

BIORREATORES DE MEMBRANA: UMA REVISÃO

L. L. Antunes¹

¹*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná (Unioeste), Toledo, Brasil (lauraantunes0495@gmail.com)*

Com o crescimento da população global e a expansão das atividades industriais, a demanda por água aumentou significativamente, intensificando também a necessidade de tratamento de efluentes. Nesse contexto, os biorreatores de membrana (MBRs) emergem como uma solução eficaz para remoção de matérias orgânicas e inorgânicas, contribuindo para a melhoria do tratamento e da reutilização de águas residuais; e assim, desempenhando um papel fundamental em atender às exigências crescentes por água de qualidade. O presente trabalho de revisão tem como objetivo abordar os principais aspectos dos MBRs, incluindo os fundamentos e as configurações dos biorreatores, além da problemática de incrustações e limpeza das membranas. As aplicações dos MBRs, suas vantagens e desvantagens, bem como os custos de operação também são discutidos. Espera-se que essa revisão contribua para o melhor entendimento dessa importante tecnologia e possa auxiliar pesquisas futuras nos campos relacionados.

Palavras-chave: Biorreatores de membrana; Tratamento de águas residuais; Escassez hídrica; Água de reúso.

INTRODUÇÃO

O rápido crescimento populacional e industrial tem gerado desafios ambientais significativos, especialmente decorrentes do descarte inadequado de efluentes, e de uma demanda crescente por recursos hídricos (Al-Asheh et al., 2021; Rahman et al., 2023). Diante desse cenário, tornou-se essencial o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis e eficientes para o tratamento e reutilização de águas residuais (Al-Asheh et al., 2021; Rahman et al., 2023).

O biorreator de membrana (MBR), um sistema complexo que integra o tratamento biológico com o processo de separação física líquido-sólido, ao acoplar um biorreator a um módulo de membrana, tem se destacado como uma tecnologia promissora para o melhor gerenciamento do ciclo de água e experimentado um rápido crescimento em uma variedade de aplicações práticas, tanto em pequena escala quanto em larga escala em todo o mundo, principalmente pela capacidade de produzir efluentes tratados de alta qualidade que podem ser reutilizados para diferentes propósitos (Belafi-Bako e Bakonyi, 2019; Burman e Sinha, 2018; Iorhemen et al., 2016; Rahman et al., 2023; Xiao et al., 2019).

A partir desse contexto, este estudo tem como objetivo explorar os principais conceitos e características do sistema MBR, assim como suas diversas aplicações, destacando sua importância no tratamento de efluentes.

DEFINIÇÃO E PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DE MBRs

Os biorreatores de membrana (MBRs) são um caso particular de operações de membrana integrada a um reator biológico (Al-Asheh et al., 2021; Belafi-Bako e Bakonyi, 2019). Esses sistemas funcionam como processos combinados, nos quais a conversão bioquímica ocorre simultaneamente à separação física (Du et al., 2020; Iorhemen et al., 2016).

No MBR, o efluente bruto entra no biorreator, onde a biomassa microbiana realiza a degradação da matéria orgânica por meio de processos bioquímicos em diferentes condições (aeróbias, anóxicas e anaeróbicas), transformando os poluentes em compostos mais simples, ao mesmo tempo que membranas de filtração (por exemplo, microfiltração e ultrafiltração) atuam como uma barreira física, retraindo partículas, microrganismos e poluentes, permitindo que apenas o efluente tratado passe através delas (Al-Asheh et al., 2021; Asante-Sackey et al., 2022; Belafi-Bako e Bakonyi, 2019; Elmoutez et al., 2023).

CONFIGURAÇÕES DE MBRs

Os sistemas MBRs são essencialmente implementados com base em duas configurações em termos de localização do módulo de membrana: configuração interna/submersa e configuração externa/fluxo lateral (Figura 1) (Ladewig e Al-Shaeli, 2017).

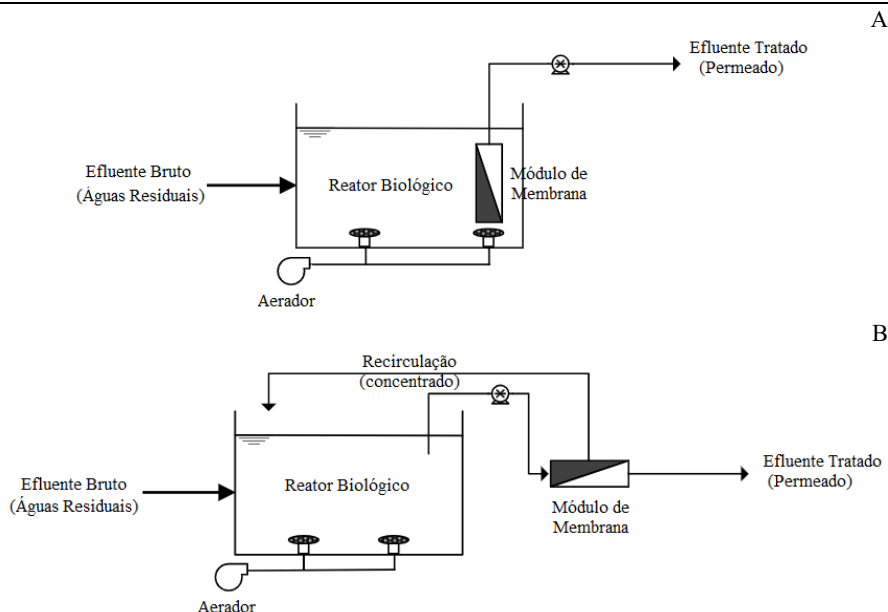


Figura 1. Configurações de biorreatores de membrana interna (A) e externa (B).
Fonte: Adaptado de Subtil et al. (2013).

No processo submerso a membrana está imersa no biorreator; enquanto no processo de fluxo lateral a membrana está localizada fora do biorreator e o efluente tratado é recirculado pelo lado primário do módulo de membrana (Belafi-Bako e Bakonyi, 2019; Hamed et al., 2019; Ladewig e Al-Shaeli, 2017).

As duas configurações dos MBRs apresentam distinções em relação às condições operacionais, mecanismos de filtração e tipos de membrana utilizados, e são aplicadas de acordo com as necessidades específicas de cada processo (Hamed et al., 2019). Nos sistemas MBRs de fluxo lateral, é comum utilizar membranas tubulares que realizam a

filtração de dentro para fora, conhecidas como membranas acionadas por pressão; por outro lado, nos sistemas MBRs submersos, é mais comum o uso de membranas de folha plana ou de fibra oca que realizam a filtração de fora para dentro, conhecidas como membranas a vácuo (Hamed et al., 2019).

O sistema MBR submerso, de forma geral, apresenta vantagens superiores em comparação com MBR de fluxo lateral, sendo mais amplamente aplicado no tratamento de efluentes (Hamed et al., 2019; Ladewig e Al-Shaeli, 2017). O Quadro 1 mostra uma comparação entre as principais características das duas configurações MBRs.

Quadro 1. Comparação entre MBRs submersos e MBRs de fluxo lateral.

	MBRs submersos	MBRs de fluxo lateral
Aplicação	Sistemas de escala municipal Sólidos em lodo ativado	Sistemas industriais Efluente de alimentação com alta temperatura
Cisalhamento fornecido por	Aeração	Bomba
Modo de operação	Filtração direta	Filtração tangencial
Pressão	Baixa	Alta
Consumo de energia	Significativamente baixo	Alto
Probabilidade de incrustação	Baixa	Alta
Fluxo	Constante	Relativamente variável
Eficiência hidráulica	Superior	Inferior
Design	Simple	Complexo

Fonte: Hamed et al. (2019) e Ladewig e Al-Shaeli (2017).

FOULING EM MBRs

A incrustação da membrana é um dos principais obstáculos para a aplicação mais ampla e em larga escala dos MBRs (Du et al., 2020; Iorhemen et al.,

2016). O fenômeno de incrustação pode ser atribuído à deposição ou acúmulo indesejável de diferentes substâncias suspensas ou dissolvidas na superfície externa ou nos poros (abertura e interior) das membranas, podendo ocasionar o estreitamento e

entupimento de poros e a formação da camada de torta (Iorhemen et al., 2016; Ladewig e Al-Shaeli, 2017).

Em termos operacionais, a incrustação da membrana resulta na diminuição do fluxo de permeado ou no aumento da pressão transmembrana, na redução do desempenho, da permeabilidade, e da vida útil das membranas, consequentemente aumentando os custos operacionais devido ao maior gasto de energia e à necessidade de limpeza e substituição mais frequentes das membranas (Iorhemen et al., 2016; Gkotsis et al., 2014; Ladewig e Al-Shaeli, 2017).

A ocorrência de incrustações é influenciada por uma variedade de fatores, tais como condições operacionais, estratégias de limpeza da membrana, características do efluente e propriedades da membrana; e, portanto, a eficiência do processo MBR está intimamente ligada ao gerenciamento do problema crítico de incrustação (Al-Asheh et al., 2021; Du et al., 2020).

Classificação da incrustação da membrana

A incrustação pode ser classificada em diferentes categorias (Hamedi et al., 2019).

Baseado no grau de remoção das incrustações da membrana, a incrustação pode ser qualificada como reversível (removível e irreversível) e irreversível (Hamedi et al., 2019). Em geral, a incrustação removível, eliminada por limpeza física, está associada a deposição de partículas fracamente ligadas

a membrana com a formação da camada de torta acima da superfície da membrana; enquanto a incrustação irreversível, removida por limpeza química, está relacionada ao bloqueio dos poros e as incrustações fortemente aderidas a membrana; já a incrustação irreversível é caracterizada por depósitos que não podem ser removidos completamente, mesmo com a aplicação de métodos de limpeza físicos ou químicos (Figura 2) (Al-Asheh et al., 2021; Du et al., 2020; Hamedi et al., 2019; Ladewig e Al-Shaeli, 2017).

De acordo com a composição dos poluentes, a incrustação da membrana pode ser dividida em três grupos: incrustação orgânica, incrustação inorgânica e bioincrustação (Du et al., 2020). A incrustação orgânica refere-se à deposição de compostos orgânicos, como óleos, gorduras, proteínas, polissacarídeos, ácidos húmicos, surfactantes e outras substâncias orgânicas do lodo, como substâncias poliméricas extracelulares e produtos microbianos solúveis na superfície da membrana ou no interior de seus poros (Chimuca et al., 2023; Hamedi et al., 2019; Gkotsis et al., 2014). Por outro lado, a incrustação inorgânica envolve a formação de depósitos de compostos inorgânicos, como sais minerais e óxidos metálicos, que se acumulam nas membranas (Gkotsis et al., 2014). Já a bioincrustação é caracterizada pelo crescimento de biofilmes e microrganismos na superfície da membrana, formando uma camada biológica aderida (Chimuca et al., 2023; Gkotsis et al., 2014).

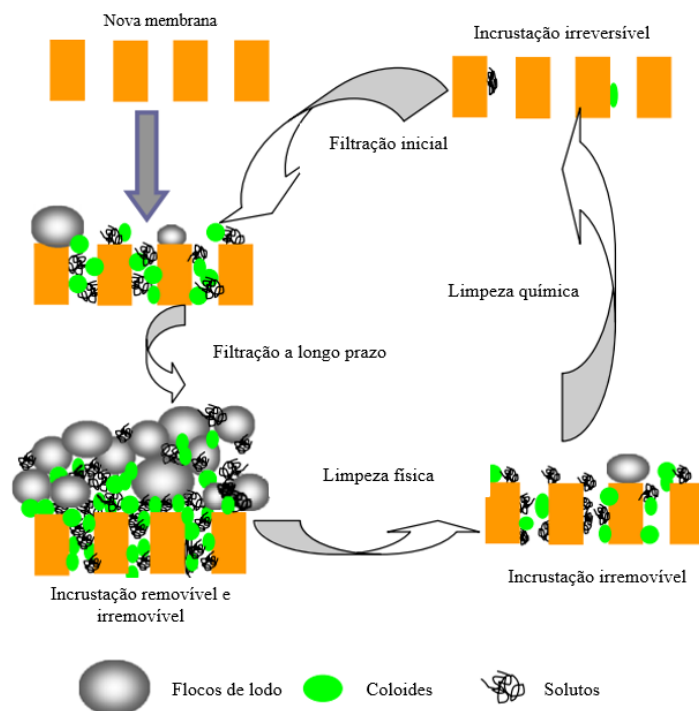


Figura 2. Ilustração esquemática da formação e remoção de incrustação em MBRs.

Fonte: Adaptado de Hamedi et al. (2019).

Outra classificação comum é baseada na localização da incrustação na membrana, que pode ser interna ou externa (Vela et al., 2021). A incrustação interna ocorre quando os incrustantes se acumulam dentro dos poros da membrana, enquanto a incrustação externa ocorre quando os incrustantes se acumulam na superfície da membrana (Ladewig e Al-Shaeli, 2017).

A classificação das incrustações em diferentes categorias proporciona uma compreensão mais aprofundada dos mecanismos de formação e dos poluentes envolvidos, permitindo o desenvolvimento de estratégias específicas para diminuir e tratar esses problemas de incrustação, contribuindo para melhorar o desempenho do sistema MBR e prolongar a vida útil das membranas (Vela et al., 2021).

Limpeza e cuidados com a membrana utilizada nos biorreatores

A incrustação requer a limpeza da membrana, a fim de promover efetivamente o controle e a remoção dos incrustantes (Du et al., 2020). Os métodos de limpeza no processo MBR podem ser categorizados em limpeza física, limpeza química e limpeza biológica; quais podem e normalmente são combinados a fim de obter um resultado mais eficaz (Du et al., 2020; Hamed et al., 2019; Wang et al., 2014).

A limpeza física aplicada principalmente para a remoção de incrustações removíveis, possibilita a operação contínua do MBR com um fluxo relativamente estável, sem causar contaminação secundária, mas requer um processo de limpeza mais frequente, acarretando em um aumento dos custos operacionais (Du et al., 2020). Os métodos físicos podem ser categorizados em hidráulicos (por exemplo, retrolavagem, relaxamento, aeração, descarga com água), mecânicos (por exemplo, adição de partículas e transportadores, vibração/rotação e raspagem) e ultrassônicos (Wang et al., 2014).

A limpeza química é empregada principalmente em incrustações orgânicas, inorgânicas e biológicas, quais limpeza física não consegue remover adequadamente, denominadas irremovíveis (Ladewig e Al-Shaeli, 2017). O processo envolve a utilização de uma variedade de agentes químicos (alcalinos, ácidos, oxidantes, desinfetantes, surfactantes, quelantes e detergentes, etc.) com capacidade de eliminar os incrustantes persistentes e recuperar a funcionalidade das membranas, garantindo um desempenho adequado do sistema (Hamed et al., 2019; Meng et al., 2017). Esse tipo de limpeza pode ser realizado *in situ* durante as operações normais do MBR sem remover o módulo de membrana, ou ainda, em condições severas de incrustações, *ex situ*, onde as membranas são transferidas e imersas em um tanque de limpeza com reagentes químicos (Bagheri e Mirbagheri, 2018; Meng et al., 2017). No entanto, a utilização de agentes

químicos resulta na produção de alguns subprodutos, formação de espuma, lise celular, podendo inclusive ocasionar a interrupção do bioprocessamento por afetar a comunidade microbiana, ou ainda, em algumas situações, resultar em incrustações secundárias; além disso, a exposição frequente a químicos pode causar deterioração das propriedades da membrana, como tamanho dos poros, porosidade da superfície, hidrofobicidade da superfície, integridade, resistência mecânica, e tempo de vida (Bagheri e Mirbagheri, 2018; Du et al., 2020; Hamed et al., 2019).

A limpeza biológica é uma técnica eficiente e sustentável utilizada no controle da bioincrustação, minimizando os efeitos adversos na comunidade microbiana e nas características da membrana. Essa abordagem controla a incrustação principalmente através da degradação enzimática e bacteriana de biopolímeros, bem como pela otimização da estrutura da camada da torta, reduzindo o potencial de formação de biofilme, por meio da alteração das interações entre células e membrana, e da diminuição da atividade microbiana sem prejudicar as células depositadas (Bagheri e Mirbagheri, 2018; Hamed et al., 2019). Entre as estratégias biológicas para mitigar a incrustação da membrana, a aplicação de enzimas QQ (*Quorum quenching* - extinção de quórum), D-aminoácidos, protozoários e metazoários são os principais métodos investigados (Hamed et al., 2019; Meng et al., 2017).

Além dos protocolos de limpezas, diferentes métodos de controle de incrustação têm sido utilizados para minimizar a incrustação em MBRs, são eles: pré-tratamento, modificação do efluente, materiais da membrana/modificação da superfície da membrana e otimização das condições operacionais (Al-Asheh et al., 2021; Gkotsis et al., 2014; Lin et al., 2013). Esses cuidados devem ser adaptados às características específicas de cada sistema de biorreator e às condições do efluente a ser tratado, visando não apenas reduzir o potencial de incrustações e a eficiência do sistema, mas também maximizar a vida útil das membranas, consequentemente reduzindo os custos de operação (Hamed et al., 2019; Ladewig e Al-Shaeli, 2017).

VANTAGENS E DESVANTAGENS DOS MBRs

Os biorreatores de membrana têm atraído grande atenção como resultado de suas inúmeras vantagens sobre métodos de tratamento convencionais (Ladewig e Al-Shaeli, 2017). As vantagens dos MBRs incluem alta qualidade do efluente tratado, elevada eficiência do processo biológico, menor área ocupada, excelente capacidade de desinfecção, retenção absoluta de biomassa, menor produção de lodo, remoção total de bactérias, baixo impacto ambiental, maior possibilidade de ocorrência simultânea de nitrificação

e desnitrificação, alta eficiência de remoção de demanda biológica de oxigênio e demanda química de oxigênio, capacidade de controle sobre o tempo de retenção de lodo (alto) e o tempo de retenção hidráulica (baixo), ao mesmo tempo que pode operar maiores cargas orgânicas volumétricas (Al-Khafaji et al., 2022; Hamed et al., 2019; Ladewig e Al-Shaeli, 2017; Rahman et al., 2023).

Apesar das vantagens dos MBRs, o uso generalizado do sistema ainda é limitado, devido a despesas de implantação e operação elevadas, alto custo de capital, complexidade operacional do processo, alto consumo de energia, problemas de incrustações, monitoramento, manutenção e substituição frequente das membranas, que prejudicam seriamente o desempenho do MBR (Al-Khafaji et al., 2022; Hamed et al., 2019; Ladewig e Al-Shaeli, 2017; Rahman et al., 2023).

No entanto, nem todas as vantagens e desvantagens se aplicam igualmente a todos os casos, uma vez que tais parâmetros podem variar dependendo das especificidades do sistema e das condições de operação (Hamed et al., 2019; Ladewig e Al-Shaeli, 2017).

APLICAÇÕES DE MBRs

MBR é considerado uma tecnologia consolidada, amplamente empregada em todo mundo no tratamento de águas residuais provenientes de fontes municipais, domésticas e industriais, incluindo os setores alimentícios, farmacêuticos, químicos, eletrônicos, têxteis, vinícolas, petrolíferos, de papel e celulose, e de processamento de animais, especialmente em locais onde área de ocupação é limitada e uma alta qualidade da água é exigida (Lindamulla et al., 2022; Pervez et al., 2020; Wang et al., 2014; Xiao et al., 2019).

Além das aplicações tradicionais, o MBR também vem sendo implementado em outras áreas, demonstrando sua versatilidade e eficácia, como no tratamento de lixiviado de aterro sanitário, digestão de lodo, tratamento de excremento humano e adubos, dessalinização da água do mar e recuperação de nutrientes (Belafi-Bako e Bakonyi, 2019; Luo et al., 2017; Wang et al., 2014; Ye et al., 2020).

CARACTERÍSTICAS ECONÔMICAS DE MBRs

O número de estudos científicos que abordam os custos de biorreatores de membrana reflete a escassez de dados econômicos disponíveis sobre o assunto (Dalri-Cecato et al., 2020; Judd et al., 2017). Além disso, as informações existentes sobre os custos dos sistemas MBRs são inconsistentes, desuniformes e não são atualizadas regularmente, o que consequentemente acaba prejudicando a capacidade de avaliar a viabilidade econômica dessa tecnologia (Dalri-Cecato et al., 2020; Judd et al., 2017). A

despesa total de uma instalação MBR consiste nas despesas de capital e nas despesas operacionais (Rahman et al., 2023).

A implantação de sistemas MBRs envolve custos iniciais significativos, que podem variar amplamente dependendo de fatores como a escala do sistema, a complexidade do design e os materiais utilizados (Gao et al., 2021; Roccaro e Vagliasindi, 2020). Esses custos incluem a aquisição e instalação dos módulos de membrana, o projeto e a construção das estruturas de suporte e infraestrutura, os sistemas de controle e automação, além dos custos associados ao comissionamento e testes iniciais do sistema (Rahman et al., 2023; Roccaro e Vagliasindi, 2020; Zhang et al., 2021). Estudos indicam que a escolha do tipo de membrana, a configuração do reator e a localização geográfica também influenciam os custos de implantação, uma vez que estes fatores impactam diretamente nas despesas com transporte, mão de obra e requisitos técnicos específicos (Gao et al., 2021; Roccaro e Vagliasindi, 2020). A falta de padronização nas metodologias de cálculo e a variação nas condições locais tornam difícil a comparação direta dos custos de implantação entre diferentes projetos, adicionando uma camada de incerteza na análise econômica dessa tecnologia (Dalri-Cecato et al., 2020; Roccaro e Vagliasindi, 2020).

Por outro lado, o custo de operação de um MBR é composto por diversos fatores, como custos de consumo de energia, produtos químicos e agentes de limpeza, substituição de membrana, tratamento e disposição de lodo, salário dos funcionários e manutenção/substituição de equipamentos, sendo influenciado principalmente pelo tamanho do sistema (Dalri-Cecato et al., 2020; Rahman et al., 2023). No entanto, há uma controvérsia em relação à inclusão de alguns elementos como custos de operação, o que pode levar a variações nos valores encontrados em diferentes estudos e na falta de uniformidade na interpretação dos custos de operacionais (Dalri-Cecato et al., 2020; Judd et al., 2017).

Embora não tenham sido encontradas pesquisas recentes datadas no ano de 2024 sobre os custos de capital e de operação dos MBRs; com base em alguns estudos anteriores, os custos médios de implantação podem variar entre 4000 a 10000 CNY ($\text{m}^3 \text{d}^{-1}$)⁻¹ (CNY = Yuan chinês; 1 CNY \approx 0,73 BRL), em sistemas com capacidade de 5000 a 10000 $\text{m}^3 \text{d}^{-1}$; enquanto os custos médios operacionais podem variar entre 0,61 a 1,94 CNY m^{-3} (CNY = Yuan chinês; 1 CNY \approx 0,73 BRL) (Gao et al., 2021; Zhang et al., 2021). No entanto, é importante ressaltar que esses valores provavelmente não refletem os custos atuais, uma vez que além da disponibilidade de dados econômicos ser limitada, os custos podem variar

amplamente de acordo com inúmeros fatores dos sistemas MBRs.

AVANÇOS RECENTES E PERSPECTIVAS FUTURAS

MBRs têm emergido como uma tecnologia promissora para aprimorar o tratamento de águas residuais, oferecendo melhorias consistentes na qualidade dos efluentes (Liu et al., 2022; Qin et al., 2018). Essa inovação não apenas facilita a implementação de novos esquemas de tratamento e recuperação de água, mas também responde de maneira eficaz às crescentes preocupações ambientais, especialmente diante do estresse hídrico enfrentado globalmente (Brepols, 2020; Hamed et al., 2019).

Para lidar com desafios emergentes relacionados à qualidade da água, tais como a redução de patógenos, resistência a antibióticos, presença de microplásticos e micropoluentes antropogênicos, os MBRs e os esquemas de processamento baseados neles surgem como soluções viáveis (Brepols, 2020; Hube e Wu, 2021). No entanto, é essencial reconhecer que o uso de águas recicladas e reutilizadas apresenta riscos potenciais, e, portanto, são necessárias novas políticas, estratégias, pesquisas e diretrizes tecnológicas para orientar a implementação desses sistemas ao redor do mundo (Brepols, 2020).

Recentemente, uma série de avanços tem impulsionado a pesquisa e desenvolvimento dos sistemas MBRs, visando atender às crescentes demandas por tratamento de águas residuais mais eficiente e sustentável, promovendo assim novas perspectivas para sua aplicação futura (Liu et al., 2022; Rahman et al., 2023).

Uma das áreas de pesquisa mais promissoras reside nos materiais de membrana. Novos materiais, especialmente mais duráveis, eficientes e de baixo custo, estão sendo desenvolvidos para aprimorar a eficiência de filtração, com o objetivo de aumentar a capacidade de retenção de contaminantes, permitir taxas de fluxo mais elevadas, minimizar incrustações e prolongar a vida útil das membranas (Mahmood et al., 2022; Qin et al., 2018).

Além disso, a integração de tecnologias avançadas está moldando o futuro dos MBRs (Liu et al., 2022; Qin et al., 2018). A nanotecnologia, por exemplo, oferece a possibilidade de projetar membranas com porosidade controlada em escala molecular, permitindo uma separação mais precisa de sólidos e líquidos (Pervez et al., 2020; Vatanpour et al., 2022). Enquanto isso, avanços na biotecnologia estão ampliando as capacidades dos MBRs para degradar uma gama mais ampla de poluentes, incluindo compostos orgânicos persistentes (Asif et al., 2019; Sengupta et al., 2022). A aplicação de inteligência

artificial e sistemas de monitoramento e controle avançados também está sendo explorada para otimizar o desempenho operacional dos MBRs, reduzir custos de energia e maximizar a eficiência do processo (Kamali et al., 2021; Wagh et al., 2023).

Melhorias práticas nos processos já reduziram significativamente o consumo de energia dos MBRs e prolongaram os tempos de vida útil das membranas (Brepols, 2020). A água recuperada pelo MBR, hoje, demanda menos energia e tem um impacto ambiental menor do que a água produzida por outros processos não convencionais (Brepols, 2020). No entanto, ainda há espaço para melhorias, como a automação aprimorada, o desenvolvimento de membranas menos propensas a incrustações e mais robustas, e esquemas de processos mais eficientes, flexíveis e bem adaptados (Brepols, 2020).

Os avanços contínuos nos MBRs delineiam uma trajetória promissora em direção a uma gestão mais eficaz e ambientalmente consciente das águas residuais, contribuindo para uma abordagem holística e avançada na preservação dos recursos hídricos (Qin et al., 2018; Rahman et al., 2023).

CONCLUSÃO

Os biorreatores de membrana apresentam-se como uma tecnologia eficiente para o tratamento e reutilização de águas residuais, demonstrando muitas vantagens sobre o tratamento convencional. Apesar dos desafios associados ao *fouling* e dos custos iniciais mais elevados, suas vantagens, como alta eficiência de remoção de poluentes, qualidade superior do efluente tratado e menor espaço físico requerido, tornam os MBRs uma opção atraente para diversas aplicações. Além disso, com uma manutenção adequada e a implementação de estratégias eficientes de limpeza, é possível maximizar o desempenho e a vida útil da membrana, garantindo a eficiência e a sustentabilidade dos MBRs.

REFERÊNCIAS

- AL-ASHEH, S.; BAGHERI, M.; AIDAN, A. Membrane bioreactor for wastewater treatment: A review. **Case Studies in Chemical and Environmental Engineering**, v. 4, 100109, 2021.
- AL-KHAFI, S.A.; AL-REKABI, W.S.; MAWAT, M.J. Apply membrane biological reactor (MBR) in industrial wastewater treatment: A mini review. **Eurasian Journal of Engineering and Technology**, v. 7, p. 98-106, 2022.
- ASANTE-SACKY, D.; RATHILAL, S.; TETTEH, E.K.; ARMAH, E.K. Membrane bioreactors for produced water treatment: A mini-review. **Membranes**, v. 12, n. 3, 275, 2022.
- ASIF, M.B.; HAI, F.I.; JEGATHEESAN, V.; PRICE, W.E.; NGHIEM, L.D.; YAMAMOTO, K. Applications of membrane bioreactors in biotechnology processes. In:

BASILE, A.; CHARCOSSET, C. (Eds.). **Current Trends and Future Developments on (Bio-) Membranes**. Cambridge: Elsevier, 2019, p. 223-257, Cap. 8.

BAGHERI, M.; MIRBAGHERI, S.A. Critical review of fouling mitigation strategies in membrane bioreactors treating water and wastewater. **Bioresource Technology**, v. 258, p. 318-334, 2018.

BELAFI-BAKO, K.; BAKONYI, P. Integration of membranes and bioreactors. In: JACOB-LOPES, E.; ZEPKA, L.Q. (Eds.). **Biotechnology and Bioengineering**. Londres: IntechOpen, 2019, Cap. 8.

BREPOLS, C. Sustainable adoption and future perspectives for membrane bioreactor applications. In: MANNINA, G.; PANDEY, A.; LARROCHE, C.; NG, H.Y.; NGO, H.H. (Eds.). **Current Developments in Biotechnology and Bioengineering**. Cambridge: Elsevier, 2020, p. 205-233, Cap. 9.

BURMAN, I.; SINHA, A. A review on membrane fouling in membrane bioreactors: Control and mitigation. In: GUPTA, T.; AGARWAL, A.; AGARWAL, R.; LABHSETWAR, N. (Eds.). **Environmental Contaminants. Energy, Environment, and Sustainability**. Singapore: Springer, 2018, p. 281-315.

CHIMUCA, J.F.J.; CANTO, C.S.A.; SOUSA, J.T.; LEITE, V.D.; LOPES, W.S. Anaerobic dynamic membrane bioreactor applied to wastewater treatment: A review. **Afinidad - Journal of Chemical Engineering Theoretical and Applied Chemistry**, v. 80, n. 598, p. 19-34, 2023.

DALRI-CECATO, L.; BATTISTELLI, A.A.; LAPOLLI, F.R. CAPEX and OPEX evaluation of a membrane bioreactor aiming at water reuse. In: FILHO, W.L.; GUERRA, J.B.S.A. (Eds.). **Water, Energy and Food Nexus in the Context of Strategies for Climate Change Mitigation. Climate Change Management**. Cham: Springer, 2020, p. 137-152, Cap. 12.

DU, X.; SHI, Y.; JEGATHEESAN, V.; HAQ, I.U. A review on the mechanism, impacts and control methods of membrane fouling in MBR system. **Membranes**, v. 10, n. 2, 24, 2020.

ELMOUTEZ, S.; ABUSHABAN, A.; NECIBI, M.C.; SILLANPÄÄ, M.; LIU, J.; DHIBA, D.; CHEHBOUNI, A.; TAKY, M. Design and operational aspects of anaerobic membrane bioreactor for efficient wastewater treatment and biogas production. **Environmental Challenges**, v. 10, 100671, 2023.

GAO, T.; XIAO, K.; ZHANG, J.; ZHANG, X.; WANG, X.; LIANG, S.; SUN, J.; MENG, F.; HUANG, X. Cost-benefit analysis and technical efficiency evaluation of full-scale membrane bioreactors for wastewater treatment using economic approaches. **Journal of Cleaner Production**, v. 301, 126984, 2021.

GKOTSIS, P.K.; BANTI, D.C.; PELEKA, E.N.; ZOUBOULIS, A.I.; SAMARAS, P.E. Fouling issues in membrane bioreactors (MBRs) for wastewater treatment: Major mechanisms, prevention and control strategies. **Processes**, v. 2, n. 4, p. 795-866, 2014.

HAMEDI, H.; EHTESHAMI, M.; MIRBAGHERI, S.A.; RASOULI, S.A.; ZENDEHBOUDI, S. Current status and future prospects of membrane bioreactors (MBRs) and fouling phenomena: A systematic review. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v. 97, n. 1, p. 32-58, 2019.

HUBE, S.; WU, B. Mitigation of emerging pollutants and pathogens in decentralized wastewater treatment processes: A review. **Science of The Total Environment**, v. 779, 146545, 2021.

IORHEMEN, O.T.; HAMZA, R.A.; TAY, J.H. Membrane bioreactor (MBR) technology for wastewater treatment and reclamation: Membrane fouling. **Membranes**, v. 6, n. 2, 33, 2016.

JUDD, S.J. Membrane technology costs and me. **Water Research**, v. 122, p.1-9, 2017.

KAMALI, M.; APPELS, L.; YU, X.; AMINABHAVI, T.M.; DEWIL, R. Artificial intelligence as a sustainable tool in wastewater treatment using membrane bioreactors. **Chemical Engineering Journal**, v. 417, 128070, 2020.

LADEWIG, B.; AL-SHAELI, M.N.Z. **Fundamentals of Membrane Bioreactors: Materials, Systems and Membrane Fouling**. Singapura: Springer, 2017.

LIN, H.; PENG, W.; ZHANG, M.; CHEN, J.; HONG, H.; ZHANG, Y. A review on anaerobic membrane bioreactors: Applications, membrane fouling and future perspectives. **Desalination**, v. 314, p. 169-188, 2013.

LINDAMULLA, L.M.L.K.B.; JAYAWARDENE, N.K.R.N.; WIJERATHNE, W.S.M.S.K.; OTHMAN, M.; NANAYAKKARA, K.G.N.; JINADASA, K.B.S.N.; HERATH, G.B.B.; JEGATHEESAN, V. Treatment of mature landfill leachate in tropical climate using membrane bioreactors with different configurations. **Chemosphere**, v. 307, 136013, 2022.

LIU, W.; SONG, X.; NA, Z.; LI, G.; LUO, W. Strategies to enhance micropollutant removal from wastewater by membrane bioreactors: Recent advances and future perspectives. **Bioresource Technology**, v. 344, 126322, 2022.

LUO, W.; PHAN, H.V.; LI, G.; HAI, F.I.; PRICE, W.E.; ELIMELECH, M.; NGHIEM, L.D. An osmotic membrane bioreactor-membrane distillation system for simultaneous wastewater reuse and seawater desalination: Performance and implications. **Environmental Science & Technology**, v. 51, n. 24, p. 14311-14320, 2017.

MAHMOOD, Z.; CHENG, H.; TIAN, M. A critical review on advanced anaerobic membrane bioreactors (AnMBRs) for wastewater treatment: advanced membrane materials and energy demand. **Environmental Science: Water Research & Technology**, v. 8, p. 2126-2144, 2022.

MENG, F.; ZHANG, S.; OH, Y.; ZHOU, Z.; SHIN, H.S.; CHAE, S.R. Fouling in membrane bioreactors: An updated review. **Water Research**, v. 114, p. 151-180, 2017.

PERVEZ, M.N.; BALAKRISHNAN, M.; HASAN, S.W.; CHOO, K.; ZHAO, Y.; CAI, Y.; ZARRA, T.; BELGIORNO, V.; NADDEO, V. A critical review on

nanomaterials membrane bioreactor (NMs-MBR) for wastewater treatment. **npj Clean Water**, v. 3, n. 43, 2020.

QIN, L.; ZHANG, Y.; XU, Z.; ZHANG, G. Advanced membrane bioreactors systems: New materials and hybrid process design. **Bioresource Technology**, v. 269, p. 476-488, 2018.

RAHMAN, T.U.; ROY, H.; ISLAM, M.R.; TAHMID, M.; FARIHA, A.; MAZUMDER, A.; TASNIM, N.; PERVEZ, M.N.; CAI, Y.; NADDEO, V.; ISLAM, M.S. The advancement in membrane bioreactor (MBR) technology toward sustainable industrial wastewater management. **Membranes**, v. 13, n. 2, 181, 2023.

ROCCARO, P.; VAGLIASINDI, F.G.A. Membrane bioreactors for wastewater reclamation: Cost analysis. In: MANNINA, G.; PANDEY, A.; LARROCHE, C.; NG, H.Y.; NGO, H.H. **Current Developments in Biotechnology and Bioengineering**. Cambridge: Elsevier, 2020, p. 311-322, Cap. 13.

SENGUPTA, A.; JEBUR, M.; KAMAZ, M.; WICKRAMASINGHE, S.R. Removal of emerging contaminants from wastewater streams using membrane bioreactors: A review. **Membranes**, v. 12, n. 1, 60, 2022.

SUBTIL, E.L.; HESPAÑHOL, I.; MIERZWA, J.C. Submerged membrane Bioreactor (sMBR): A promising alternative to wastewater treatment for water reuse. **Revista Ambiente e Água**, v. 8, n. 3, p. 129-142, 2013.

VATANPOUR, V.; AĞTAŞ, M.; ABDELRAHMAN, A.M.; ERŞAHİN, M.E.; OZGUN, H.; KOYUNCU, I. Nanomaterials in membrane bioreactors: Recent progresses, challenges, and potentials. **Chemosphere**, v. 302, 134930, 2022.

VELA, R. A review of the factors affecting the performance of anaerobic membrane bioreactor and strategies to control membrane fouling. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 20, p. 607-644, 2021.

WAGH, M.; WADKAR, D.V.; NANGARE, P. Application of artificial intelligence and IoT to membrane bioreactor (MBR) and sewage treatment plant. In: PAWAR, P.M.; RONGE, B.P.; GIDDE, R.R.; PAWAR, M.M.; MISAL, N.D.; BUDHEWAR, A.S.; MORE, V.V.; REDDY, P.V. **Techno-societal**. Cham: Springer, 2022, p. 21-28.

WANG, Z.; MA, J.; TANG, C.Y.; KIMURA, K.; WANG, Q.; HAN, X. Membrane cleaning in membrane bioreactors: A review. **Journal of Membrane Science**, v. 468, p. 276-307, 2014.

XIAO, K.; LIANG, S.; WANG, X.; CHEN, C.; HUANG, X. Current state and challenges of full-scale membrane bioreactor applications: A critical review. **Bioresource Technology**, v. 271, p. 473-481, 2019.

YE, Y.; NGO, H.H.; GUO, W.; CHANG, S.W.; NGUYEN, D.D.; ZHANG, X.; ZHANG, J.; LIANG, S. Nutrient recovery from wastewater: From technology to economy. **Bioresource Technology Reports**, v. 11, 100425, 2020.

ZHANG, J.; XIAO, K.; LIU, Z.; GAO, T.; LIANG, S.; HUANG, X. Large-scale membrane bioreactors for industrial wastewater treatment in China: Technical and

economic features, driving forces, and perspectives. **Engineering**, v. 7, n. 6, p. 868-880, 2021.