cao *et al.*, 2024). Entre essas técnicas, as redes neurais artificiais (RNAs) se consolidaram como ferramentas eficazes para capturar relações não lineares complexas, frequentemente superando modelos empíricos e estatísticos tradicionais (Abuwatfa *et al.*, 2023).

Aliás, cresce o interesse pelos modelos híbridos, que combinam o potencial preditivo da IA com o rigor dos modelos matemáticos baseados em princípios físicos. Essa interação aumenta a robustez das previsões e permite simulações em condições ainda não testadas experimentalmente, sendo uma alternativa promissora para apoiar a transição de estudos laboratoriais para aplicações em escala piloto e real (Viet *et al.*, 2022).

Por fim, os algoritmos evolutivos e métodos de otimização com múltiplos objetivos têm sido empregados para lidar com sistemas complexos de tratamento, nos quais é necessário equilibrar diferentes critérios, como eficiência de remoção, consumo energético e vida útil da membrana (Al-Obaidi *et al.*, 2021). Abordagens como algoritmos genéticos e particle swarm optimization (PSO) têm se mostrado eficazes em identificar condições operacionais ideais, especialmente quando acopladas a técnicas de ML/DL, permitindo controle adaptativo em tempo real (Al-Obaidi *et al.*, 2021; Chen *et al.*, 2024; You *et al.*, 2023).

### Aplicações no Tratamento de Águas Residuais

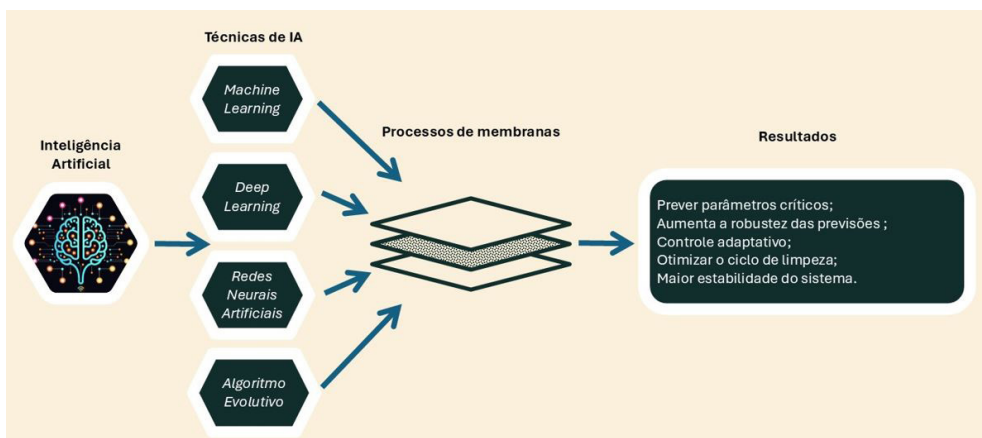
A aplicação de técnicas de IA, como a *machine learning*, na previsão de bioincrustação e falhas em membranas representa um avanço significativo para a operação eficiente de sistemas de águas residuais, permitindo ações proativas bem fundamentadas, como apresentado na Figura 3 (Niu, Li & Wang, 2023; Wang *et al.*, 2023).

Em paralelo, revisões recentes exploram a integração de sensores com IA, que possibilita a detecção precoce de anomalias operacionais, como falhas na qualidade da água ou desvios nas condições padrão, por meio do monitoramento contínuo e de algoritmos de aprendizado supervisionado (Liang *et al.*, 2025).

Além disso, técnicas baseadas em IA estão sendo adotadas para otimização de ciclos de limpeza e retrolavagem, elevando a eficiência do sistema e reduzindo o consumo de energia e agentes químicos (Al-Kathiri *et al.*, 2025). Um estudo exemplificativo, realizado em escala piloto, desenvolveu um algoritmo de agendamento adaptativo de retrolavagem, que ajusta dinamicamente os tempos de filtração e limpeza conforme o acúmulo de incrustação, melhorando o fluxo líquido médio em comparação com métodos estáticos (Jepsen *et al.*, 2019).

Tecnologias avançadas também têm sido empregadas no controle em tempo real de parâmetros operacionais, como pressão transmembrana, vazão e dosagem química, utilizando modelos preditivos baseados em ML/DL para manter o sistema dentro de uma zona ótima de operação, maior estabilidade e menor risco de falhas (Li *et al.*, 2023; Mondal *et al.*, 2023).

**Figura 3 - Principais técnicas de IA aplicadas a processos de membranas.**



## Integração com Sensores e IoT

A adoção de sensores inteligentes associada à Internet das Coisas (IoT) permite um monitoramento remoto e em tempo real altamente eficaz em sistemas de tratamento de águas residuais com membranas (Almetwally, Hassan & Mourad, 2020). Sensores capazes de medir parâmetros como pressão, fluxo, turvação, qualidade da água e integridade da membrana enviam dados continuamente a plataformas centralizadas ou em nuvem, otimizando o controle e o diagnóstico das operações (Smith, Johnson & Williams, 2020). Essa infraestrutura possibilita detecção imediata de desvios operacionais e anomalias e embasa sistemas de monitoramento adaptativo com visualizações intuitivas e alertas automatizados (Forhad *et al.*, 2024).

Somando-se a isso, emergem cada vez mais sistemas ciberfísicos, que integram computação, comunicação e controle com componentes físicos, permitindo a interação entre o mundo físico e o digital, nos quais plataformas IoT e sensores

são integrados a modelos de inteligência artificial, formando redes físicas-virtuais que viabilizam operação adaptativa automática. Um exemplo promissor é o uso de sensores baseados em IoT para estimar parâmetros difíceis de medir diretamente, integrados a controladores de dados e adaptados em tempo real com modelagem inteligente para ajustes operacionais precisos (Abdel-Basset *et al.*, 2022).

Mais ainda, estruturas que combinam sensores IoT com redes neurais artificiais, como as de memória de longo e curto prazo (LSTM) ou as autoencoders, que aprendem a representar dados de entrada de forma comprimida, têm se mostrado eficazes na detecção de falhas, previsão de manutenção e operação otimizada de membranas, na identificação de anomalias e em um aumento significativo no tempo médio entre falhas (Demedeiros, Hendawi & Alvarez, 2023).

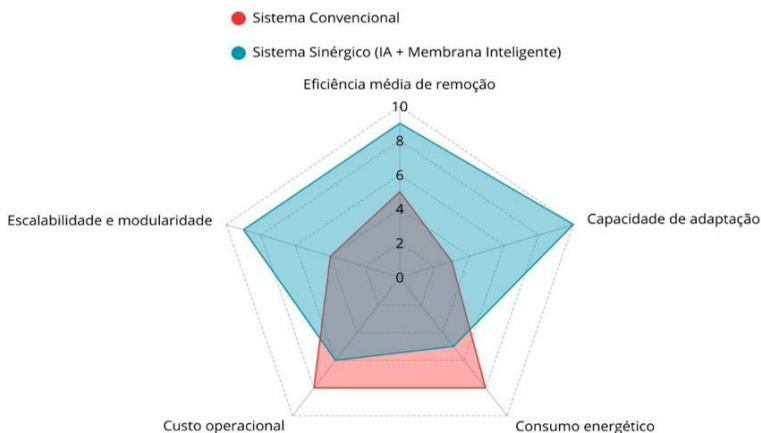
## SINERGIA IA E MEMBRANAS INTELIGENTES NA REMOÇÃO DE MICROPOLUENTES

A modelagem preditiva da adsorção e remoção de micropoluentes tem sido aprimorada, por meio da aplicação de técnicas de IA, permitindo antecipar o desempenho da remoção com base em variáveis como peso molecular, carga, diâmetro, pH, pressão transmembrana e características superficiais da membrana (Viet *et al.*, 2022). Outra aplicação poderosa da IA integra otimização com modelagem preditiva para permitir o ajuste dinâmico de parâmetros operacionais, bem como a minimização do consumo energético e de insumos químicos, tornando o processo mais sustentável e econômico (Shahouni *et al.*, 2024).

Estudos experimentais e em escala real também evidenciam o impacto potencial dessa sinergia: por exemplo, foi utilizado modelo de algoritmo genético para otimizar diferentes parâmetros operacionais, como pH, temperatura de alimentação e tempo de filtração para controlar a incrustação na ultrafiltração de águas residuais oleosas (Badrnezhad & Mirza, 2014), já em outra pesquisa, desenvolveram um modelo híbrido composto por um modelo físico e uma rede neural artificial para prever os parâmetros de incrustação em um tratamento de água por ultrafiltração (Coppola, *et al.*, 2021), o que reforça a viabilidade de IA aplicada tanto em processos de adsorção quanto em automação reativa para controle de micropoluentes emergentes.

A Figura 4 apresenta uma seleção de estudos recentes que evidenciam a aplicabilidade da combinação de IA com membranas avançadas em cenários reais ou experimentais. Os casos destacam comparativos com sistemas convencionais, mostrando ganhos na remoção de micropoluentes emergentes, otimização de desempenho e potencial para controle adaptativo.

**Figura 4 - Comparativo dos sistemas convencionais com os sistemas integrados de IA e membranas inteligentes.**



Fonte: autoria própria.

Esses estudos (Gaddala *et al.*, 2025; Pipich *et al.*, 2021; Zouhri, Kaidi, & Smaoui, 2021) demonstram claramente que o uso de IA, quando integrado a membranas inteligentes, amplia significativamente a eficiência na remoção de micropoluentes, otimiza o desempenho operacional e oferece caminhos mais sustentáveis para a gestão de efluentes.

## DESAFIOS E PERSPECTIVAS FUTURAS

Apesar dos resultados promissores alcançados pelos modelos de previsão de incrustação e de remoção de micropoluentes baseados em IA e membranas inteligentes, várias limitações e desafios persistem, particularmente em relação à sua robustez e generalização ao transitar de cenários experimentais controlados para operações de tratamento em escala real. Além da necessidade contínua de sensores robustos (pressão, fluxo, qualidade da água) e proteção de dados integrados ao sistema e plataformas analíticas confiáveis (Liang *et al.*, 2025). Estudos recentes mostram que a natureza distinta de muitos algoritmos de IA, particularmente modelos de aprendizado profundo, pode dificultar que os operadores entendam e confiem nas previsões. Essa falta de interpretabilidade pode dificultar a adoção de modelos de IA em operações práticas de tratamento, onde os operadores precisam tomar decisões com base nas informações saídas do modelo (Mersha *et al.*, 2024).

Quanto à responsividade, a durabilidade e a escalabilidade, a maturação de membranas inteligentes caminha junto de rotas de fabricação mais estáveis, mas persistem desafios de produção em escala, estabilidade de longo prazo e padronização para diferentes matrizes de efluentes. Estudos recentes indicam que o desenvolvimento de técnicas de fabricação de alto rendimento que possam manter as propriedades avançadas das membranas inteligentes sem comprometer

o desempenho é essencial para sua ampla adoção na indústria. O aprimoramento da estabilidade mecânica e da durabilidade a longo prazo dessas membranas é fundamental para garantir sua praticidade em aplicações reais (Liu *et al.*, 2024).

Já a cibersegurança e a proteção de dados tentam bloquear o acesso não autorizado aos dados dos sistemas de tratamento, pois estes são potencialmente úteis para preparar e implementar ataques e para espionagem industrial. Revisões do setor de água e esgoto mostram lacunas recorrentes na segurança, como a integridade e veracidade das informações recebidas. A violação da integridade pode interferir na operação e prejudicar a confiabilidade e a segurança do processo. Assim, a perda da disponibilidade ou interrupção das informações pode fazer com que os sistemas desliguem e interrompam o processo. Normalmente, a integridade e a disponibilidade são as preocupações mais importantes para sistemas, mas a prioridade dada a cada uma dessas metas de segurança depende dos riscos associados à perda dessas propriedades no contexto de um sistema específico (Ross, Mcevilley & Oren, 2016; Tuptuk *et al.*, 2021).

Por fim, a aplicação de Inteligência Artificial (IA) e Membranas Inteligentes (MIs) tem sido determinante na otimização de processos hídricos. Essas abordagens contribuem para a modelagem, automação e aprimoramento de sistemas de tratamento de águas residuais, agricultura hídrica e monitoramento de ecossistemas naturais. A integração dessas tecnologias visa a redução de custos e o aumento da eficiência, além de fornecer soluções computacionais para desafios complexos relacionados à química e aos processos físico-biológicos da água. Estudos prévios já demonstraram o sucesso desses métodos na previsão, modelagem, automação e otimização de operações em indústrias e sistemas hídricos (Alprol *et al.*, 2024).

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A crescente presença de micropoluentes emergentes (MPEs) em águas residuais representa um desafio crítico para a saúde humana e ambiental, exigindo tecnologias avançadas que superem as limitações dos métodos convencionais de tratamento. Nesse contexto, as membranas inteligentes (MIs) e a Inteligência Artificial (IA) despontam como soluções sinérgicas capazes de elevar a eficiência dos processos de separação, otimizando a remoção de poluentes persistentes como fármacos, micro e nanoplásticos e PFAS.

As MIs, com propriedades responsivas, seletividade ajustável e resistência elevada à bioincrustação, demonstram desempenho significativamente superior frente às membranas tradicionais. Aliadas à IA, por meio de técnicas como *machine learning*, deep learning, modelos híbridos e algoritmos evolutivos, possibilitam não apenas a previsão de bioincrustação e falhas, mas também o ajuste dinâmico de parâmetros operacionais, a otimização de ciclos de limpeza e o controle adaptativo em tempo real. Essa integração contribui para a redução do consumo energético e de insumos químicos, ao mesmo tempo em que prolonga a vida útil dos sistemas.

Apesar dos avanços, desafios permanecem. Entre eles, destacam-se a necessidade de sensores robustos, a escalabilidade dos materiais de MIs, a durabilidade a longo prazo, a complexidade de integração hardware/software e as questões de cibersegurança na operação de sistemas conectados. Tais barreiras reforçam a importância de esforços interdisciplinares para desenvolver soluções mais estáveis, economicamente viáveis e seguras.

Por fim, os resultados revisados neste trabalho indicam que a integração de IA e MIs tem potencial para transformar o tratamento de águas residuais em sistemas mais sustentáveis, adaptativos e descentralizados, capazes de responder às crescentes pressões ambientais. Avançar na validação em escala experimental e real, aliado à padronização de protocolos e ao fortalecimento da confiabilidade dos modelos preditivos, será determinante para consolidar o papel dessa sinergia como pilar do futuro no controle de bioincrustação e na remoção eficiente de micropoluentes emergentes.

## REFERÊNCIAS

- Abbas, M. A., *et al.* (2022). Environmental micropollutants. In *Environmental micropollutants* (pp. 315–329). Elsevier.
- Abdel-Basset, M., *et al.* (2022). A risk assessment model for cyber-physical water and wastewater systems: Towards sustainable development. *Sustainability*, 14(8), 4480. <https://doi.org/10.3390/su14084480>
- Abuwatfa, W. H., *et al.* (2023). A review on membrane fouling prediction using artificial neural networks (ANNs). *Membranes*, 13(7), 685. <https://doi.org/10.3390/membranes13070685>
- Acarer, S. (2023). Microplastics in wastewater treatment plants: Sources, properties, removal efficiency, removal mechanisms, and interactions with pollutants. *Water Science and Technology*, 87, 685–710. <https://doi.org/10.2166/wst.2023.022>
- Al-Kathiri, D. S. M. S., *et al.* (2025). Membrane fouling prediction and control using AI and machine learning: A comprehensive review. *Journal of Environmental & Earth Sciences*, 7(6). <https://journals.bilpubgroup.com/index.php/jees>
- Al-Obaidi, M. A., *et al.* (2021). Model-based simulation and genetic algorithm-based optimisation of spiral wound membrane RO process for improved dimethylphenol rejection from wastewater. *Membranes*, 11(8), 595. <https://doi.org/10.3390/membranes11080595>
- Al-Shami, K., *et al.* (2025). Understanding the role of electrostatic force, van der Waals force, and osmotic pressure in retinal function and barrier integrity. *International Journal of Retina and Vitreous*, 11(1), 19. <https://doi.org/10.1186/s40942-025-00643-y>

- Ali, N., *et al.* (2020). Design, engineering, and analytical perspectives of membrane materials with smart surfaces for efficient oil/water separation. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 127, 115902. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2020.115902>
- Almetwally, S. A. H., Hassan, M. K., & Mourad, M. H. (2020). Real-time Internet of Things (IoT) based water quality management system. *Procedia CIRP*, 91, 478–485. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.03.107>
- Alprol, A. E., *et al.* (2024). Artificial intelligence technologies revolutionizing wastewater treatment: Current trends and prospects. *Water*, 16(2), 314. <https://doi.org/10.3390/w16020314>
- Anjum, M., *et al.* (2019). Remediation of wastewater using various nano-materials. *Arabian Journal of Chemistry*, 12, 4897–4919. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2016.10.004>
- Argurio, P., *et al.* (2018). Photocatalytic membranes in photocatalytic membrane reactors. *Processes*, 6(9), 162. <https://doi.org/10.3390/pr6090162>
- Asad, A., *et al.* (2021). Gravity-assisted super high flux microfiltration polyamide-imide membranes for oil/water emulsion separation. *Journal of Membrane Science*, 621, Article 119019. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2020.119019>
- Badrnezhad, R., & Mirza, B. (2014). Modeling and optimization of cross-flow ultrafiltration using a hybrid neural network-genetic algorithm approach. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 20(2), 528–543. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2013.05.012>
- Baresel, C., *et al.* (2025). Assessing the potential of activated carbon and anion-exchange in combination to remove organic micropollutants from wastewater – Long-term pilot trials at Kungsängsverket WWTP, Uppsala, Sweden. *Science of the Total Environment*, 964, 178628. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178628>
- Bhatt, P., Bhandari, G., & Bilal, M. (2022). Occurrence, toxicity impacts, and mitigation of emerging micropollutants in the aquatic environments: Recent tendencies and perspectives. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107598. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107598>
- Cao, Z., *et al.* (2024). Machine learning in membrane design: From property prediction to AI-guided optimization. *Nano Letters*, 24(10), 2953–2960. <https://doi.org/10.1021/acs.nanolett.3c05137>
- Chen, K., *et al.* (2024). A rapid-convergent particle swarm optimization approach for multiscale design of high-permeance seawater reverse osmosis systems. *Communications Engineering*, 3, 149. <https://doi.org/10.1038/s44172-024-00289-y>
- Cheng, Y., *et al.* (2022). Advances in metal–organic framework-based membranes. *Chemical Society Reviews*, 51, 8300–8350. <https://doi.org/10.1039/D2CS00031H>
- Chu, H. W., *et al.* (2020). Carbon quantum dots for the detection of antibiotics and pesticides. *Journal of Food and Drug Analysis*, 28, 540–558. <https://doi.org/10.38212/2224-6614.1269>

- Coppola, G., *et al.* (2021). Bioplastic from renewable biomass: A facile solution for a greener environment. *Earth Systems and Environment*, 5, 231–251. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00208-7>
- Demedeiros, K., Hendawi, A., & Alvarez, M. (2023). A survey of AI-based anomaly detection in IoT and sensor networks. *Sensors*, 23(3), 1352. <https://doi.org/10.3390/s23031352>
- Fang, X., *et al.* (2025). Electrospun cellulose nanofiber membranes with photothermal/pH-induced switchable wettability for oil-water separation and elimination of bacteria. *Chemical Engineering Journal*, 164394. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.164394>
- Forhad, H. M., *et al.* (2024). An IoT-based real-time water quality monitoring system in water treatment plants (WTPs). *Heliyon*, 10(23).
- Gaddala, B. R., *et al.* (2025). Membrane fouling prediction and control using AI and machine learning: A comprehensive review. *Journal of Environmental & Earth Sciences*, 7(6), 315–350. <https://doi.org/10.30564/jees.v7i6.8630>
- Gaudio, M. T., *et al.* (2021). Artificial intelligence-based optimization of industrial membrane processes. *Earth Systems and Environment*, 5, 385–398. <https://doi.org/10.1007/s41748-021-00220-x>
- Geissen, V., *et al.* (2015). Emerging pollutants in the environment: A challenge for water resource management. *International Soil and Water Conservation Research*, 3(1), 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2015.03.002>
- Graça, C. A. L. (2025). Special issue “Advanced research on micropollutants in water”. *Environments*, 12(7), 225. <https://doi.org/10.3390/environments12070225>
- Gui, H., *et al.* (2025). GO-PANI nanofiltration membrane with pH response for high-efficiency water purification. *Journal of Water Process Engineering*, 69, 106889. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106889>
- Gupta, A., *et al.* (2024). Pharmaceutically active micropollutants: Origin, hazards and removal. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1339469. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2024.1339469>
- Hao, W., *et al.* (2019). Developing superhydrophobic rock wool for high-viscosity oil/water separation. *Chemical Engineering Journal*, 368, 837–846. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.02.161>
- Hu, J., *et al.* (2025). Amorphous Ti-MOF membrane for selective molecular sieving. *Journal of Membrane Science*, 717, 123635. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2024.123635>
- Jepsen, K. L., *et al.* (2019). Online backwash optimization of membrane filtration for produced water treatment. *Membranes*, 9(6), 68. <https://doi.org/10.3390/membranes9060068>

- Koelmans, A. A., Bakir, A., & Vijverberg, D. (2022). The role of microplastics in the fate and transport of pharmaceuticals in aquatic environments. *Environmental Science & Technology*, 56, 6643–6657.
- Li, A., et al. (2023). Elevated purification of urban rainwater runoff using a calamus constructed wetland with multi-layer carrier fillers. *Journal of Water Process Engineering*, 56, 104273. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104273>
- Liang, J., et al. (2025). Predictive framework for membrane fouling in full-scale membrane bioreactors (MBRs): Integrating AI-driven feature engineering and explainable AI (XAI). *Processes*, 13(8), 2352. <https://doi.org/10.3390/pr13082352>
- Liu, P., et al. (2014). Cellulose and chitin nanomaterials for capturing silver ions (Ag<sup>+</sup>) from water via surface adsorption. *Cellulose*, 21(1), 449–461. <https://doi.org/10.1007/s10570-013-0139-5>
- Liu, S., Jiang, H., & Li, Y. (2023). Construction of a tight ultrafiltration membrane for efficient dye/salt separation with physical and chemical self-healing properties. *Chemical Engineering Journal*, 467, 143456. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143456>
- Liu, W., et al. (2021). A review of the removal of microplastics in global wastewater treatment plants: Characteristics and mechanisms. *Environment International*, 146, 106277. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106277>
- Liu, X., et al. (2024). Smart membranes for separation and sensing. *Chemical Science*, 15(45), 18772–18788. <https://doi.org/10.1039/D4SC04793A>
- Masood, Z., et al. (2022). Application of nanocatalysts in advanced oxidation processes for wastewater purification: Challenges and prospects. *Catalysts*, 12(7), 741. <https://doi.org/10.3390/catal12070741>
- Mersha, M., et al. (2024). Explainable artificial intelligence: A survey of needs, techniques, applications, and future direction. *Neurocomputing*, 599, 128111. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2024.128111>
- Mondal, P. P., et al. (2023). Review of machine learning-based bioprocess optimization, monitoring, and control systems. *Bioresource Technology*, 370, 128523. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.128523>
- Mustafa, M., et al. (2025). Innovative approaches for micropollutant removal in greywater: AI-based solutions and future perspectives. *RSC Advances*, 15(16), 12125–12151. <https://doi.org/10.1039/D5RA00489F>
- Namdeti, R., et al. (2025). Innovative approaches in water decontamination: A critical analysis of biomaterials, nanocomposites, and stimuli-responsive polymers for effective solutions. *Journal of Environmental & Earth Sciences*, 7(1).
- Niu, C., Li, B., & Wang, Z. (2023). Using artificial intelligence-based algorithms to identify critical fouling factors and predict fouling behavior in anaerobic membrane bioreactors. *Journal of Membrane Science*, 687, 122076. <https://doi.org/10.1016/j.jm.2023.122076>

memsci.2023.122076

Pan, Y., *et al.* (2023). Recent research progress on the stimuli-responsive smart membrane: A review. *Nanotechnology Reviews*, 12(1), 20220538. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2022-0538>

Pathak, N., *et al.* (2020). Removal of organic micro-pollutants by conventional membrane bioreactors and high-retention membrane bioreactors. *Applied Sciences*, 10(8), 2969. <https://doi.org/10.3390/app10082969>

Pantuso, E., *et al.* (2023). Smart dynamic hybrid membranes with self-cleaning capability. *Nature Communications*, 14(1), 5751. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41446-9>

Pipich, V. *et al.* (2021). Silica Fouling in Reverse Osmosis Systems—Operando Small-Angle Neutron Scattering Studies. *Membranes*, 11(6), 413. <https://doi.org/10.3390/membranes11060413>

Qalyoubi, L., Al-Othman, A. & Al-Asheh, S. (2021). Recent progress and challenges of adsorptive membranes for the removal of pollutants from wastewater. Part II: Environmental applications, *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, Volume 3, 100102, <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100102>.

Rastgar, M. *et al.* (2022). Smart harvesting and in-situ application of piezoelectricity in membrane filtration systems. *Journal of Membrane Science*. Volume 660, 15, 120819. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2022.120819>.

Ross, R., McEvilley, M. & Oren, J. (2016). Systems security engineering: Considerations for a multidisciplinary approach in the engineering of trustworthy secure systems. *National Institute of Standards and Technology*, 800-160, 257.

Saleem, M. H. *et al.* (2024). Emerging trends in wastewater treatment: addressing microorganic pollutants and environmental impacts. *Sci. Total Environ.*, 913, Article 169755. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169755>.

Sengur-Tasdemir, R. *et al.* (2016). Biomimetic approaches for membrane Technologies. *Sep. Purif. Rev.*, 45(2), 122–140. <https://doi.org/10.1080/15422119.2015.1035443>.

Shahid, M. K. *et al.* (2020). A brief review of anaerobic membrane bioreactors emphasizing recent advancements, fouling issues, and future perspectives. *Journal of Environmental Management*, v. 270, p. 110909.

Shahouni, R. *et al.* (2024). Utilising artificial intelligence to predict membrane behaviour in water purification and desalination. *Water*, v. 16, n. 20, p. 2940. <https://doi.org/10.3390/w16202940>

Shi, S. *et al.* (2022). Recent progress in protective membranes fabricated via electrospinning: advanced materials, biomimetic structures, and functional applications. *Adv. Mater.*, 34, p. 2107938, <https://doi.org/10.1002/adma.202107938>.

Smith, J., Johnson, A. & Williams, B. (2020). Development of an IoT-based water quality monitoring system. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 17:3057-3068.

Solcova, O., Dlaskova, M. & Kastanek, F. (2025). Innovative Sorbents for the Removal of Micropollutants from Water. *Molecules*, v. 30, n. 7, p. 1444. <https://doi.org/10.3390/molecules30071444>.

Sun, L.-Y. *et al.* (2022). Improvements in multifunctional graphene oxide-based separation membranes: mechanism, modification, and Properties. *Mater. Today Commun.*, 33, Article 104274. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.104274>.

Suquet, J. *et al.* (2020). Development of an Environmental Decision Support System for Enhanced Coagulation in Drinking Water Production. *Water*, 12, 2115. <https://doi.org/10.3390/w12082115>.

Tang, Y. *et al.* (2019). Emerging pollutants in the water environment: Occurrence, monitoring, fate, and risk assessment. *Water Environment Research*, v. 91, n. 10, p. 984-991. <https://doi.org/10.1002/wer.1163>.

Tong, X. *et al.* (2020). Fouling properties of reverse osmosis membranes along the feed channel in an industrial-scale system for wastewater reclamation. *Sci. Total Environ.*, 713. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136673>.

Tufani, A. & Ozaydin Ince, G. (2017). Smart membranes with pH-responsive control of macromolecule permeability. *J. Membr. Sci.* 537, 255–262. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2017.05.024>.

Tuptuk, N. *et al.* (2021). A Systematic Review of the State of Cyber-Security in Water Systems. *Water*. 13(1):81. <https://doi.org/10.3390/w13010081>.

Viet, N. D. *et al.* (2022). Enhancement of membrane system performance using artificial intelligence technologies for sustainable water and wastewater treatment: A critical review. *Critical reviews in environmental science and technology*, v. 52, n. 20, p. 3689-3719. <https://doi.org/10.1080/10643389.2021.1940031>.

Wang, Z. *et al.* (2023). MBR membrane fouling diagnosis based on an improved residual neural network. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 11, n. 3, p. 109742. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109742>.

Wei, R. *et al.* (2020). Vapor-induced phase separation towards anion-/near-infraredresponsive pore channels for switchable anti-fouling membranes. *Journal of Materials Chemistry A*, v. 8, n. 18, p. 8934-8948. <https://doi.org/10.1039/D0TA02154G>.

Wu, T. *et al.* (2025). Machine Learning in the Design and Performance Prediction of Organic Framework Membranes: Methodologies, Applications, and Industrial Prospects. *Membranes*, v. 15, n. 6, p. 178.

Yan, Z. *et al.* (2020). Mussel-inspired polydopamine modification of polymeric membranes for the application of water and wastewater treatment: A review. *Chemical Engineering Research and Design*. Volume 157, Pages 195-214.

Yang, Q. *et al.* (2024). Creating smart chlorine-resistant polyamide reverse osmosis membranes via self-healing temperature-responsive nanocontainer functionalization. *Chemical Engineering Journal*. Volume 500, 15 November, 157566. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.157566>.

Yildirim, M. & Candan, Z. (2023). An Insight into the Next-Generation Smart Membranes. *Environ. Sci. Proc.* 25(1), 19. <https://doi.org/10.3390/ECWS-7-14256>.

You, D. *et al.* (2023). Networked Control System Based on PSO-RBF Neural Network Time-Delay Prediction Model. *Appl. Sci.* 13, 536. <https://doi.org/10.3390/app13010536>.

Yu, J. *et al.* (2021). Calcium ion-sodium alginate double cross-linked graphene oxide nanofiltration membrane with enhanced stability for efficient separation of dyes. *Separation and Purification Technology*, 276, Article 119348. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119348>.

Yusuf, A. *et al.* (2020). A review of emerging trends in membrane science and technology for sustainable water treatment, *Journal of Cleaner Production*. 266. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121867>.

Zou, L. -B. *et al.* (2022). Smart membranes for biomedical applications. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. Volume 49, Pages 34-45. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2022.06.006>.

Zouhri, L., Kaidi, S., & Smaoui, H. (2021). Parameter Identification by High-Resolution Inverse Numerical Model Based on LBM/CMA-ES: Application to Chalk Aquifer (North of France). *Water*, 13(11), 1574. <https://doi.org/10.3390/w13111574>.