



Microfiltração no tratamento de Água Produzida: Uma revisão

Gustavo Nogueira Souza¹ e Licianne Pimentel de Santa Rosa²

¹Graduando em Engenharia Ambiental e Sanitária, São Cristóvão, Brasil

²Programa de Pós-graduação em engenharia química, São Cristóvão, Brasil

Autor correspondente: gustaa@academico.ufs.br

A água produzida é o principal efluente da indústria do petróleo, e exige tratamento eficiente antes do descarte. Diversas técnicas têm sido empregadas na literatura para o seu tratamento, tais como: filtração, flotação, osmose reversa. Nesse contexto, este estudo tem como objetivo realizar uma revisão da literatura sobre a aplicação da microfiltração no tratamento da água produzida. Para tal, definiu-se um período de busca de 10 anos, considerado adequado para contemplar os avanços mais recentes e relevantes na área. As buscas foram realizadas em bases de dados amplamente reconhecidas na literatura científica, incluindo: Science Direct e Scopus. Aspectos como desempenho, influência das condições operacionais e principais mecanismos de *fouling* foram avaliados. Os resultados indicaram elevada eficiência de remoção de contaminantes porém com limitações associadas à incrustação.

Palavras-chave: Microfiltração; Água Produzida; Tratamento por membrana

INTRODUÇÃO

A produção de petróleo e gás natural está associada à geração de elevados volumes de efluentes, especialmente a água produzida. Esse efluente corresponde à fração aquosa, recuperada juntamente com o óleo cru e o gás natural, e pode ter origem tanto na água de formação do reservatório quanto na água de injeção, utilizada para aumentar a recuperação do óleo e gás natural. Em estágios avançados de produção (poços maduros), observa-se um aumento expressivo na razão água/óleo, que pode chegar a uma razão de 12 (v/v) (Arowoshola et al., 2011), e resulta em maiores volumes de efluente, que aumenta os desafios relacionados ao seu manejo e tratamento.

Além do elevado volume gerado, a água produzida apresenta composição química complexa, dependendo das características do reservatório, do tipo de perfuração e do hidrocarboneto produzido (Guerra et al., 2011; Neff, 2011). Em unidades offshore, essas dificuldades são agravadas por limitações de espaço físico, restrições operacionais e exigências legais cada vez mais rigorosas quanto ao descarte de efluentes. Nesse contexto, é fundamental o desenvolvimento e a aplicação de tecnologias de tratamento capazes de atender aos padrões regulatórios, garantindo eficiência e viabilidade operacional.

Dentre as tecnologias disponíveis, os processos de separação por membranas têm recebido destaque, especialmente a microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose reversa. Esses processos apresentam elevada eficiência na remoção de óleo

emulsificado e sólidos suspensos, além de possibilitarem operação contínua e modular, e uso reduzido de produtos químicos (Mansi et al., 2023). Entre essas, a microfiltração se destaca como uma etapa no tratamento de água produzida, como tecnologia principal ou como pré-tratamento. No entanto, a filtração por membranas é limitada pelo fenômeno de incrustação (*fouling*), caracterizado pela deposição e acúmulo de partículas de óleo na superfície e nos poros da membrana, que resulta na redução do fluxo de permeado e no aumento dos custos operacionais (Tummons et al., 2020). Uma das técnicas utilizadas para a mitigação do *fouling* é a integração entre os diferentes processos por membrana, como unidades de microfiltração, ultrafiltração e osmose reversa.

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo realizar uma revisão sistemática da literatura para analisar a situação atual do processo de microfiltração de água produzida, entender suas limitações e formas de contornar o *fouling* e otimizar o processo.

MATERIAL E MÉTODOS

A busca bibliográfica foi realizada nas bases de dados Science Direct e Scopus, por serem amplamente reconhecidas na área de engenharia ambiental e de processos.

Foram utilizadas combinações de palavras-chave relacionadas ao tema, incluindo os termos "produced water" e "microfiltration", associados a operadores booleanos (AND, OR), de forma a refinar os

resultados e garantir maior especificidade da busca. Adicionalmente, foram aplicados filtros para seleção de artigos publicados no período de 2015 a 2025, e áreas relevantes.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A busca inicial resultou em aproximadamente 694 estudos na base Science Direct e 127 estudos na base Scopus. As figuras 1 e 2 apresentam o s quantitativos de artigos encontrados, por ano de publicação nos buscadores Science Direct e Scopus, respectivamente. Em seguida, foi realizada uma etapa de triagem por título, na qual foram excluídos trabalhos não diretamente relacionados ao tratamento de água produzida por processos de membrana. Essa etapa foi conduzida por ordem de relevância, sendo interrompida ao atingir a saturação temática, momento em que novos estudos não apresentavam contribuições significativas ao escopo da pesquisa.

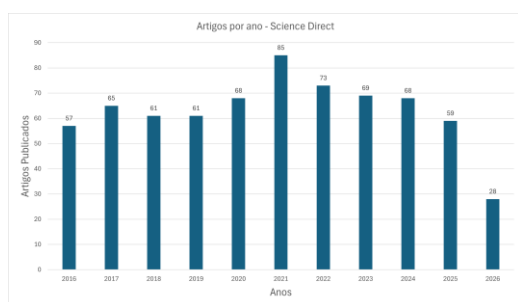


Figura 1. Quantitativo de artigos encontrados no buscador Science Direct, por ano de publicação.

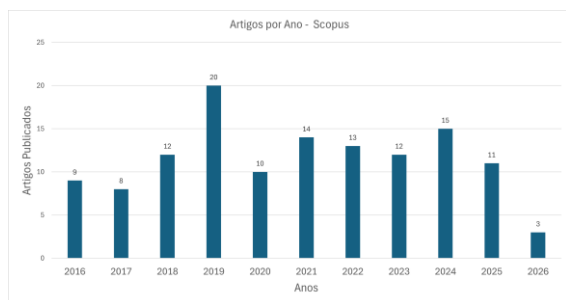


Figura 2. Quantitativo de artigos encontrados no buscador Scopus, por ano de publicação.

A partir dos resultados retornados pelo Science Direct e, nota-se uma tendência de crescimento até o ano de 2021, com 85 artigos publicados, seguido de uma leve tendência de redução. Já no Scopus, nota-se um pico de publicações no ano de 2019, com 20 artigos publicados, seguido de uma queda nos anos subsequentes. Porém, em ambos os casos, não há tendência de redução acentuada nas publicações a respeito da microfiltração, o que indica que essa ainda possui bastante relevância como forma de tratamento, seja ele o método principal, ou um pré-tratamento para outros processos por membrana.

Posteriormente, os artigos selecionados foram submetidos à análise dos resumos (abstracts), aplicando-se critérios de elegibilidade mais rigorosos, incluindo: Aplicação direta ou indireta da microfiltração no tratamento de água produzida; Apresentação de dados experimentais ou análise de desempenho; Discussão de parâmetros operacionais ou fenômenos de fouling. Foram excluídos estudos com foco exclusivo em outras tecnologias, bem como aqueles que não apresentavam contribuição técnica relevante ao tema.

Após essa etapa, foi obtido um conjunto preliminar de aproximadamente 15 artigos. Desses, foi realizada uma seleção final com base na relevância técnica, qualidade dos dados apresentados e aderência ao objetivo do estudo, resultando em um total de 6 artigos considerados mais representativos para análise detalhada.

Por fim, os estudos selecionados foram analisados de forma qualitativa, com extração de informações relacionadas ao tipo de membrana, condições operacionais, eficiência de remoção e ocorrência de fouling, permitindo a realização de uma análise crítica comparativa dos resultados reportados na literatura.

Após a realização dos processos de inclusão e exclusão para a seleção dos artigos, foi realizada uma análise qualitativa, visando extrair informações relevantes a respeito do processo de filtração de água produzida, conforme detalhado a seguir:

Reyhani e Mashhadi, (2016) utilizaram o método Taguchi para fazer a análise dos processos de micro e ultrafiltração e encontrou condições ótimas de operação, em relação à temperatura, a velocidade de fluxo cruzado, pressão transmembrana e “back pulse time”. Eles também notaram que, a baixas velocidades, o escoamento laminar promove a formação de torta na membrana, indicando que operações a regime turbulento podem reduzir esse efeito.

Olajire, (2020) analisou os processos de tratamento de água produzida disponíveis atualmente, explicando cada uma delas, inclusive as tecnologias por membrana (micro/ultra/nano). Ele também comenta que a microfiltração pode ser usada como pré-tratamento para a ultra/nanofiltração, para mitigar os efeitos de fouling nas membranas onde o tratamento principal ocorreria.

Yu, Li e Wang, (2022) utilizaram o modelo clássico de filtração proposto por Yao-Tien para analisar o efeito de diversos parâmetros no processo de filtração de água produzida. Os autores analisaram como a estrutura do leito filtrante pode alterar a eficiência do processo de filtração e também a taxa de filtração e como isso afeta os diferentes tipos de transporte do filtrado. Eles também verificaram como as



propriedades da superfície do leito filtrante, como a força eletrostática, a eficiência de adesão e a “molhabilidade” do leito podem interferir. O modelo usado para este estudo foi simplificado, e ele sugere que modelos matemáticos mais estritos sejam utilizados para uma simulação mais fiel à realidade para calcular a eficiência de filtração.

Mansi et al., (2023) avaliaram o processo de microfiltração e seu custo de operação, classificando-a como a menos dispendiosa e que possui uma remoção razoável de óleo do efluente, porém o óleo dissolvido responsável pelas incrustações em membranas de ultra e nanofiltração não é removido, o que torna o processo insuficiente para pré-tratamento isolado. Também apontaram que o processo de incrustação das membranas está relacionado às características da membrana, o que corrobora com tal pessoa que notou que uma maior hidrofiliabilidade reduz o processo de incrustação da membrana. A utilização do processo de microfiltração como um processo de pré-tratamento integrado com outros métodos se apresenta como um meio para lidar com o problema de incrustações nas membranas, este sendo um dos maiores desafios no tratamento de água produzida atualmente.

Regmi C et al., (2024) verificaram que a integração entre os tratamentos de eletrocoagulação, microfiltração, e destilação por membrana oferecem um tratamento sustentável da água produzida. A integração dos processos por membrana alcançou uma remoção de COT de 40% (310 mg/L para 197 mg/L), remoção de SST superior a 95% (539 mg/L para 24 mg/L) e remoção de turbidez de 99% (243 NTU para 0,4 NTU). A microfiltração combinada com eletrocoagulação no pré-tratamento do efluente proporcionaram um aumento de 20% no fluxo de permeado e reduziram significativamente as taxas de incrustação.

Al-Haddabi et al., (2025) identificaram que pressões elevadas, a partir de 5 Bar, aumentam o fluxo do efluente através do permeado, mas que também aumenta consideravelmente a velocidade de incrustação da membrana, reduzindo sua vida útil, e aumentando a frequência de limpeza da membrana. Também foi notado que, a pressões de 7 Bar, havia deformação das gotículas de óleo que causavam incrustação permanente na membrana. A incrustação permanente nas membranas reduz consideravelmente o seu ciclo de vida, já que operações de retrolavagem terão eficácia reduzida.

De forma geral, a microfiltração apresenta elevado potencial no tratamento de água produzida. Entretanto, seu desempenho está relacionado diretamente às condições operacionais, sendo influenciado por parâmetros como pressão transmembrana, temperatura e regime hidrodinâmico.

Esses fatores afetam tanto o fluxo de permeado quanto a propensão à formação de incrustações, evidenciando a necessidade de otimização das condições de operação.

CONCLUSÃO

Os estudos analisados indicam que o desempenho do processo está diretamente relacionado às condições operacionais, especialmente pressão e a velocidade do efluente, que influenciam tanto o fluxo de permeado quanto a propensão ao fouling. Observa-se que, embora o aumento da pressão contribua para o aumento inicial do fluxo, valores elevados intensificam a incrustação, comprometendo a eficiência do sistema ao longo do tempo. Além disso, estratégias como aumento do cisalhamento e integração com outros processos de tratamento mostram-se eficazes na mitigação do fouling.

A revisão permitiu observar que o tratamento da água produzida tem se consolidado como um campo de pesquisa com potencial de expansão, ligado diretamente ao aumento na produção de petróleo e da necessidade de atender às exigências legais cada vez mais rigorosas, principalmente quando associada a outros processos de filtração por membrana.

REFERÊNCIAS

Abass A. Olajire. Recent advances on the treatment technology of oil and gas produced water for sustainable energy industry-mechanistic aspects and process chemistry perspectives. *Chemical Engineering Journal Advances*, Volume 4, 100049, 2020.

Amin Reyhani, Hossein Mashhadi Meighani. Optimal operating conditions of micro- and ultra-filtration systems for produced-water purification: Taguchi method and economic investigation. *Desalination and Water Treatment*. Volume 57, Pages 19642-19654, 2016.

A. E. Mansi, S. M. El-Marsafy, Y. Elhenawy, M. Bassyouni. Assessing the potential and limitations of membrane-based technologies for the treatment of oilfield produced water. *Alexandria Engineering Journal*, Volume 68, Pages 787-815, 2023.

Chhabilal Regmi, Chidambaram Thamaraiselvan, Mahmood Jebur, Xianghong Qian, Ranil Wickramasinghe. Advancing produced water treatment: Scaling up EC-MF-MDC technology from lab to pilot scale. *Chemical Engineering Research and Design*, Volume 201, Pages 157-168, 2024.

Emily Tummons, Qi Han, Henry J. Tanudjaja, Charifa A. Hejase, Jia Wei Chew, Volodymyr V. Tarabara. Membrane fouling by emulsified oil: A review. *Separation and Purification Technology*, Volume 248, 116919, 2020.



Katie Guerra. Oil and Gas Produced Water Management and Beneficial Use in the Western United States. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Denver, 2011.

J. Neff, K. Lee, E.M. DeBlois. Produced water: overview of composition, fates, and effects. Springer Nature. New York. 2011.

Lola Arosowshola. Produced Water Market: Opportunities in the Oil, Shale and Gas Sectors in North America. Media Analytics, Oxford, 2011.

Mansour Al-Haddabi, Hari Vuthaluru, Hussein Znad, Mingjie Chen, Mushtaque Ahmed. Purification of oil produced water using ceramic membrane: an experimental and response surface model analysis. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering, Volume 12, 101288, 2025.

Zhongchen Yu, Ke Li, Song Wang. Filtration model and its application progress in oilfield produced water treatment. Desalination and Water Treatment, Volume 261, Pages 94-106, 2022.