

Ultrafiltração e Nanofiltração no Tratamento de Água para Abastecimento Público: uma Revisão da Literatura

Andressa Camargo Baptista¹; Matheus Pereira de Oliveira¹; Gabriela Carlomagno Vieira¹; Ronei de Almeida¹

✉ ronei.almeida@eng.uerj.br

1. Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ)

Histórico do Artigo: O autor detém os direitos autorais deste artigo.

Recebido em: 28 de julho de 2025

Aceito em: 13 de agosto de 2025

Publicado em: 31 de agosto de 2025

Resumo: Os processos de separação por membranas, como a ultrafiltração (UF) e a nanofiltração (NF), têm se consolidado como alternativas eficazes para a potabilização de águas naturais. Este estudo revisa a literatura recente sobre o uso dessas tecnologias na produção de água para abastecimento público, com foco nas condições operacionais, no desempenho dos sistemas e nas estratégias adotadas para controle do *fouling*. Para a UF, os estudos analisados indicaram fluxos permeados entre 16,5 e 115 LMH e remoção de turbidez superior a 99%, com predominância de módulos de fibra oca submersos com membranas de PVDF ou PVC. No caso da NF, as aplicações se concentram na remoção de matéria orgânica, sólidos em suspensão e contaminantes não eliminados por processos convencionais, inclusive pela UF. A literatura evidencia o uso predominante de módulos espirais na potabilização de águas superficiais. Estudos em escala industrial reportaram valores de recuperação superiores a 70%, com fluxos de permeado entre 22 e 38 LMH e pressões transmembrana variando de 2 a 9 bar, refletindo a diversidade de aplicações. O *fouling* permanece como a principal limitação técnica e econômica, impactando a produtividade e os custos operacionais. Assim, a otimização das condições de operação e a definição de protocolos eficazes de controle e mitigação do *fouling* são fundamentais. Esta revisão contribui para a compreensão e o avanço do uso de membranas na potabilização, tecnologia ainda incipiente no Brasil, mas com elevado potencial para universalizar o acesso à água potável.

Palavras-chave: Água potável, Fouling, Membranas, Potabilização, Universalização do saneamento.

Ultrafiltration and Nanofiltration in the Production of Water for Public Supply: a Literature Review

Abstract: Membrane separation processes like ultrafiltration (UF) and nanofiltration (NF) have emerged as promising techniques for producing drinking water. This study provides a comprehensive review of the recent literature on the application of these technologies in drinking water production, with a focus on operational conditions, membrane performance, and fouling control strategies. For UF, permeate fluxes ranged from 16.5 to 115 LMH, with turbidity removals exceeding 99%. The UF submerged hollow-fiber modules with PVDF or PVC membranes were primarily used. In the case of NF, applications mainly target the removal of natural organic matter, suspended solids, and contaminants that are not effectively removed by conventional treatment methods, including UF. The reviewed studies emphasize the widespread use of NF spiral-wound modules for surface water treatment. Industrial-scale case studies report recovery rates above 70%, with permeate fluxes ranging from 22 to 38 LMH and transmembrane pressures between 2 and 9 bar, depending on the system design and specific application. Fouling remains the primary technical and economic challenge, negatively impacting productivity and increasing operational costs. As a result, optimizing operational conditions and establishing effective protocols for controlling fouling are essential. This review advances understanding and promotes the application of membrane-based technologies for drinking water treatment – a still-developing field in Brazil with significant potential to improve access to potable water.

Keywords: Drinking water, Fouling, Membranes, Potable water, Sanitation.

Ultrafiltração y Nanofiltração en el Tratamiento de Agua para Abastecimiento Público: una Revisión Bibliográfica

Resumen: Los procesos de separación por membranas, como la ultrafiltración (UF) y la nanofiltração (NF), se han consolidado como alternativas tecnológicamente viables y eficaces para la potabilización de aguas naturales. El presente trabajo presenta una revisión de la literatura reciente sobre la aplicación de estas tecnologías en la producción de agua potable destinada al abastecimiento público, con énfasis en las condiciones operativas, el desempeño de los sistemas y las estrategias implementadas para el control del fouling. En relación con la UF, los estudios revisados reportan flujos de permeado entre 16,5 y 115 LMH y porcentajes de remoción de turbidez superiores al 99 %, predominando el uso de módulos de fibra hueca sumergidos con membranas de PVDF o PVC. En el caso de la NF, las aplicaciones se orientan principalmente a la eliminación de materia orgánica, sólidos en suspensión y contaminantes que no son removidos mediante procesos convencionales, incluida la propia UF. La literatura destaca el uso predominante de módulos en espiral para el tratamiento de aguas superficiales. Investigaciones a escala industrial informan tasas de recuperación superiores al 70 %, con flujos de permeado entre 22 y 38 LMH y presiones transmembrana que oscilan entre 2 y 9 bar, lo que evidencia la versatilidad de estas aplicaciones. El fouling continúa siendo la principal limitación técnica y económica, debido a su impacto negativo en la productividad y en los costos operativos. En este contexto, la optimización de las condiciones de operación y el establecimiento de protocolos efectivos de control y mitigación del fouling resultan fundamentales. Esta revisión aporta elementos relevantes para el entendimiento y la evolución del uso de membranas en la potabilización, una tecnología todavía incipiente en Brasil, pero con elevado potencial para ampliar el acceso al agua potable.

Palabras clave: Agua potable, Fouling, Membranas, Potabilización, Saneamiento.

INTRODUÇÃO

No Brasil, segundo o Novo Marco Legal do Saneamento – Lei 14.026/ 2020, os contratos de prestação dos serviços públicos de saneamento básico deverão definir metas de universalização que garantam o atendimento de 99% da população com água potável até 31 de dezembro de 2033, assim como metas quantitativas de não intermitência do abastecimento, de redução de perdas e de melhoria dos processos de tratamento (Art. 11-B) (BRASIL, 2020). Em 2023, o índice médio de atendimento da população total com rede de abastecimento de água foi estimado em 83,13% (SINISA, 2024).

Na produção de água para abastecimento, sistemas de microfiltração (MF) e ultrafiltração (UF) são utilizados para remoção de partículas coloidais, sólidos em suspensão, microrganismos e compostos orgânicos. A inserção da tecnologia de nanofiltração (NF) visa a remoção de matéria orgânica, íons, fármacos, metais tóxicos, compostos odoríferos, agrotóxicos, precursores de subprodutos da desinfecção, desreguladores endócrinos, dentre outros (CRUZ & MIERZWA, 2020; FARTO et al., 2021a; FARTO et al., 2021b). Esse cenário joga luz sobre o uso do tratamento avançado com membranas para produção de água em conformidade com os padrões de potabilidade, bem como para o cumprimento da meta de universalização do acesso à água potável pela população brasileira.

A UF tem se destacado no tratamento de água para abastecimento público por demandar menor consumo energético em comparação aos processos de NF e osmose inversa (OI). As membranas de UF são porosas, com poros variando entre 0,001 e 0,1 μm (BAKER, 2024), e realizam a separação por exclusão de tamanho, ou seja, partículas com diâmetro superior ao dos poros são rejeitadas pela membrana (CHRISTENSEN & ORIOL, 2024). O desempenho dessas membranas também é influenciado pela massa molecular do soluto, avaliada por meio do parâmetro massa molecular de corte (MWC0, do inglês *Molecular Weight Cut-Off*), que expressa a menor massa molecular na qual a membrana rejeita pelo menos 90% das macromoléculas. Para membranas de UF, a MWC0 varia de 1 a 1.000 kDa (MOSLEHYANI *et al.*, 2019).

As membranas de NF representam uma tecnologia de separação intermediária entre a UF e a OI em termos de seletividade. Embora apresentem menor rejeição de sais que a OI, oferecem maior produção de permeado e são adequadas para águas com concentrações salinas de até 1.000 ppm. Tipicamente, as membranas de NF rejeitam sais monovalentes entre 20% e 80% e sais bivalentes entre 95% e 98%. Operam em baixas pressões (2 a 8 bar), com maior eficiência energética e menor necessidade de remineralização – vantagens relevantes em relação à OI (BAKER, 2024).

Contudo, o *fouling* das membranas representa a principal limitação em aplicações para tratamento das águas naturais. O *fouling* é um fenômeno caracterizado pela formação de biofilme, camada gel e adsorção de contaminantes na estrutura da membrana, provocando o bloqueio dos poros de membranas de UF e NF e a redução da passagem de água (CHRISTENSEN & ORIOL, 2024). Esse fenômeno reduz a produtividade e a eficiência dos sistemas de tratamento de água. O *fouling* demanda um aumento das pressões operacionais dos processos, visando a manutenção da produtividade, bem como a limpeza e substituição periódica dos módulos de membranas, o que por sua vez eleva os custos operacionais do sistema de tratamento (CHANG *et al.*, 2022b; CRUZ & MIERZWA, 2020).

Nesse contexto, este trabalho revisa a literatura sobre a aplicação da UF e NF para produção de água de abastecimento, com ênfase no levantamento das condições operacionais dos projetos e identificação das estratégias de minimização do *fouling* nas membranas. O presente estudo fornece uma síntese atualizada sobre a aplicação de UF e NF na potabilização de águas, tema ainda pouco explorado na literatura brasileira. No cenário nacional, o uso de membranas nesse tipo de tratamento permanece incipiente, mas representa um campo promissor de pesquisa. As obras de Schneider & Tsutiya (2001) e Pimenta *et al.* (2023) oferecem introduções relevantes ao tema, com destaque para as aplicações dessas tecnologias na

potabilização de águas naturais. Embora o trabalho mais recente amplie as discussões da publicação anterior, a maior parte dos estudos abordados ainda se concentra em publicações anteriores a 2016. Assim, esta revisão reúne e analisa projetos recentes em escala industrial, fornecendo subsídios atualizados para pesquisas e aplicações tecnológicas das membranas no tratamento de água para abastecimento público.

MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa bibliográfica deste estudo foi realizada em duas etapas, a saber:

Etapa 1

As seguintes palavras-chave e operadores booleanos foram usadas no mecanismo de busca para a identificação da literatura científica relevante na base de dados Scopus (<https://www.scopus.com/>) em título do documento, resumo e palavras-chave: “Full-scale” AND “Ultrafiltration” AND (“Drinking Water” OR “Potable water”). A busca, realizada em 11/01/2025, resultou na identificação de 144 documentos, que foram selecionados mediante o seguinte processo de triagem: i) definição de um recorte temporal para o período de 10 anos, de 2014 a 2024; ii) seleção de documentos exclusivamente do tipo artigo científico; e iii) escolha de documentos escritos na língua portuguesa e inglesa.

Ao final do processo de triagem, foram identificados 109 documentos. Cabe destacar que, entre os documentos encontrados, não foram identificados trabalhos redigidos em português. Todos foram analisados cuidadosamente com base na leitura dos títulos, palavras-chave e resumos, visando à seleção de artigos alinhados ao tema deste trabalho. Os critérios de elegibilidade incluíram estudos sobre sistemas de tratamento de água para abastecimento público, em escala plena (industrial), que utilizassem membranas de UF. Foram excluídos os trabalhos que abordavam membranas de NF e OL.

Etapa 2

A busca na base de dados científica Scopus foi realizada em 20/01/2025, utilizando as seguintes palavras-chave e operadores booleanos: “Full-scale” AND “Nanofiltration” AND (“Drinking water” OR “Potable water”). Foram obtidos 72 documentos, os quais foram submetidos a um procedimento de triagem. O processo foi conduzido considerando as seguintes condições para os documentos selecionados na etapa inicial: publicação no intervalo de tempo

de 2014 a 2024; formato de publicação como artigo científico completo; e idioma inglês ou português. Porém, entre os documentos encontrados, não foram identificados trabalhos redigidos em português.

Ao final do processo de triagem, foram identificados 52 documentos. Diferentemente da tecnologia de UF, os estudos em escala plena foram menos comuns; assim, optou-se por incluir, também, estudos em planta-piloto. Os critérios de inclusão consideraram artigos que abordassem a tecnologia de NF para a produção de água para abastecimento público. Para complementar a análise, foi realizada uma busca focada em estudos em português. O período de publicação dos documentos não foi restringido. Dessa forma, para discutir a produção científica nacional sobre a temática, foram selecionados dois estudos brasileiros em escala de bancada identificados na busca. Todos foram analisados com base na leitura dos títulos, palavras-chave e resumos, visando à identificação de artigos alinhados ao tema deste trabalho.

Considerações

No total, cinco estudos sobre o uso de UF e dez estudos sobre NF aplicadas ao tratamento de águas naturais foram selecionados. Cabe destacar, entretanto, que o processo de seleção foi condicionado por critérios específicos, como as palavras-chave adotadas e o recorte temporal estabelecido na estratégia de busca. Em razão dessas restrições metodológicas, alguns estudos de caso de relevância internacional não foram incluídos na análise, a exemplo da estação de tratamento de água (ETA) de Goreangab, em Windhoek (Namíbia), que integra uma unidade de UF como parte do processo de reúso potável direto a partir de esgoto bruto, e da planta de NF instalada em Méry-sur-Oise (Paris, França) para tratamento de água superficial destinada ao abastecimento público.

Por isso, reconhece-se que o presente estudo não esgota o tema e pode não contemplar integralmente a diversidade de projetos emblemáticos na área. Para uma introdução a algumas dessas referências internacionais, recomenda-se a consulta às obras de Schneider e Tsutiyu (2001) e Pimenta *et al.* (2023).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Produção de água de abastecimento com ultrafiltração (UF)

No total, cinco estudos de casos com foco na utilização de membranas de UF em escala plena foram selecionados (CHANG *et al.*, 2022b, 2022a; PARK *et al.*, 2020; WU *et al.*, 2022; YU *et*

al., 2020). A Tabela 1 apresenta os principais resultados dos cinco estudos avaliados em relação ao material de membrana, módulo, configuração e capacidade instalada da ETA.

Tabela 1. Estudos de caso sobre uso de membranas de UF para potabilização de água de abastecimento.

Localização	Capacidade instalada (m ³ /d)	Material da membrana	Tipo de Módulo	Configuração	Referência
Shandong, China	100.000	PVC	Fibra oca	Submersa	YU <i>et al.</i> (2020)
Seul, Korea	25.000	PVDF	Fibra oca	Pressurizada	PARK <i>et al.</i> (2020)
Jiangsu, China	120	PVDF	Fibra oca	Submerso	WU <i>et al.</i> (2022)
China	10M m ³ /d*	PVDF (73,7%) PVC (18,2%) PES (4,3%) PS (2,1%) Outros (1,7%)	n.d.	Módulos submersos (60%) Módulos pressurizados (40%)	CHANG <i>et al.</i> (2022b)
Dongying, China	100.000	PVDF	Fibra oca	Submerso	CHANG <i>et al.</i> (2022a)

PES = poliéster. PS = poliestireno. PVC = policloreto de vinila. PVDF = fluoreto de polivinilideno. n.d. = não disponível. *Capacidade total das ETA com UF na China em 2020.

Fonte: Chang *et al.*, 2022b, 2022a; Park *et al.*, 2020; Wu *et al.*, 2022; Yu *et al.*, 2020.

Observou-se que as membranas de UF poliméricas dominam o mercado de produção de água para abastecimento público. Os polímeros mais utilizados para fabricação de membranas de UF são fluoreto de polivinilideno (PVDF), cloreto de polivinila (PVC), polietersulfona (PES) e polissulfona (PS). Chang *et al.* (2022b) analisaram os dados de 106 ETAs em escala plena com UF na China. Os resultados revelaram que, até o ano de 2020, o PVDF e o PVC foram os materiais predominantes, representando um percentual de 73,7% e 18,2%, respectivamente.

A capacidade das ETAs que utilizam membranas de UF varia entre 120 m³/d (WU *et al.*, 2022) a 100.000 m³/d (CHANG *et al.*, 2020a; YU *et al.*, 2020). Segundo Chang *et al.* (2020b), a capacidade total instalada de ETAs com membranas de UF na China atingiu aproximadamente 10 milhões de m³/d em 2020, o que corresponde a cerca de 5,8% da produção total de água para abastecimento no país. A redução de custos de membranas de UF ao longo do tempo foi a força motriz para o crescimento da capacidade das ETA com membranas na China (Jia *et al.*, 2023). Além disso, observou-se a predominância de sistemas com membranas submersas, devido à sua menor demanda energética e ao menor espaço físico ocupado por essa configuração (JIA *et al.*, 2023).

Em relação ao desempenho da UF, os estudos analisados reportaram valores de fluxo permeado na faixa de 16,5 a 115 LMH, com eficiência de remoção de turbidez superior a 99%

(CHANG *et al.*, 2022b, 2022a; PARK *et al.*, 2020; WU *et al.*, 2022; YU *et al.*, 2020). Chang *et al.* (2022b) destaca que o desempenho das membranas de UF varia entre as plantas em função da configuração da UF, qualidade da água bruta e frequência de limpeza das membranas. Por exemplo, em comparação ao modo submerso, o modo pressurizado apresentou fluxo médio 2,33 vezes maior (70 vs. 30 LMH) e tempo médio de filtração 60% menor (30 vs. 75 min) (Chang *et al.*, 2022b).

Nos trabalhos avaliados, não foram reportados dados de recuperação das plantas de UF. Na potabilização de águas superficiais, os sistemas de membranas de UF são geralmente operados com recuperação entre 90 e 95%, havendo perdas de produção devido aos rejeitos líquidos gerados, como a água de retrolavagem e do processo de limpeza química (CIP, do inglês *clean-in-place*). Em regiões com escassez hídrica, estratégias de projeto, como a adição de uma segunda etapa de UF para tratamento dos rejeitos ou a recirculação da água de retrolavagem para a alimentação da unidade, podem contribuir para o aumento da recuperação do sistema (GORA & WALSH, 2011).

Yu *et al.* (2020) avaliaram o desempenho de um sistema de UF instalado em uma ETA com capacidade de projeto de 100.000 m³/d. O sistema utilizou módulos submersos de membranas de fibra oca em PVC, com MWCO de 50 kDa, organizados em 12 trens e área total de filtração de 150.000 m². Após sete anos de operação, o sistema demonstrou elevada eficiência na remoção de turbidez (redução de 12 NTU para 0,10 NTU) (>99%), mantendo-se abaixo do limite de 0,5 NTU estabelecido para água potável na China, além de promover melhora na remoção de matéria orgânica, com redução de 9,0% a 14,7% nos valores de demanda química de oxigênio (DQO) e carbono orgânico dissolvido (COD). Ao longo de sete anos de operação, o sistema de UF apresentou fluxo permeado entre 16,5 e 28 LMH, com pressão transmembrana variando aproximadamente de 20 a 80 kPa (0,20 a 0,80 bar) (YU *et al.*, 2020).

Em outro estudo, Wu *et al.* (2022) monitoraram uma unidade de UF com capacidade de 120 m³/d, composta por seis módulos de membranas capilares de PVDF (0,030 µm) submersas, instalada para potabilização de água em área rural. O sistema apresentou alta eficiência na remoção de turbidez (>99%), mantendo o permeado com 0,3 ± 0,1 NTU, mesmo diante de variações sazonais na qualidade da água bruta.

Produção de água de abastecimento com nanofiltração (NF)

Neste trabalho, foram sistematicamente analisados dez estudos com foco no uso da NF para potabilização de águas naturais (OPHORST *et al.*, 2024; FAN *et al.*, 2024; YUKSEKDAG *et al.*, 2023; XU *et al.*, 2023; JAFARI *et al.*, 2020; GIAGNORIO *et al.*, 2018; KÖHLER *et al.*, 2016; BUENO *et al.*, 2016; BEYER *et al.*, 2014; ZAT & BENETTI, 2011).

Verificou-se que a integração da NF a processos já existentes nas ETA é uma estratégia recorrente para aprimorar a qualidade da água tratada, promovendo a remoção complementar de compostos orgânicos e inorgânicos que não são eficientemente eliminados pelos processos convencionais ou por sistemas avançados, como a UF (KÖHLER *et al.*, 2016; GIAGNORIO *et al.*, 2018; OPHORST *et al.*, 2024; BUENO *et al.*, 2016).

Dentre os contaminantes investigados na aplicação da NF para a potabilização de águas naturais, destacam-se matéria orgânica, fármacos, metais tóxicos, turbidez, condutividade, sólidos dissolvidos, compostos odoríferos (como geosmina – $C_{12}H_{22}O$ e 2-metilisoborneol (MIB) – $C_{11}H_{20}O$), substâncias per e polifluoroalquiladas – PFAS (PFOA, PFOS, PFNA, PFHxS, entre outros), carbofurano ($C_{12}H_{15}NO_3$) e cromo hexavalente (Cr^{+6}) (BUENO *et al.*, 2016; GIAGNORIO *et al.*, 2018; OPHORST *et al.*, 2024; ZAT & BENETTI, 2011; YUKSEKDAG *et al.*, 2023) (Tabela 2).

Tabela 2. Contaminantes alvo e percentual de remoção em estudos com aplicação de NF para tratamento de água de abastecimento.

Contaminante alvo	Remoção (%)	Referência
Geosmina ($C_{12}H_{22}O$)	96	ZAT & BENETTI (2011)
2-metilisoborneol – MIB ($C_{11}H_{20}O$)	97	ZAT & BENETTI (2011)
Carbofurano ($C_{12}H_{15}NO_3$)	97,17	BUENO <i>et al.</i> (2016)
Carbono orgânico dissolvido (COD)	>90	KÖHLER <i>et al.</i> (2016)
Cromo hexavalente (Cr^{+6})	>98	GIAGNORIO <i>et al.</i> (2018)
Carbono orgânico total (COT)	96 – 96,3	YUKSEKDAG <i>et al.</i> (2023)
Alumínio (Al), Ferro (Fe), Chumbo (Pb)	Al (85), Fe (70), Pb (50)	YUKSEKDAG <i>et al.</i> (2023)
Turbidez, condutividade, sólidos dissolvidos totais (SDT)	88,8 – 99,8	XU <i>et al.</i> (2023)
COT	>87	OPHORST <i>et al.</i> (2024)
PFAS (PFOA, PFOS, PFNA, PFHxS, entre outros)	>80	OPHORST <i>et al.</i> (2024)
Fármacos (Diclofenaco, Sulfametoxazol, Carbamazepina, entre outros)	≈30	OPHORST <i>et al.</i> (2024)

Fonte: Ophorst *et al.*, 2024; Yuksekdağ *et al.*, 2023; Xu *et al.*, 2023; Giagnorio *et al.*, 2018; Köhler *et al.*, 2016; Bueno *et al.*, 2016; Zat & Benetti, 2011.

Em relação ao desempenho da NF, Köhler *et al.* (2016) avaliaram um sistema de NF de fibra oca em escala piloto utilizando água proveniente de uma ETA em escala plena. A ETA operava com processos de coagulação com sulfato de alumínio e filtração por areia. A NF reduziu a concentração de carbono orgânico dissolvido (COD) da água de alimentação e produziu água tratada com concentração de COD igual a 0,5 mg/L. Em outro estudo, Xu *et al.* (2023) integraram o processo de NF (módulo espiral) em escala piloto a uma ETA em escala industrial com sistema convencional de tratamento (coagulação + sedimentação + filtração por areia) e tratamento avançado (O₃ + CA). Os autores observaram resultados de remoção de parâmetros como turbidez, condutividade e sólidos dissolvidos totais na faixa de 88,8% a 99,8%. Os resultados de Köhler *et al.* (2016) e Xu *et al.* (2023) reforçam o potencial da NF como etapa complementar aos processos de tratamento existentes, demonstrando sua capacidade de melhorar a qualidade final da água.

Outros trabalhos destacaram o potencial da NF para remoção de metais tóxicos, como Cr⁺⁶ (>98%) e Pb (50%), PFAS (>80%), substâncias odoríferas (*e.g.*, geosmina (96%) e MIB (97%)) e o agrotóxico carbofurano (97,17%) (BUENO *et al.*, 2016; GIAGNORIO *et al.*, 2018; OPHORST *et al.*, 2024; ZAT & BENETTI, 2011; YUKSEKDAG *et al.*, 2023). Diante da crescente complexidade dos poluentes em mananciais e do avanço das exigências regulatórias em diversos países, tecnologias de tratamento avançado tornam-se cada vez mais necessárias. Embora legislações internacionais já incluam poluentes de preocupação emergente, como hormônios e ftalatos (LIU *et al.*, 2021), a norma brasileira vigente (Portaria GM/MS nº 888/2021) ainda não os contempla, indicando uma possível necessidade de revisão futura (BRASIL, 2021).

A Tabela 3 apresenta as rotas de tratamento adotadas, a escala e localização das unidades de NF, o tipo de água de alimentação e os módulos de membrana utilizados nos estudos considerados.

Tabela 3. Aplicação do processo de NF para potabilização de águas naturais considerados neste trabalho.

Localização	Escala	Rota de tratamento	Água de alimentação	Módulo de membrana	Referência
Holanda	Piloto	Água pré-tratada (Rota 1): (telas de tambor + coagulação + sedimentação + filtração por areia + CAG) + filtros de cartucho de 150 µm + NF Água bruta (Rota 2): filtros de cartucho de 150 µm + NF	Água superficial bruta e pré- tratada	Fibra oca	OPHORST <i>et al.</i> (2024)
China	Industrial	Convencional + O3-CAB + MF + NF (em 3 estágios, arranjo 4:2:1)	Água superficial submetida a MF em ETA	Espiral	FAN <i>et al.</i> , (2024)
Turquia	Piloto	Convencional + filtros de cartucho de 5 µm + anti- incrustante + NF	Água superficial tratada em ETA convencional	Espiral	YUKSEKDAG <i>et al.</i> (2023)
China	Piloto	Água superficial de ETA convencional com tratamento avançado (O3 + CAB)	Água superficial de ETA com tratamento avançado (O3 + CAB)	Espiral	XU <i>et al.</i> (2023)
Holanda	Industrial	Filtro de cartucho 10 µm + anti-incrustante + NF .	Água subterrânea anóxica	Espiral	JAFARI <i>et al.</i> (2020)
Itália	Bancada e piloto	NF (duplo-passo)	Água subterrânea contaminada com cromo	Espiral	GIAGNORIO <i>et al.</i> (2018)
Suécia	Piloto	Coagulação + filtração por areia + NF	Água superficial submetida a coagulação e filtração por areia em ETA	Fibra oca	KÖHLER <i>et al.</i> (2016)
Brasil	Bancada	Água ultrapura (Rota 1): sistema de água ultrapura + NF Água de manancial pré- tratada (Rota 2): MF + NF	Água ultrapura, água de manancial superficial e água pré- tratada por MF	Espiral	BUENO <i>et al.</i> (2016)
Holanda	Industrial	Filtro de cartucho de 10 µm + anti-incrustante + NF	Água subterrânea anóxica	Espiral	BEYER <i>et al.</i> (2014)
Brasil	Bancada	NF	Água bruta de represa	Espiral	ZAT & BENETTI (2011)

CAB = Carvão Ativado Biológico. CAG = Carvão Ativado Granular. ETA = Estação de Tratamento de Água. MF = Microfiltração. NF = Nanofiltração. O3 = Ozonização

Fonte: Ophorst *et al.*, 2024; Fan *et al.*, 2024; Yuksekdag *et al.*, 2023; Xu *et al.*, 2023; Jafari *et al.*, 2020; Giagnorio *et al.*, 2018; Köhler *et al.*, 2016; Bueno *et al.*, 2016; Beyer *et al.*, 2014; Zat & Benetti, 2011.

A análise dos estudos revisados revelou que a maioria emprega membranas de NF em módulos espirais (80%) para o tratamento de águas superficiais (70%). De acordo com Junker *et*

al. (2021), os módulos espirais apresentam vantagens frente a outros tipos, como os módulos tubulares e de placa e quadro, principalmente devido à maior densidade de empacotamento ($500 - 1000 \text{ m}^2/\text{m}^3$ vs. $70 - 400$ e $200 - 500 \text{ m}^2/\text{m}^3$, respectivamente) (SINGH & HANKINS, 2016) e ao menor custo unitário.

Em contrapartida, os módulos espirais são mais suscetíveis ao *fouling*, uma vez que não permitem retrolavagem, o que torna necessário um pré-tratamento mais rigoroso da água de alimentação (JUNKER *et al.*, 2021). Além disso, destaca-se que os módulos de fibra oca apresentam maior densidade de empacotamento ($500 - 5000 \text{ m}^2/\text{m}^3$) (SINGH & HANKINS, 2016) e menor propensão ao *fouling*, devido à possibilidade de limpeza hidráulica (JUNKER *et al.*, 2021). Entretanto, apesar das membranas de NF na configuração fibra oca tenha despertado interesse comercial nos últimos anos, sua aplicação em escala industrial ainda é limitada por desafios associados aos métodos de síntese, estabilidade físico-química e custos de produção (SEWERIN *et al.*, 2021).

Com o objetivo de analisar as condições operacionais e métodos de limpeza química de unidades de NF em escala plena, a Tabela 4 apresenta os três estudos em escala industrial identificados nesta revisão.

Tabela 4. Estudos em escala industrial com uso de membranas de NF para potabilização de águas naturais

Localização	Rota de tratamento	Condições operacionais	Limpeza química	Referências
China	Convencional + O3-CAB + MF + NF (em 3 estágios, arranjo 4:2:1)	Estágio 1: r = 90%; PTM = 4,5–9 bar; J = 38 LMH. Estágio 2: r = 90%; PTM = 3 – 8 bar; J = 23 LMH. Estágio 3: r = 90%; PTM = 2 – 8,5 bar; J = 23 LMH	n.d	FAN <i>et al.</i> , (2024)
Holanda	Filtro de cartucho 10 μm + anti-incrustante + NF	r = 78–80% PTM = 6,3 bar J = 22 LMH	$\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ (2% m/m), 3h, 35°C + NaOH (pH = 11–12, 0,01 mol/L), 3h, 35°C – Executado quando a pressão de alimentação se eleva de 25% a 40% em relação ao valor inicial	JAFARI <i>et al.</i> (2020)
Holanda	Filtro de cartucho de 10 μm + anti-incrustante + NF	r = 78 – 80% PTM = 6,4 – 8,3 bar; pré-tratamento com filtro do tipo cartucho de 10 μm e adição de anti-incrustante	$\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$ (2% m/m), 3h, 35°C + NaOH (pH = 11–12), 3h, 35°C – Executado quando a pressão de alimentação se eleva de 25% a 40% em relação ao valor inicial	BEYER <i>et al.</i> (2014)

NF = nanofiltração. r = recuperação. PTM = pressão Transmembrana. J = fluxo de permeado. MF = microfiltração. CAB = carvão ativado biológico. O3 = ozonização; LMH = $\text{L}/\text{m}^2 \text{ h}$
Fonte: Fan *et al.*, 2024; Jafari *et al.*, 2020; Beyer *et al.*, 2014.

A análise das condições operacionais dos três estudos em escala industrial indica recuperação superior a 70% nos sistemas de membranas. Os fluxos de permeado variaram de 22 a 38 LMH, enquanto a pressão transmembrana situou-se na faixa de 2 a 9 bar, refletindo as particularidades dos sistemas e os objetivos específicos de cada aplicação.

A NF apresenta vantagem tecnoeconômica em relação à OI, operando sob pressões mais baixas e com maior fluxo de permeado. Em estudo de tratabilidade em bancada, Bueno *et al.* (2016) relataram maior eficiência na remoção do agrotóxico carbofurano com NF (membrana NF90, 8 bar, 60 LMH; 97,17%) em comparação com a OI (15 bar, 27 LMH; 96,02%). Operacionalmente, a NF pode ser integrada às ETAs como etapa de polimento do permeado da UF, visando à remoção de sais, compostos orgânicos ou íons específicos, como o NO_3^- . O permeado da NF é então misturado à água bruta ou ao permeado da UF para controle do teor de sais e da alcalinidade, conforme práticas adotadas em ETAs na China (Chang *et al.*, 2022b).

***Fouling* das membranas de UF e NF**

A principal limitação do tratamento avançado com UF e NF está associada ao *fouling*. A natureza do *fouling* depende diretamente da qualidade da água bruta que alimenta o processo. A partir da literatura revisada, foi possível constatar que os principais tipos de *fouling* de sistemas de UF no tratamento de água são o *fouling* orgânico, associado à presença de matéria orgânica de baixa massa molecular, biopolímeros e substâncias húmicas, e o bio*fouling*, frequentemente associado a bactérias dos filos *Proteobacteria* e *Firmicutes* (YU *et al.*, 2020; WU *et al.*, 2022).

O pré-tratamento das águas e a limpeza química das membranas são as estratégias mais utilizadas para minimização do *fouling* (GAO *et al.*, 2011; PORCELLI & JUDD, 2010). A análise dos métodos de controle do *fouling* apresentados nos artigos permite concluir que tanto os métodos diretos quanto os métodos indiretos desempenham papéis complementares na manutenção da produtividade dos sistemas de membranas. Entre as informações revisadas, a retrolavagem hidráulica e a limpeza química foram as medidas diretas mais adotadas, sendo aplicadas regularmente para remover *fouling* das membranas, com destaque para o uso de soluções alcalinas (NaOH) e ácidas (HCl ou ácido cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$)) em processos de UF. Na Tabela 5 são listados os métodos diretos e indiretos para controle do *fouling* nos estudos com UF desta revisão.

Tabela 5. Métodos direto e indireto para controle do *fouling* em unidades de UF para potabilização de águas naturais.

Método direto	Método indireto	Referência
Retrolavagem hidráulica (60 LMH por 90s); limpeza de manutenção utilizando NaClO (500 ppm, 140 min) seguida de aeração (10-30 min) (24 h) e limpeza química com lavagem alcalina (1000 ppm NaClO + NaOH 0,5% m/m) (pH > 12) seguida de lavagem ácida (HCl 0,5% m/m, ácido cítrico 0,5% m/m) (pH < 2)	Coagulação com PAC e ajustes operacionais da duração da filtração (360/300/240 min)	YU <i>et al.</i> (2020)
n.d.	Coagulação com PAC e sedimentação	PARK <i>et al.</i> (2020)
Retrolavagem com ar (45s) e água (45s) a cada 40 min	n.d.	WU <i>et al.</i> (2022)
Limpeza hidráulica, mecânica e ultrassônica; Limpeza química ácida e/ou alcalina*	Coagulação, sedimentação, filtração com areia e carvão ativado; UF como pré-tratamento para membranas de NF/OI	CHANG <i>et al.</i> (2022b)
Limpeza de manutenção e limpeza química	Pré-tratamento com filtro de carvão ativado	CHANG <i>et al.</i> (2022a)

NF = nanofiltração. OI = osmose inversa. PAC = policloreto de alumínio. UF = ultrafiltração. n.d. = não disponível. *São apresentados diferentes protocolos de limpeza química adotados por diversas plantas de UF na China. Os reagentes mais comumente utilizados incluem hipoclorito de sódio (NaClO), hidróxido de sódio (NaOH), ácido clorídrico (HCl) e ácido cítrico (C₆H₈O₇).

Fonte: Chang *et al.*, 2022b, 2022a; Park *et al.*, 2020; Wu *et al.*, 2022; Yu *et al.*, 2020.

Os métodos de controle do *fouling* em membranas de UF foram variados, como retrolavagem hidráulica com ar e limpeza química com hipoclorito de sódio (500 ppm NaClO), alcalis (0,5% NaOH) e ácidos (0,5% HCl e 0,5% ácido cítrico) (CHANG *et al.*, 2022a; YU *et al.*, 2020). Entre os métodos indiretos, o pré-tratamento por coagulação e o uso de carvão ativado foram os mais frequentes, visando à redução de matéria orgânica natural e partículas coloidais da água bruta (YU *et al.*, 2020; PARK *et al.*, 2020; CHANG *et al.*, 2022a; 2022b).

Chang *et al.* (2022b) identificaram as cinco principais configurações de tratamento avançado com UF adotadas em 106 ETAs avaliadas na China. As rotas envolvem o uso de membranas de UF associadas a etapas de pré-tratamento como coagulação, sedimentação e filtração em areia e/ou carvão ativado, além da aplicação da UF como pré-tratamento para NF ou OI (Figura 1). Os autores destacam que os processos 2, 3 e 4 correspondem a 83,13% das configurações analisadas, evidenciando o amplo uso da coagulação e da filtração granular como estratégias indiretas de controle do fouling na UF.

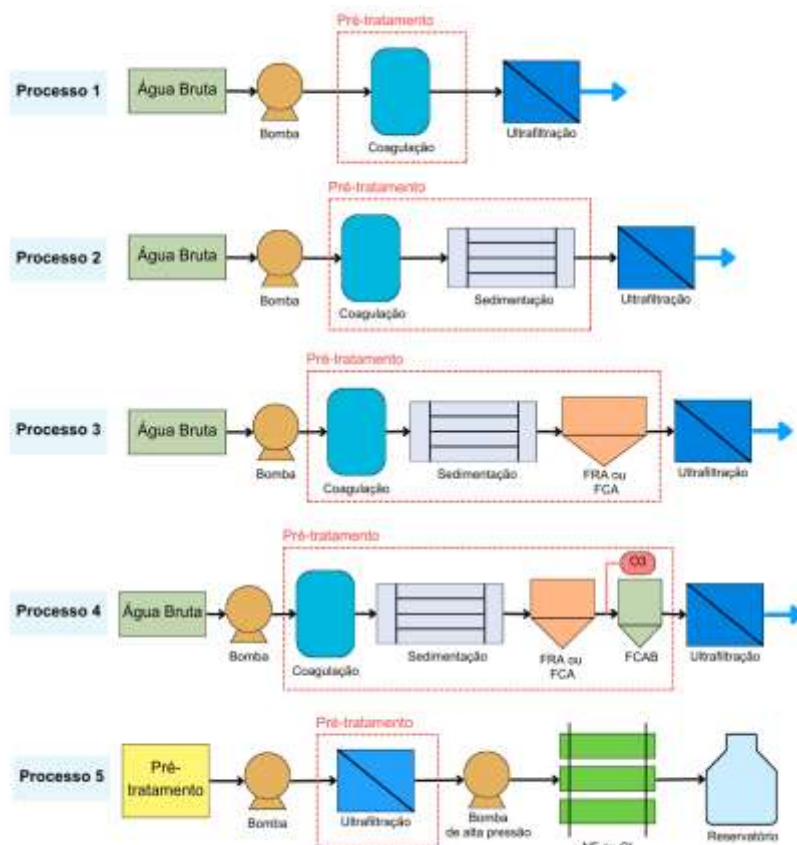


Figura 1. Diferentes configurações de tratamento com membranas de UF. FCA = filtro com carvão ativado. FCAB = filtro com carvão ativado biológico. FRA = filtração rápida com areia. NF = nanofiltração. OI = osmose inversa. O₃ = ozonização.

Fonte: Chang *et al.* (2022b) (Adaptado).

Na aplicação da NF para potabilização de águas naturais, o controle do *fouling* também é um aspecto fundamental para garantir a viabilidade operacional e econômica do sistema. Jafari *et al.* (2020) analisaram o impacto econômico do *fouling* em sistemas de NF e reportaram que a substituição das membranas representa entre 40% e 65% do custo operacional, seguido do custo de energia, que responde por cerca de 30%, necessário para compensar o aumento da perda de carga nos canais de alimentação devido ao *fouling*. Os procedimentos de limpeza química corresponderam a cerca de 4% dos custos operacionais. De forma semelhante, Ophorst *et al.* (2024) detalharam as despesas operacionais de sistemas de NF, apontando que a substituição das membranas representou 68% dos custos e o consumo de energia 31%. Esses resultados corroboram as observações de Schneider & Tsutiya (2001), que já indicavam, no início dos anos 2000, que a reposição de membranas e o consumo de energia elétrica são os principais fatores de custo na operação da NF para potabilização de águas naturais.

Os pré-tratamentos de sistemas de NF são diversos, incluindo filtro cartucho de 10 µm com aplicação de anti-incrustante, aeração em cascata, coagulação/floculação, sedimentação, filtração em areia, ozonização, carvão ativado e UF (FAN *et al.*, 2024; XU *et al.*, 2023; YUKSEKDAG *et al.*, 2023; JAFARI *et al.*, 2020).

A complexidade do pré-tratamento depende da qualidade da água de alimentação. Segundo Jafari *et al.* (2020), no tratamento de águas subterrâneas anóxicas, o pré-tratamento pode ser simplificado devido à baixa concentração de sólidos suspensos e matéria orgânica, consistindo em filtração por cartucho de 10 µm e aplicação de anti-incrustante à base de fosfonato. Em contraste, Yuksekdog *et al.* (2023) demonstraram que, para águas superficiais, é necessário um pré-tratamento mais robusto, em razão da possível maior concentração de sólidos e compostos orgânicos na água, que favorecem o *fouling*. Nesse contexto, indicadores de propensão ao *fouling* (*e.g.*, *silt density index* – SDI, *modified fouling index* – MFI) são ferramentas essenciais para diagnosticar a necessidade e o grau de complexidade do pré-tratamento requerido (BAKER, 2024).

Por outro lado, apesar da eficácia do pré-tratamento, estudos relataram impactos negativos na qualidade da água e no desempenho das membranas após a implementação dessa estratégia, além de onerar a cadeia de tratamento da água (GAO *et al.*, 2011). Além disso, os efeitos das técnicas de limpeza no desempenho dos processos de permeação não são totalmente elucidados e estudos ainda são necessários visando a identificação de agentes químicos saneantes e elaboração de protocolos de limpeza específicos (PORCELLI & JUDD, 2010).

A Figura 2 ilustra um esquema simplificado com as rotas típicas de tratamento de águas naturais (superficiais e subterrâneas) por meio de membranas de UF e NF, juntamente com as principais condições operacionais identificadas nesta revisão.

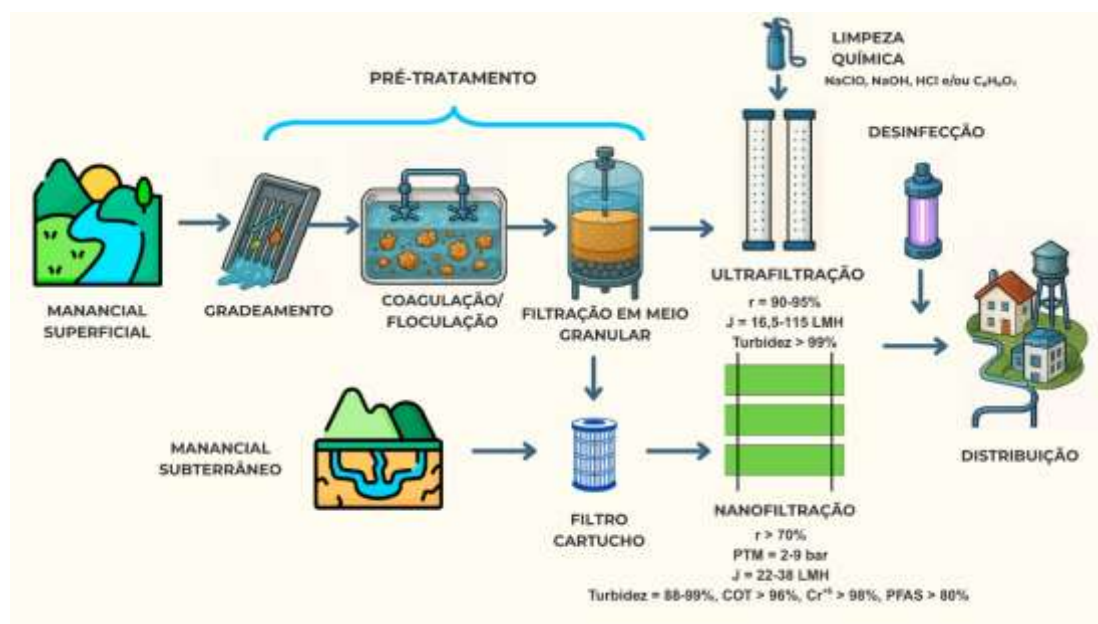


Figura 2. Rotas de tratamento avançado de águas naturais com membranas de UF e NF e respectivas condições operacionais.

Fonte: Autores, 2025.

O gerenciamento do concentrado de membrana e rejeitos de limpeza química não foram aprofundados nos estudos com foco em águas naturais desta revisão, apesar de ser um aspecto crítico durante a operação de processos com membranas para tratamento de efluentes industriais e sanitários (AROLA *et al.*, 2019; PATEL & RAVAL, 2024). Entretanto, vale destacar o estudo recente de Wang *et al.* (2025), no qual foi investigada a geração, a composição e o gerenciamento do concentrado de nanofiltração (CNF). Os autores ressaltam que a salinidade e a concentração de contaminantes do CNF são proporcionais à qualidade da água bruta captada pela ETA e ao tipo de membrana empregado no tratamento, sendo comuns elevados níveis de salinidade ou de contaminantes orgânicos em cerca de 70 ETAs que operam com NF na China. No país, a ausência de diretrizes específicas leva a maioria dessas estações a enviar o CNF para cotratamento em estações de esgoto; em algumas regiões do leste, porém, o descarte é feito diretamente em corpos hídricos (WANG *et al.*, 2025). Os principais impactos ambientais associados a esse tipo de destinação estão relacionados à alta salinidade e à toxicidade resultante do desequilíbrio iônico causado pelo lançamento do CNF, que compromete a flora e a fauna aquáticas, além de concentrações elevadas de contaminantes orgânicos de origem antropogênica (KHAN *et al.*, 2009).

Segundo Schneider & Tsutiya (2001) os principais resíduos de plantas de UF incluem a água de retrolavagem e os rejeitos de limpeza química. Os rejeitos de limpeza química ocorrem em menor volume e são lançados na rede coletora de esgoto ou reciclados para a fonte de água potável. Os efluentes de retrolavagem são gerenciados da mesma forma que os resíduos de retrolavagem de filtros de plantas convencionais.

No Brasil, estações de tratamento de água de grande porte com aplicação de UF ainda são incipientes. Destacam-se como exemplos a ETA Alto da Boa Vista (São Paulo), a ETA Lago Norte (Brasília) e, futuramente, a ETA Xerém, no Rio de Janeiro, projetada para abastecer mais de 450 mil habitantes de Duque de Caxias (RJ) e regiões adjacentes (PIMENTA *et al.*, 2023; CEDAE, 2023).

A ETA Lago Norte, operada pela Companhia Ambiental de Saneamento do Distrito Federal (Caesb) desde 2017, foi projetada para reforçar a segurança hídrica da região metropolitana de Brasília (DF). A unidade possui vazão de projeto de 700 L/s ($\approx 60.500 \text{ m}^3/\text{d}$) e conta com sistema de UF precedido por pré-filtração com filtros de disco. O sistema de UF é composto por sete trens, cada um com cinco *skids* contendo 18 módulos, totalizando 630 módulos de membranas de fibra oca, com área total de aproximadamente 48.510 m^2 . As membranas, fabricadas com PVDF apresentam diâmetro médio de poro de $0,030 \mu\text{m}$. A unidade de UF está instalada em uma área de cerca de 820 m^2 , operando com fluxo médio de permeado de 63 LMH e recuperação de 95%. A água tratada apresenta turbidez média de 0,08 NTU. A desinfecção é realizada com hipoclorito de sódio (NaClO), aplicado em dois reatores de contato. Os rejeitos gerados no processo de UF são encaminhados para tratamento na Estação de Tratamento de Esgoto Norte (ETE Norte), localizada em Brasília (DF) (Informação obtida junto à Caesb por comunicação pessoal, em 29 de maio de 2025.). A Figura 3 apresenta imagens da infraestrutura da ETA Lago Norte.

Por fim, embora o sucesso da ETA Lago Norte possa incentivar projetos futuros com membranas no Brasil, a adoção de UF/NF no abastecimento de água ainda enfrenta barreiras regulatórias e econômicas. Regulamentações como a Portaria GM/MS 888/2021 ou suas futuras atualizações podem exigir monitoramentos adicionais e procedimentos operacionais mais robustos. A exemplo do parâmetro turbidez, o qual é exigido na portaria de potabilidade atual com valor menor ou igual a $0,1 \text{ uT}$ em pelo menos 99% das medições realizadas no mês, em sistemas de tratamento de água com membranas (BRASIL, 2021). Além disso, a ausência de diretrizes específicas para a destinação do concentrado de membrana impõe soluções caso a caso. Dependendo da estratégia de manejo do rejeito, o licenciamento ambiental pode ser mais complexo e rigoroso.

Do ponto de vista econômico, a incerteza quanto a regras futuras, como estrutura tarifária, metas e fiscalização, assim como à evolução da demanda e do consumo, pode elevar o custo de capital, tornando os projetos de UF/NF mais custosos e com *payback* mais longo. Esse cenário exige otimização operacional das ETAs e planejamento financeiro dos projetos, como, por exemplo, a estruturação do projeto com metas de qualidade e continuidade, contratos de desempenho e cronograma de *ramp-up* que reduza a incerteza de caixa. É importante que ganhos sistêmicos sejam apresentados (*e.g.*, redução de coagulantes químicos, melhoria de turbidez e SDI, estabilidade operacional) para justificar o custo de operação da ETA, além de combiná-los com programas de redução de perdas de água para liberar margem tarifária.



Figura 3. Estação de tratamento de água Lago Norte – ETA Lago Norte, Brasília (DF), Brasil (29/05/2025). a) unidade de pré-filtração (filtro de disco) b) vista dos trens de UF c) tanque de limpeza química das membranas de UF (CIP, do inglês *clean-in-place*) d) tanques de armazenamento de hipoclorito de sódio (NaClO) para desinfecção da água ultrafiltrada e) tanque com concentrado de membrana f) tanque com rejeitos da limpeza química.

Fonte: Autores, 2025.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo revisou a literatura recente sobre o uso de membranas de UF e NF na potabilização de águas naturais. A UF tem sido integrada às cadeias de tratamento devido à crescente diversidade de contaminantes na água bruta e à sua eficácia no atendimento aos padrões de potabilidade. A NF, além de remover sólidos em suspensão e matéria orgânica, apresenta elevada rejeição de contaminantes emergentes, aspecto que requer investigação adicional. Em escala industrial, o *fouling* representa a principal limitação operacional de ambas as tecnologias. Seu controle envolve estratégias diretas, como retrolavagem hidráulica e limpeza química com NaOCl , NaOH , HCl e ácido cítrico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$), e indiretas, como pré-tratamento por coagulação e filtração em meio granular. No caso da NF, o pré-tratamento é igualmente essencial e pode incluir filtração por cartucho com anti-incrustante, aeração, coagulação/floculação, sedimentação, filtração em areia, ozonização, carvão ativado e UF. A complexidade dessas etapas varia conforme a qualidade da água de alimentação: fontes subterrâneas tendem a demandar pré-tratamentos mais simples, enquanto fontes superficiais

exigem abordagens mais robustas. Conclui-se que são necessários estudos em escala industrial para aprofundar o conhecimento sobre UF e NF na produção de água potável. Recomenda-se, ainda, o desenvolvimento de membranas com maior resistência ao *fouling* a agentes químicos, bem como a otimização dos protocolos de limpeza. A incorporação de módulos de fibra oca à NF pode impulsionar sua aplicação em larga escala no tratamento de águas para abastecimento público.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AROLA, K., VAN DER BRUGGEN, B., MÄNTTÄRI, M., & KALLIOINEN, M. (2019). Treatment options for nanofiltration and reverse osmosis concentrates from municipal wastewater treatment: A review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, 49(22), 2049–2116.

BAKER, R. W. **Membrane technology and applications**. 4. ed. [S. l.]: Wiley, 2024. 539 p.

BEYER, F., RIETMAN, B. M., ZWIJNENBURG, A., VAN DEN BRINK, P., VROUWENVELDER, J. S., JARZEMBOWSKA, M., LAURINONYTE, J., STAMS, A. J. M., & PLUGGE, C. M. (2014). Long-term performance and *fouling* analysis of full-scale direct nanofiltration (NF) installations treating anoxic groundwater. **Journal of Membrane Science**, 468, 339–348.

BRASIL. Lei nº 14.026, de 15 de julho de 2020. **Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, entre outras providências**. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 16 jul. 2020.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021**. Estabelece os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União: seção 1, Brasília, DF, 5 maio 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562> (acesso: 31 jul. 2025)

BUENO, M. Z., CORAL, L. A., SENS, M. L., & LAPOLLI, F. R. (2016). Avaliação da nanofiltração e da osmose inversa na remoção de carbofurano em águas de abastecimento. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, 21(3), 447–458.

CEDAE, 2023. **Mais água para Duque de Caxias: Cdae inicia as obras da nova ETA Xerém**. Disponível em: <https://www.cdae.com.br/Noticias/detalhe/mais-agua-para-duque-de-caxias-cdae-inicia-as-obras-da-nova-eta-xerem/id/2690> (acesso: 21 jan. 2025)

CHANG, H., YU, H., LI, X., ZHOU, Z., LIANG, H., SONG, W., JI, H., LIANG, Y., VIDIC, R.D., 2022a. Role of biological granular activated carbon in contaminant removal and ultrafiltration membrane performance in a full-scale system. **Journal of Membrane Science**, 644, 120122.

CHANG, H., ZHU, Y., YU, H., QU, F., ZHOU, Z., LI, X., YANG, Y., TANG, X., LIANG, H., 2022b. Long-term operation of ultrafiltration membrane in full-scale drinking water treatment plants in China: Characteristics of membrane performance. **Desalination**, 543, 116122.

CHRISTENSEN, M. L., & ORIOL, G. G. **MICROFILTRATION AND ULTRAFILTRATION**. IN: RODRIGUEZ, S. G. S; VILLACORTE, L. O. Experimental methods for membrane applications in desalination and water treatment. First edition. London: IWA Publishing, 2024. 489 p.

CRUZ, N., MIERZWA, J.C., 2020. Saúde pública e inovações tecnológicas para abastecimento público. **Saúde e Sociedade**, 29, e180824.

FAN, C., YAN, J., LIU, H., XIE, Y., LIU, H. (2024). Performance and membrane *fouling* characteristics of a drinking water multistage NF system based on membrane autopsy from a full-scale system. **Journal of Water Process Engineering**, 58, 104909.

FARTO, C. D.; ATHAYDE JÚNIOR, G. B. A.; SENA, R. F.; ROSENHAIM, R. Contaminantes de preocupação emergente no Brasil na década 2010 – 2019 – Parte I: ocorrência em diversos ambientes aquáticos. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, 1-19, 2021a.

FARTO, C. D.; ATHAYDE JÚNIOR, G. B. A.; SENA, R. F.; ROSENHAIM, R. Contaminantes de preocupação emergente no Brasil na década 2010– 2019 – Parte II: tecnologias de tratamento e eficiências de remoção em ETES e ETAS. **Revista de Gestão de Água da América Latina**, 1-15, 2021b.

GIAGNORIO, M., STEFFENINO, S., MEUCCL, L., ZANETTI, M. C., TIRAFERRI, A. (2018). Design and performance of a nanofiltration plant for the removal of chromium aimed at the production of safe potable water. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 6(4), 4467–4475.

GORA, S. L., WALSH, M. E. (2011). Recycle of waste backwash water in ultrafiltration drinking water treatment processes. **Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua**, 60(4), 185–196.

JAFARI, M., VANOPPEN, M., VAN AGTMAAL, J. M. C., CORNELISSEN, E. R., VROUWENVELDER, J. S., VERLIEFDE, A., VAN LOOSDRECHT, M. C. M., PICIOREANU, C. (2021). Cost of *fouling* in full-scale reverse osmosis and nanofiltration installations in the Netherlands. **Desalination**, 500, 114865.

JIA, J., RUI, M., CHENG, X., LIANG, H. (2023). Application of ultrafiltration technology in drinking water industry of China: A comprehensive assessment of hybrid membrane processes. **Aqua Water Infrastructure, Ecosystems and Society**, 72(12), 2408–2421.

JUNKER, M. A., DE VOS, W. M., LAMMERTINK, R. G. H., DE GROOTH, J. (2021). Bridging the gap between lab-scale and commercial dimensions of hollow fiber nanofiltration membranes. **Journal of Membrane Science**, 624, 119100.

KHAN, S. J., MURCHLAND, D., RHODES, M., WAITE, T. D. (2009). Management of Concentrated Waste Streams from High-Pressure Membrane Water Treatment Systems. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, 39(5), 367–415.

KÖHLER, S. J., LAVONEN, E., KEUCKEN, A., SCHMITT-KOPPLIN, P., SPANJER, T., PERSSON, K. (2016). Upgrading coagulation with hollow-fibre nanofiltration for improved organic matter removal during surface water treatment. **Water Research**, 89, 232–240.

LIU, Zh., DANG, Z., LIU, Y. Legislation against endocrine-disrupting compounds in drinking water: essential but not enough to ensure water safety. **Environmental Science and Pollution Research**, 28, 19505–19510 (2021).

MOSLEHYANI, A., ISMAIL, A. F., MATSUURA, T., RAHMAN, M. A., GOH, P. S. **Recent progresses of ultrafiltration (UF) membranes and processes in water treatment**. In: Membrane separation principles and applications: from material selection to mechanisms and industrial uses. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier, 2019. 481 p.

OPHORST, M., GROOTH, J. DE, HEIJMAN, S. G. J., VAUDEVIRE, E. M. H., JAFARI, M. (2024). Operation and performance analysis of direct hollow fiber nanofiltration: A pilot study at IJsselmeer. **Separation and Purification Technology**, 349, 127786.

PARK, J.W., JOE, W., MAENG, S.K., 2020. Characterization of natural organic matter and assimilable organic carbon from an advanced full-scale drinking water treatment plant to tap. **Desalination and Water Treatment**, 180, 86–94.

PATEL, R. V. P., RAVAL, H. (2024). Comparative assessment of treatment technologies for minimizing reverse osmosis concentrate volume for industrial applications: A review. **Water Science & Technology**, 90(1), 314–343.

PIMENTA, J. F. de P., FERREIRA, L. C., AMERICO, J. H. P. **Uso de membranas no tratamento de água para abastecimento público**. In: Cláudio Mudadu Silva; Ismarley Lage Horta Moraes; Iván Andrés Sánchez Ortiz. (Org.). Separação por membranas no tratamento de água e efluentes domésticos e industriais. Ied.Curitiba, PR: Appris, 2023, v. 1, p. 55-99.

PORCELLI, N., JUDD, S. (2010). Chemical cleaning of potable water membranes: A review. **Separation and Purification Technology**, 71(2), 137–143.

Ultrafiltração e Nanofiltração no Tratamento de Água para Abastecimento Público: uma Revisão da Literatura

SCHNEIDER, R. P.; TSUTIYA, M. T. **Membranas filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reuso**. 1.ed., São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 234 p., 2001.

SEWERIN, T., ELSHOF, M. G., MATENCIO, S., BOERRIGTER, M., YU, J., DE GROOTH, J. (2021). Advances and Applications of Hollow Fiber Nanofiltration Membranes: A Review. **Membranes**, 11(11), 890.

SINGH, R., HANKINS, N. P. (2016). **Introduction to Membrane Processes for Water Treatment**. In Emerging Membrane Technology for Sustainable Water Treatment (pp. 15–52). Elsevier.

SISTEMA NACIONAL DE INFORMAÇÕES EM SANEAMENTO BÁSICO – SINISA. **Painel de Indicadores**. Disponível em: <https://indicadores-sinisa-2025.cidades.gov.br/> (acesso: 22 jul. 2025).

WANG, J., LIU, C., DING, S., YANG, Y. (2025). Nanofiltration (NF) application in drinking water treatment plants and the challenges of its concentrate management in China. *Desalination*, 611(1), 118937.

WU, S., LU, C., MA, B., LIU, R., HU, C., ULBRICHT, M., QU, J., 2022. Long-term direct ultrafiltration without chemical cleaning for purification of micro-polluted water in rural regions: Feasibility and application prospects. **Chemical Engineering Journal**, 443, 136531.

XU, P., HE, H., LI, T., CHEN, Y., DONG, B. (2023). Combining Full-Scale Ozonation and Biological Activated Carbon Filtration (O3-BAC) with Pilot-Scale Nanofiltration (NF) to Control Disinfection By-Product Formation for Treatment of Taihu Lake Water. **Water**, 15(5), 843.

YU, H., LI, X., CHANG, H., ZHOU, Z., ZHANG, T., YANG, Y., LI, G., JI, H., CAI, C., LIANG, H. (2020). Performance of hollow fiber ultrafiltration membrane in a full-scale drinking water treatment plant in China: A systematic evaluation during 7-year operation. **Journal of Membrane Science**, 613, 118469.

YUKSEKDAG, A., KORKUT, S., KAYA, R., EMIN PASAOGLU, M., TURKEN, T., AGTAS, M., EVREN ERSAHIN, M., OZGUN, H., KOYUNCU, I. (2023). Upgrading of conventional water treatment plant by nanofiltration for enhanced organic matter removal. **Separation and Purification Technology**, 325, 124766.

ZAT, M., BENETTI, A. D. (2011). Remoção dos compostos odoríferos geosmina e 2-metilisoborneol de águas de abastecimento através de processos de aeração em cascata, dessorção por ar e nanofiltração. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 16(4), 353–360.