



## I-377 – TRATAMENTO AVANÇADO DA ÁGUA DO LAGO PARANOÁ, BRASÍLIA/DF: REMOÇÃO DE PFOA E PFOS POR NANOFILTRAÇÃO

**Murilo Teles Domingues<sup>(1)(2)</sup>**

Professor EBTT, Instituto Federal de Goiás - IFG. Doutorando em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos – PTARH/UnB.

**Cássia de Queiroz Oliveira Cavalcante<sup>(2)</sup>**

Química do Laboratório de Saneamento Ambiental do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília. Doutora em Química, UnB.

**Nathan Gonçalves da Silva<sup>(2)</sup>**

Graduando em Engenharia Ambiental, UnB.

**Cristina Celia Silveira Brandão<sup>(2)</sup>**

Professora Associada, Universidade de Brasília – UnB. Doutora em Engenharia Ambiental, Imperial College, Londres.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Instituto Federal de Goiás, Rua 64, s/n - Esq. c/ Rua 11, Formosa/GO, 73.813-816

**Endereço<sup>(2)</sup>:** Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Campus Universitário Darcy Ribeiro, UnB, Brasília/DF, 70.910-900

**murilo.domingues@ifg.edu.br**

### RESUMO

As per e polifluoralquilas (PFAS) são substâncias sintetizadas desde a década de 1940 e estão presentes em diversos produtos do cotidiano, como carpetes, roupas, painéis antiaderentes, embalagens de alimentos, espuma de combate a incêndio, pesticidas e produtos de higiene pessoal, dentre outros. Estudos têm associado esses contaminantes a problemas de saúde, incluindo câncer testicular e de fígado. PFAS vêm sendo detectado em vários locais no mundo, incluindo no Brasil. Em 2012, PFOA e PFOS foram detectados na água do Lago Paranoá e também no efluente tratado que é lançado nele pelas estações de tratamento de esgoto (ETEs). Atualmente, a água do lago Paranoá passa por um tratamento de ultrafiltração e atende aos padrões de potabilidade em vigor, contudo, essa tecnologia não é capaz de remover com eficiência os PFAS, o que pode tornar a população exposta a riscos no futuro. Nesse contexto, esse trabalho avaliou o uso de duas membranas comerciais de nanofiltração (NF), a NF270 e a NFG, quanto à remoção de PFOA e PFOS em diferentes condições experimentais. Por meio de ensaios em escala de bancada, a remoção de PFOA e PFOS foi avaliada em matriz água ultrapura, em água ultrapura com ácidos húmicos (AH) e em água ultrafiltrada da ETA Lago Norte (Brasília/DF). Os valores de remoção para o PFOA e o PFOS foram maiores ao se utilizar a matriz com AH. A presença da MON aumentou a remoção do PFOA e do PFOS, enquanto que a matriz de água ultrafiltrada da ETA Lago Norte apresentou os menores índices de remoção (água ultrapura com AH > água ultrapura > água ultrafiltrada da ETA). Os resultados são preliminares e mais estudos são necessários para compreender melhor as interações entre PFAS, membrana e a qualidade da água, e como isso influencia na remoção desses contaminantes.

**PALAVRAS-CHAVE:** Nanofiltração, Per e polifluoralquilas (PFAS), Ácidos húmicos, Membranas NF270 e NFG, Água do lago Paranoá.

### INTRODUÇÃO

Uma classe de poluentes emergentes que tem recebido a atenção de pesquisadores e autoridades sanitárias em diferentes países são as per e polifluoralquilas (PFAS). Sintetizadas desde os anos 1940, as características físico-químicas únicas dos PFAS conferem a essas substâncias alta estabilidade termoquímica e propriedades hidrofóbicas/hidrofílicas, garantindo amplo uso na indústria e em produtos como carpetes, roupas, painéis antiaderentes, embalagens de alimentos, espuma de combate a incêndio, produtos de higiene pessoal, dentre outros (CETESB, 2021; Glüge et al. 2020).

Estudos epidemiológicos têm associado os PFAS a diversos problemas de saúde, inclusive a diferentes tipos de câncer, como o testicular e o de fígado (Corsini et al. 2014; Jensen and Leffers 2008; Steenland and Winquist 2021;

Sznajder-Katarzyńska, Surma, and Cieřlik 2019). Em função desses riscos, os ácidos perfluorooctanóico (PFOA) e sulfônico perfluorooctano (PFOS), foram incluídos como poluentes orgânicos persistentes (POPs) pela Convenção de Estocolmo em 2009 (CETESB, 2021). Atualmente, agências governamentais, como as dos Estados Unidos da América e União Europeia, têm estabelecido limites na água para consumo para uma série de PFAS (European Parliament, 2020; USEPA, 2022).

A legislação brasileira (PORTARIA GM/MS Nº 888/2021) ainda não incluiu nenhum limite para PFAS na água para consumo humano, apesar de já existir estudos que indiquem sua presença em águas brasileiras, como em águas superficiais, subterrâneas e em água para consumo (Abbt-Braun et al., 2014; Quinete et al., 2009; Schwanz et al., 2016; Stefano et al., 2023).

Atender a valores seguros para o PFAS se tornará um desafio para o tratamento de água, uma vez que, etapas do tratamento convencional, bastante difundido no Brasil, bem como membranas de baixa pressão, são ineficientes na remoção desse grupo de contaminante (Appleman et al., 2014; Crone et al., 2019).

A nanofiltração (NF), um processo de separação por membrana de alta pressão, tem se mostrado promissora, com remoções de PFAS acima de 90% (Das e Ronen, 2022; Lenka, Kah e Padhye, 2021). Contudo, ainda não está totalmente compreendida a dinâmica de remoção desses contaminantes por essa técnica, principalmente pela complexa combinação entre i) matriz (qualidade da água), ii) a natureza físico-química da membrana, iii) as características do PFAS (Liu et al., 2022).

Nesse contexto, esse trabalho estudou a eficiência das membranas comerciais NF270 e NFG na remoção de PFOA e PFOS em diferentes matrizes. Foram utilizadas matrizes de água ultrapura, com matéria orgânica natural (MON) e água ultrafiltrada da ETA Lago Norte (Brasília/DF).

## OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivo geral avaliar a remoção de PFOA e PFOS em diferentes matrizes por meio de ensaios de bancada de NF. Os objetivos específicos foram:

- Comparar a remoção de PFOA e PFOS pelas membranas comerciais NF270 e NFG;
- Avaliar a influência dos ácidos húmicos eficiência de remoção dos PFAS estudados;
- Avaliar a influência da matriz de água ultrafiltrada da ETA Lago Norte (Brasília/DF) na remoção dos PFAS estudados.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### ENSAIOS DE FILTRAÇÃO POR MEMBRANAS

Os ensaios de NF em escala de bancada foram realizados em uma célula de separação com fluxo tangencial da marca Osmonics, modelo Sepa II-Cross-Flow, com sistema de fluxo tangencial e membranas planas, simulando um trecho de um módulo de membrana em espiral.

As duas membranas comerciais avaliadas, a NF270 e a NFG, são, genericamente, consideradas fechada e aberta, respectivamente. As membranas escolhidas são compostas por três camadas, uma sendo de poliéster, que funciona como suporte estrutural, uma intermediária de polissulfona e uma ultrafina de poliamida, essa última responsável pela camada ativa da membrana. A Tabela 1 apresenta algumas características referentes às membranas.

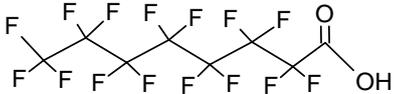
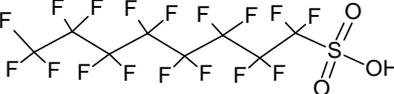
**Tabela 1: Características das membranas NF270 e NFG (Mohammad et al., 2015).**

Membrana / Fabricante	Massa Molar de Corte (MMC)	Rejeição de Sais (%)	Composição da Camada Ativa
NF270 / Dow Filmtec	200 – 400 g.mol <sup>-1</sup>	> 97%	Poliamida
NFG / Synder	600 – 800 g.mol <sup>-1</sup>	50% MgSO <sub>4</sub>	Poliamida
		10 – 30% NaCl	

Como já mencionado, os ensaios foram conduzidos utilizando três matrizes diferentes: (1) água ultrapura (sistema Milli-Q, Merck), (2) água ultrapura com ácidos húmicos (AH) e (3) água ultrafiltrada da estação de tratamento de água – ETA Lago Norte (Brasília/DF). A ETA Lago Norte capta água do lago Paranoá e utiliza a ultrafiltração como processo de tratamento.

Os PFAS estudados foram o PFOA (CAS 335-67-1, 96%, Sigma-Aldrich) e o PFOS (CAS 2795-39-3, 92,7%, Sigma-Aldrich) (Tabela 2), os quais possuem em suas estruturas oito carbonos e os grupos funcionais carboxílico e sulfônico, respectivamente. A concentração média do PFOA e do PFOS na matriz de alimentação foi de 1300  $\mu\text{g.L}^{-1}$  e 1100  $\mu\text{g.L}^{-1}$ , respectivamente. Os ensaios foram conduzidos com temperatura controlada em 27 °C ( $\pm 1,5$  °C), com pressão de alimentação de 8 bar. A escolha desses contaminantes se deu pela possibilidade de explorar a influência massa molar e dos grupos funcionais nas interações com o meio e com a membrana, e, portanto, essas relações com as suas eficiências de remoção.

**Tabela 2: Características do PFOA e do PFOS.**

Composto PFAS	Massa Molar (g/mol)	Fórmula Química	Fórmula Molecular
PFOA	414,1	$\text{CF}_3(\text{CF}_2)_6\text{COOH}$	
PFOS	500,1	$\text{CF}_3(\text{CF}_2)_7\text{SO}_3\text{H}$	

Os ensaios foram realizados em ciclo fechado (com retorno do permeado e concentrado para o tanque de alimentação) e tiveram duração de 6 horas, com amostras do permeado e da alimentação coletadas nos seguintes tempos: 10 minutos, 30 minutos, 2 horas e 6 horas.

Uma folha de cada membrana NF270 e NFG foi previamente limpa com água ultrapura para retirada de possíveis impurezas em suas superfícies e acondicionadas em água ultrapura, para hidratação, por ao menos 24 horas antes do início dos ensaios. Em seguida as membranas eram alocadas na célula de NF e, utilizando água ultrapura, eram compactadas até estabilização do fluxo do permeado a uma pressão de 8 bar.

Devido ao caráter preliminar do trabalho, apenas os ensaios adotando como matriz água ultrapura foram feitos em duplicata, os demais ensaios foram feitos uma única vez.

## MÉTODO ANALÍTICO DE QUANTIFICAÇÃO DO PFOA E DO PFOS

O equipamento utilizado para a quantificação do PFOA e do PFOS foi um cromatógrafo líquido (Agilent Technologies, modelo 1200 Series) equipado com um forno de coluna com controle de temperatura (Shimadzu, modelo CTO-20a) acoplado a um espectrômetro de massas do tipo híbrido triplo quadrupolo linear (AB SCIEX, modelo QTRAP 3200).

O método analítico utilizado para a quantificação do PFOA e do PFOS foi adaptado da ASTM D-7979-20. De forma sucinta se utilizou uma coluna ACQUITY CSH fenil-hexil (130 Å, 1,7  $\mu\text{m}$ , 2,1 mm x 100 mm, Waters) com uma pré-coluna ACQUITY CSH fenil-hexil, (130 Å, 1,7  $\mu\text{m}$ , 2,1 mm x 5 mm, Waters). As fases móveis foram compostas por solução de 20 mM de A - acetato de amônio (CAS 631-61-8, grau ACS) e B - acetonitrilo (CAS 75-05-8, grau HPLC). O fluxo foi de 0,2  $\text{mL.min}^{-1}$  com início de 90% de A e 10% de B; em 0,5 minutos 70% de A e 30% de B; em 5 minutos 35% de A e 65% de B; em 5,1 minutos 2% A e 98% B; em 8,1 minutos 90% de A e 10% de B; 12 minutos 90% de A e 10% de B. A maioria das amostras foram quantificadas em triplicata ou mais, contudo, em alguns casos a quantificação foi feita em duplicata.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 1º ENSAIO: MEMBRANAS NF270 E NFG E MATRIZ ÁGUA ULTRAPURA

No primeiro grupo de ensaios foi avaliada a remoção de PFOA e PFOS pelas membranas NF270 e NFG adotando-se como matriz água ultrapura, em valor de pH próximo de 5. Esses ensaios foram feitos em duplicata e os resultados apresentados como uma média.

A remoção do PFOA e do PFOS usando a NF270 foi de > 96% e > 97%, respectivamente (Figura 1). A dinâmica de remoção do PFOA apresentou baixa variação durante todo o ensaio, com remoção inicial (10 minutos) de 96,4% e final (6 horas) de 96,9%. Para o PFOS, a remoção inicial foi de 97,1% e a final de 97,2%. Esses valores corroboram o encontrado na literatura.

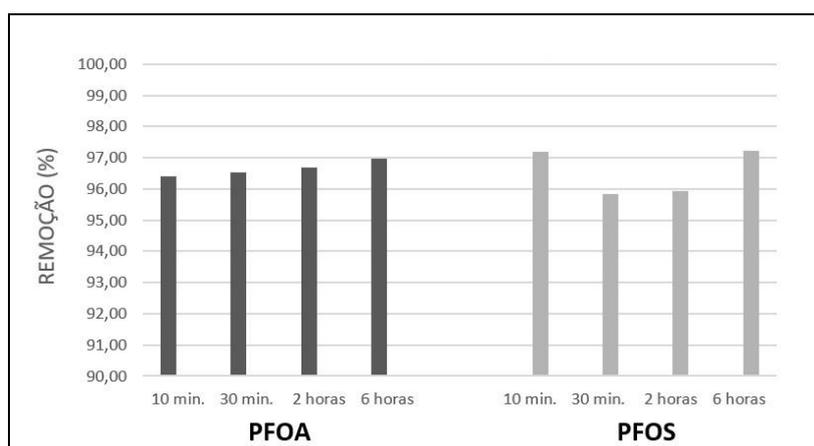


Figura 1: Remoção de PFOA e PFOS pela NF270 em matriz água ultrapura.

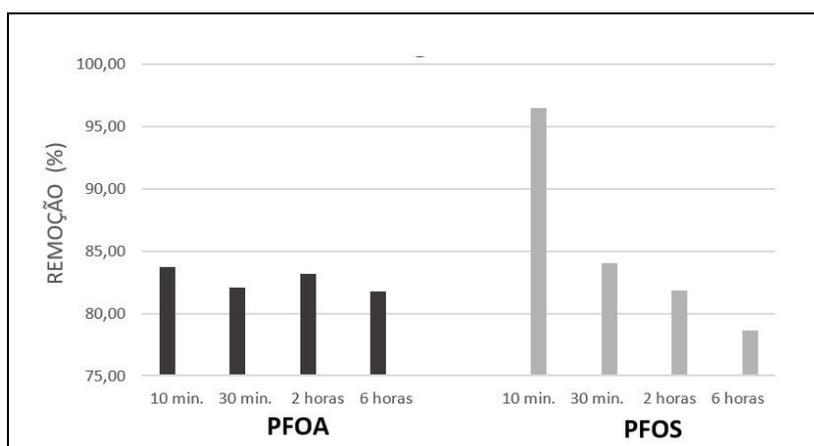
Steinle-Darling e Reinhard (2008) avaliaram 15 PFAS e também obtiveram remoção acima de 95% para o PFOA e o PFOS utilizando a NF270. As condições experimentais foram semelhantes: matriz em água deionizada, pH em torno de 5 e concentrações elevadas (150 a 400  $\mu\text{g.L}^{-1}$ ). Os autores também avaliaram outras condições experimentais, como a nanofiltração de PFAS em condições mais ácidas (pH = 2,8), obtendo remoções abaixo de 90%. A explicação para isso pode estar no papel desempenhado pelas interações eletrostáticas entre a membrana e os PFAS. Em valores de pH ácidos, pode-se atingir o ponto isoelétrico da membrana NF270, que é em torno de 3,1 (Hang et al. 2015), o que faz diminuir as interações por repulsão e influenciar de forma negativa na eficiência de remoção (Li et al. 2021).

Appleman et al. (2013) também conduziram experimentos com algumas condições semelhantes a deste trabalho: membrana NF270, equipamento de nanofiltração de bancada SEPA/CF (neste caso, os autores usaram dois equipamentos em série), água deionizada e pressão de alimentação de 8,6 bar. A concentração de alimentação foi de 1  $\mu\text{g.L}^{-1}$  para os 9 PFAS avaliados. As remoções para o PFOA e PFOS alcançaram 97 e 99%, respectivamente. Vale destacar que a vazão de alimentação utilizada foi de 1  $\text{L.min}^{-1}$  e vazão do permeado de 19  $\text{mL.min}^{-1}$ . Essa condição garante um recuperado de 1,9%, cerca de 40% maior do que a obtida aqui neste trabalho, que foi de 1,4%. Pode-se afirmar que a diferença entre os parâmetros hidráulicos entre Appleman et al. (2013) e aqui encontrados não influenciaram na eficiência de remoção da NF270 para ambos PFAS analisados. Para Mastropietro et al. (2021), o fator mais importante na remoção de PFAS por nanofiltração é a exclusão por tamanho, e, nos ensaios com a membrana NF270 e matriz de água ultrapura esse mecanismo deve ter prevalecido, uma vez que a massa molar dos PFAS avaliados é maior que a massa molar de corte (MMC) da membrana..

Nos ensaios com a NFG e matriz água ultrapura, os PFAS apresentaram menores valores de remoção (Figura 2) quando comparados com os ensaios com a NF270. Esse resultado já era esperado, uma vez que a MMC da NFG, segundo o fabricante, está na faixa de 600 a 800  $\text{g.mol}^{-1}$ , cerca de duas a três vezes maior do que a

NF270, o que em tese possibilita uma maior passagem dos contaminantes estudados devido ao mecanismo de exclusão por tamanho.

Ao final das 6 horas de ensaio, apesar de menor massa molar, o PFOA apresentou maior valor de remoção quando comparado com o PFOS (Figura 2). Essa relação também foi observada por Li et al. (2021). A remoção do PFOA apresentou baixa variação durante as 6 horas de ensaio (remoção entre 93,9% e 95,0%), já o PFOS apresentou alta remoção nos primeiros 10 minutos (98,7%) e diminuição ao longo do ensaio, finalizando em 93,4%. Uma hipótese para o comportamento de remoção do PFOS pode estar nas interações eletrostáticas de repulsão entre a membrana NFG e o PFOS, mecanismo esse responsável pela alta remoção no início dos ensaios. Ao longo dos ensaios, conforme o PFOS se adere à superfície da membrana, essas forças de repulsão diminuem e as interações hidrofóbicas passam a ter influência e ser o mecanismo responsável pelo aumento da transmissão de PFOS pela membrana (Li et al. 2021).



**Figura 2: Remoção de PFOA e PFOS pela NFG em matriz água ultrapura.**

Li et al. (2021) avaliaram a membrana NFG na remoção de PFAS em matriz de água deionizada, pH neutro (pH = 7,4) e concentração de 100 µg/L para cada PFAS. Os autores exploraram diferentes faixas de pressão, de 2 a 10 bar, o que fez gerar velocidades tangenciais correspondentes de 0,1 a 0,4 m.s<sup>-1</sup>. Os valores de remoção aumentaram com o aumento da pressão, e atingiram os máximos valores de ~72% para o PFOA e de ~52% para o PFOS na pressão de 10 bar.

Apesar de Li et al. (2021) também terem operado os experimentos em velocidades tangenciais próximas a deste trabalho, os fluxos do permeado e permeabilidade foram diferentes, o que pode ajudar a explicar a diferença nos valores de remoção. Segundo o material suplementar (Li et al, 2021), em pressão de 10 bar os autores obtiveram um fluxo de 6,9.10<sup>-5</sup> m.s<sup>-1</sup> do permeado, o que fez gerar uma permeabilidade correspondente de 6,9.10<sup>-6</sup> m.s<sup>-1</sup>.bar<sup>-1</sup>. Esse valor de permeabilidade é maior do que o obtido aqui. A maior permeabilidade registrada por Li et al (2021), ou seja, maior relação entre o fluxo do permeado e a pressão fornecida, pode ter influenciado na maior passagem de PFAS através da membrana NFG, resultando em menores valores de remoção.

## 2° ENSAIO: MEMBRANAS NF270 E NFG E MATRIZ ÁGUA ULTRAPURA E ÁCIDOS HÚMICOS

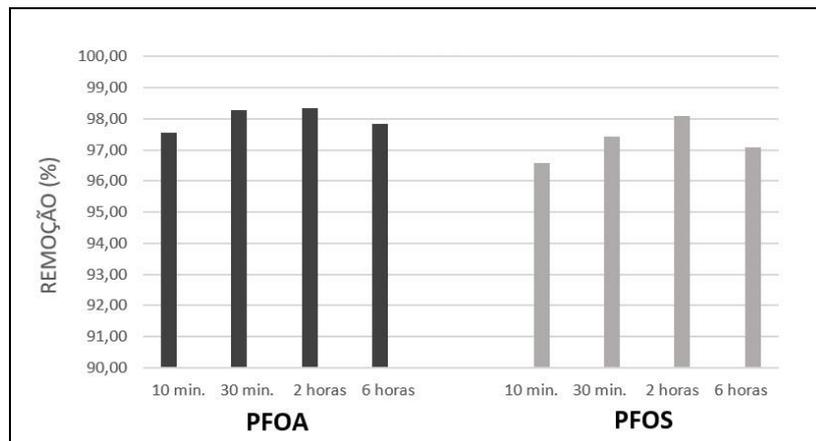
Ao final dos ensaios com água ultrapura, uma concentração de 5 mg.L<sup>-1</sup> de AH (na forma de sal, Sigma-Aldrich) foi adicionada na matriz para simular uma fração representativa da MON, que são os ácidos húmicos. O objetivo dessa etapa foi compreender a influência da MON na remoção do PFOA e do PFOS pelas membranas NF270 e NFG. Uma vez adicionado os AH, a matriz permaneceu isolada (sem nenhum contato com a membrana) de um dia para o outro (cerca de 12 horas) para intensificar possíveis interações entre os PFAS e a MON. O pH da matriz foi de 6,3 e foi feito um único ensaio com cada membrana.

Ao se avaliar a membrana NF270, observou-se um leve aumento na remoção do PFOA (de 97% para 98,4%) e do PFOS (de 97,2% para 98,1%) (Figura 3) quando comparados com os ensaios controle (em matriz de água

ultrapura). Entretanto, faz-se necessário a realização de mais ensaios para verificar se a diferença obtida é estaticamente representativa.

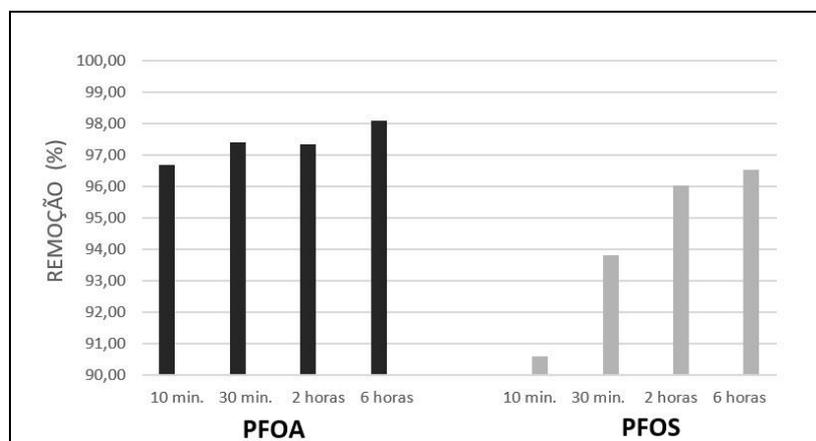
Zhao et al., 2016) avaliaram a NF270 na remoção de PFOS na presença de AH, e também observaram uma leve melhora na remoção. Segundo os autores, essa melhora na eficiência se dá pelo aumento do mecanismo de exclusão eletrostática gerada com a adição dos AH.

Para Liu et al. (2023), a exclusão por tamanho e as interações hidrofóbicas são os mecanismos prevalentes na remoção de PFAS, seja na presença ou na ausência de AH. Neste caso os autores avaliaram a membrana DL na remoção de PFAS na presença de três grupos representativos da MON, que foram os AH, o alginato de sódio (representando os polissacarídeos) e a albumina (representando as proteínas). Tanto a albumina como os AH aumentaram a remoção dos PFAS, ao contrário do alginato de sódio.



**Figura 3: Remoção de PFOA e PFOS pela NF270 em matriz água ultrapura com ácidos húmicos.**

No ensaio com a membrana NFG e matriz água ultrapura com AH, observou-se um aumento na remoção do PFOA de 95% para 98,1% (Figura 4) quando comparado com o controle (matriz água ultrapura). Já para o PFOS, a dinâmica de remoção foi diferente e com valores iniciais de remoção menores do que o observado no controle. Com 10 minutos de operação a remoção do PFOS foi 90,6%, porém, ao longo do ensaio, a remoção do PFOS aumentou, chegando a 96,5%, valor esse acima do obtido no controle (93,4%).



**Figura 4: Remoção de PFOA e PFOS pela NFG em matriz água ultrapura com ácidos húmicos.**

Os AH também contribuíram positivamente para a remoção do PFOA e do PFOS nos ensaios com a NFG, contudo, aparentemente, a contribuição parece ter sido diferente para cada composto. A remoção para o

PFOA, desde o início, se apresentou acima dos valores obtidos no controle. Isso pode representar uma maior afinidade do PFOA aos AH, o que induz a formação de complexos maiores, removidos mais facilmente pelo mecanismo de exclusão por tamanho (Liu et al. 2022). Já o PFOS, segundo Zhao et al. (2016), estabelece fracas interações com os AH em meio líquido, resultando em baixa remoção inicial. Além disso, a competição gerada pela MON pelos sítios de adsorção na membrana também podem ter contribuído pela menor eficiência da NF no início do ensaio (Liu et al. (2023). Contudo, ao longo do ensaio, pode ter ocorrido incrustação na membrana promovida pelos AH que podem ter atuado como uma barreira adicional e otimizado o mecanismo de exclusão por tamanho, melhorando a eficiência de remoção da NFG.

Para ajudar a entender o comportamento da MON durante a NF, foram analisadas amostras da alimentação e do permeado dos ensaios com matriz de AH e água ultrafiltrada através da medição da absorbância na região do UV (Espectrofotômetro Hach/DR5000), em comprimento de onda de 254 nm. A remoção de MON ficou acima de 99,9% para todas as amostras de permeado. Em relação às amostras da alimentação, observou-se uma redução entre 40 e 50% ao longo dos ensaios, o que pode supor uma aderência da MON à membrana, uma vez que os ensaios foram realizados em um ciclo fechado. Porém, ensaios para aferição do *fouling* são necessários.

### 3° ENSAIO: MEMBRANA NFG E MATRIZ ÁGUA ULTRAFILTRADA ETA LAGO NORTE (BRASÍLIA/DF)

A remoção do PFOA e do PFOS foi avaliada em matriz de água ultrafiltrada da ETA Lago Norte, que capta água do lago Paranoá (Brasília/DF), utilizando a membrana NFG (Figura 5). A água ultrafiltrada utilizada apresenta turbidez inferior 0,1 UT, valor de pH em torno de 7,4 e carbono orgânico total de cerca de 2,5 mg/L. No geral as concentrações de cálcio e sódio ficam em torno de 10 mg/L.

A remoção para ambos PFAS foram menores quando comparados com o controle e matriz com AH. A eficiência de remoção do PFOA e do PFOS, ao final do ensaio, foi de 81,8% e 78,7%, respectivamente. A remoção do PFOA permaneceu constante desde o início do ensaio, com pequena variação. Para o PFOS a remoção decresceu ao longo do tempo, com remoções de 96,5%, 84,1% e 81,1% aos 10, 30 minutos e 2 horas de ensaio, chegando ao valor de 78,7% para 6 horas. Uma hipótese, que merece ser estudada, para a menor eficiência é que a presença de cations na água possa ter neutralizado a carga negativa da membrana e ter reduzido as interações eletrostáticas de repulsão (Liu et al. 2022; Soriano, Gorri, and Urriaga 2019), mecanismo esse importante na remoção de PFAS pela NFG.

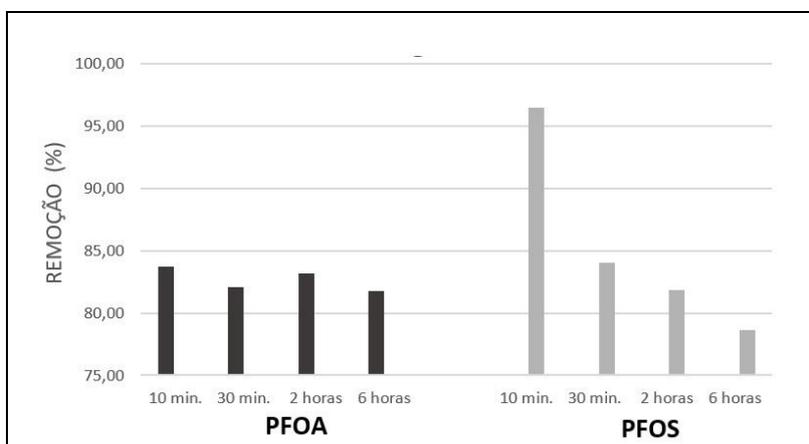


Figura 5: Remoção de PFOA e PFOS pela NFG em matriz água ultrafiltrada da ETA Lago Norte (DF).

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

Para os ensaios em água ultrapura e AH, a membrana NF270 se apresentou mais eficiente na remoção do PFOA e do PFOS do que a membrana NFG. Os AH tiveram efeito positivo na remoção dos PFAS, mostrando que a MON pode desempenhar um papel importante na remoção desses contaminantes. Os ensaios de NF em



matriz água ultrafiltrada da ETA Lago Norte (Brasília/DF) foi feito apenas com a membrana NFG e os resultados de remoção do PFOA e do PFOS foram menores quando comparados com o controle e com a matriz de AH, e uma hipótese para isso pode estar na presença de íons na água. O PFOA e o PFOS apresentam grupos funcionais diferentes e isso pode fazer com que tenham interações específicas que são dependentes das características físico-químicas da matriz, como a presença de MON e de íons.

Recomenda-se mais estudos de NF para remoção de PFAS explorando a qualidade da matriz para entender melhor como que as interações PFAS, qualidade da água e membrana acontecem, principalmente utilizando membranas abertas, que aparentam ter mecanismos de remoção mais complexos. Vale ressaltar que esse trabalho apresenta resultados preliminares, logo, são necessários mais estudos, principalmente repetições de ensaios, para que as tendências sejam validadas estatisticamente.

## AGRADECIMENTOS

Os Autores agradecem o apoio institucional da Universidade de Brasília - UnB e do Instituto Federal de Goiás - IFG e o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Pesquisa do Distrito Federal -FAPDF. Agradecem também à Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (Caesb) pela viabilização da coleta de água ultrafiltrada da ETA Lago Norte e pelo fornecimento dos dados qualitativos, como parte da parceria no desenvolvimento do projeto PDI.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Abbt-braun, G., Hornick, H., Brandao, C.C.S., Cavalcanti, C.B.G., Cavalcanti, C.P., Frimmel, F.H., Mjewsky, M., Steiniger, B., Troster, M., Worch, E. Water quality of tropical reservoirs in a changing world - the case of Lake Paranoá. In *Integrated Wat Res Management in Brazil*. IWA. 2014.
2. Appleman, T.D., Higgins, C.P., Quiñones, O., Vanderford, B.J., Kolstad, C., Zeigler-Holady, J.C., Dickenson, E.R.V. *Treatment of Poly- and Perfluoroalkyl Substances in U.S. Full-Scale Water Treatment Systems. Water Research*, 51: 246–55. 2014.
3. Appleman, T.D., Dickenson, E.R.V., Bellona, C., Higgins, C.P. 2013. *Nanofiltration and Granular Activated Carbon Treatment of Perfluoroalkyl Acids. Journal of Hazardous Materials*, 260: 740–46. 2013.
4. CETESB. Ficha de Informação Toxicológica: PFAS (PFOA, PFOS, PFOS-F, PFBS e outros). Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo, 2021. [https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2021/12/PFAS\\_PFOA\\_PFOS\\_POSF\\_PFBS\\_GENX.pdf](https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2021/12/PFAS_PFOA_PFOS_POSF_PFBS_GENX.pdf)
5. Corsini, E., Luebke, R.W., Germolec, D.R., DeWitt, J.C. 2014. *Perfluorinated Compounds: Emerging POPs with Potential Immunotoxicity. Toxicology Letters*, 230(2): 263–70. 2014.
6. Crone, B.C., Speth, T.F., Wahman, D.G., Abulikemu, G., Kleiner, E.J., Pressman, J.G. *Occurrence of Per- and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Source Water and Their Treatment in Drinking Water. Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 49(24): 2359–96. 2019.
7. Das, S., Ronen, A. *A Review on Removal and Destruction of Per-and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) by Novel Membranes. Membranes*, 12: 662. 2022.
8. European Parliament, Council of the European Union. *DIRECTIVE (EU) 2020/2184 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL. On the quality of water intended for human consumption*, 2021. (<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32020L2184>)
9. Glüge, J., Scheringer, M., Cousins, I.T., Dewitt, J.C., Goldenman, G., Herzke, D., Lohmann, R., Ng, C.A., Trier, X., Wang, Z. *An Overview of the Uses of Per- And Polyfluoroalkyl Substances (PFAS). Environmental Science: Processes and Impacts*, 22(12): 2345–73. 2020.
10. Hang, X., Chen, X., Luo, J., Cao, W., Wan, Y. *Removal and Recovery of Perfluorooctanoate from Wastewater by Nanofiltration. Separation and Purification Technology*, 145: 120–29. 2015.
11. Jensen, A.A., Leffers, H. *Emerging Endocrine Disruptors: Perfluoroalkylated Substances. International Journal of Andrology*, 161–69. 2008.
12. Lenka, S.P., Kah, M., Padhye, L.P. *A Review of the Occurrence, Transformation, and Removal of Poly-*

- and Perfluoroalkyl Substances (PFAS) in Wastewater Treatment Plants. *Water Research*, 199. 2021
13. Li, M., Sun, F., Shang, W., Zhang, X., Dong, W., Dong, Z., Zhao, S. *Removal Mechanisms of Perfluorinated Compounds (PFCs) by Nanofiltration: Roles of Membrane-Contaminant Interactions. Chemical Engineering Journal*, 406: 126814. 2021.
  14. Liu, C., Zhao, X., Faria, A.F., Deliz Quiñones, K.Y., Zhang, C., He, Q., Ma, J., Shen, Y., Zhi, Y. *Evaluating the Efficiency of Nanofiltration and Reverse Osmosis Membrane Processes for the Removal of Per- and Polyfluoroalkyl Substances from Water: A Critical Review. Separation and Purification Technology*, 302: 122161. 2022.
  15. Liu, C., Shen, Y., Zhao, X., Chen, Z., Gao, R., Zuo, Q., He, Q., Ma, J., Zhi, Y. *Removal of Per- and Polyfluoroalkyl Substances by Nanofiltration: Effect of Molecular Structure and Coexisting Natural Organic Matter. Journal of Hazardous Materials*, 454: 131438. 2023.
  16. Mastropietro, T.F., Bruno, R., Pardo, E., Armentano, D. *Reverse Osmosis and Nanofiltration Membranes for Highly Efficient PFASs Removal: Overview, Challenges and Future Perspectives. Dalton Transactions*, 50(16): 5398–5410. 2021.
  17. Mohammad, A.W., Teow, Y.H., Ang, W.L., Chung, Y.T., Oatley-Radcliffe, D.L., Hilal, N. *Nanofiltration Membranes Review: Recent Advances and Future Prospects. Desalination*, 356: 226–54. 2015.
  18. Quinete, N., Wu, Q., Zhang, T., Yun, S.H., Moreira, I., Kannan, K. *Specific Profiles of Perfluorinated Compounds in Surface and Drinking Waters and Accumulation in Mussels, Fish, and Dolphins from Southeastern Brazil. Chemosphere*, 77(6): 863–69. 2009.
  19. Schwanz, T. G., Llorca, M., Farré, M., Barceló, D. *Perfluoroalkyl Substances Assessment in Drinking Waters from Brazil, France and Spain. Science of the Total Environment*. 539: 143–52. 2016.
  20. Soriano, A., Gorri, D., Urriaga, A. *Selection of High Flux Membrane for the Effective Removal of Short-Chain Perfluorocarboxylic Acids. Industrial and Engineering Chemistry Research*, 58(8): 3329–38. 2019.
  21. Steenland, K., Winquist, A. *PFAS and Cancer, a Scoping Review of the Epidemiologic Evidence. Environmental Research*, 194. 2021.
  22. Stefano, P.H.P., Roisenberg, A., Acayaba, D.R., Roque, A.P., Bandoria, D.R., Soares, A., Montagner, C.C. *Occurrence and Distribution of Per-and Polyfluoroalkyl Substances (PFAS) in Surface and Groundwaters in an Urbanized and Agricultural Area, Southern Brazil. Environmental Science and Pollution Research*, 30(3): 6159–69. 2023.
  23. Steinle-Darling, E., Reinhard, M. 2008. *Nanofiltration for Trace Organic Contaminant Removal: Structure, Solution, and Membrane Fouling Effects on the Rejection of Perfluorochemicals.* *Environmental Science and Technology*. 42(14): 5292–97. 2008.
  24. Sznajder-Katarzyńska, K., Surma, M., Cieślik, I. *A Review of Perfluoroalkyl Acids (PFAAs) in Terms of Sources, Applications, Human Exposure, Dietary Intake, Toxicity, Legal Regulation, and Methods of Determination. Journal of Chemistry*, 2019.
  25. USEPA. *Drinking Water Health Advisories for PFAS Fact Sheet for Public Water Systems*, 2022. <https://www.epa.gov/system/files/documents/2022-06/drinking-water-ha-pfas-factsheet-water-system.pdf>
  26. Zhao, C., Tang, C.Y., Li, P., Adrian, P., Hu, G. *Perfluorooctane Sulfonate Removal by Nanofiltration Membrane-the Effect and Interaction of Magnesium Ion / Humic Acid. Journal of Membrane Science*, 503: 31–41. 2016.