

1369 – REJEIÇÃO DE 17 β -ESTRADIOL E MATÉRIA ORGÂNICA NATURAL POR MEIO DE NANOFILTRAÇÃO APLICADA AO TRATAMENTO DE ÁGUA DA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA DO LAGO NORTE: ESTUDO PRELIMINAR EM ESCALA PILOTO

Arthur Tavares Schleicher⁽¹⁾

Engenheiro Civil (UnB) e mestre em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos (UnB). Professor universitário na Universidade de Brasília (UnB) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

Leonardo Teixeira Sá Freire de Abreu⁽²⁾

Engenheiro Ambiental (UnB) e mestrando em Engenharia do Ambiente (Universidade do Porto - Portugal).

Alan Lugon Ferreira Pedrosa⁽³⁾

Engenheiro Ambiental (UnB) e mestrando em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos (UnB).

Cristina Celia Silveira Brandão⁽⁴⁾

Engenheira Química (UFBA), mestre em Engenharia Química (UFRJ) e doutora em Environmental Engineering (Imperial College - London). Professora universitária na Universidade de Brasília (UnB) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental e no Programa de pós-graduação em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos (PTARH-UnB).

Endereço⁽¹⁾: Campus Universitário Darcy Ribeiro, Gleba A, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental – Asa Norte – Brasília – DF - 70910-000- Brasil - Tel: +55 (61) 3107-1056 – e-mail: aschleicher@unb.br

RESUMO

Os perturbadores endócrinos (PE) são um grupo de substâncias exógenas capazes de alterar o funcionamento do sistema endócrino, causando efeitos adversos à saúde dos organismos e seus consequentes. Dentre os PE encontram-se os hormônios naturais, como o 17 β -estradiol (E2), associado a efeitos na saúde humana e animal, como distúrbios endócrinos, aumento do risco de câncer em órgãos sensíveis aos estrogênios, impactos no desenvolvimento fetal, maior incidência de doenças cardiovasculares e metabólicas, dentre outros. Os processos de tratamento de água e esgoto comumente empregados não são capazes de remover tais compostos, sendo necessária a adoção de tratamentos avançados (como a nanofiltração) em condições otimizadas. Avaliou-se, em escala piloto, com sensores de fluxo e pressão de baixo custo, a rejeição do hormônio E2 por um módulo novo e outro usado da membrana de nanofiltração NF270-2540. Água ultrafiltrada da Estação de Tratamento de Água do Lago Norte (Brasília-DF) foi empregada como a água de alimentação, enriquecida com uma concentração de E2 de 400 $\mu\text{g/L}$. Os experimentos foram conduzidos com 8 horas de duração e pressão de alimentação de 6,2 bar. Foram monitoradas variáveis operacionais (vazão, pressão e temperatura) das três correntes de fluxo (alimentação, concentrado e permeado), assim como parâmetros físico-químicos de qualidade da água (UV 254 nm, pH), e detecção e quantificação do hormônio 17 β -estradiol pelo método LC-MS/MS, com limite de detecção de 10 $\mu\text{g/L}$. Os sensores de vazão e pressão foram aferidos apresentando resposta fortemente linear ($R^2 > 0,99$), com erros geralmente abaixo dos 5% informados pelos fabricantes. O módulo da membrana NF270 nova apresentou elevados valores de média de rejeição de E2 (86%) e rejeição de matéria orgânica estimada pela absorvância UV254 nm (96,4%), enquanto a membrana usada obteve resultados inferiores (29% e 65%, respectivamente). A recuperação média obtida pela membrana nova foi de 18,6%, com fluxo específico de 6,6 $\text{L} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{bar}^{-1}$. Para a membrana usada, a recuperação e fluxo específico médio foram de 21,5% e 8 $\text{L} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{bar}^{-1}$, respectivamente. A maior rejeição observada de E2 nos instantes iniciais de operação obtida pela membrana nova (96%) pôde ser explicada pela adsorção hidrofóbica, e após a estabilização atingida, a exclusão por tamanho foi o mecanismo de remoção dominante. Não foram observadas tendências consistentes de rejeição com o módulo de membrana usada.

PALAVRAS-CHAVE: 17 β -Estradiol, perturbadores endócrinos, contaminantes emergentes, nanofiltração, processos de separação por membranas

INTRODUÇÃO

O crescimento urbano agrava problemas relativos à disponibilidade e ao acesso à água. Resíduos de atividades humanas e o descompasso entre a infraestrutura de saneamento e o crescimento populacional degradam os corpos hídricos, exigindo técnicas mais arrojadas de tratamento de água para consumo humano.

Os contaminantes emergentes (CE) se tornaram nas últimas décadas motivo de alerta devido à evolução dos métodos analíticos de detecção e da identificação de seus efeitos adversos à saúde de organismos (BITENCOURT *et al.*, 2011; HARZER *et al.*, 2015; LUPEPSA *et al.*, 2017;). Dentre os CE de interesse estão os perturbadores endócrinos (PE), associados a problemas de diferenciação sexual, desordens reprodutivas e alterações no sistema imunológico (PONTELLI, 2019), e encontrados na água e/ou sedimentos em concentrações de ng/L a µg/L, oriundos principalmente de efluentes domésticos e industriais (VULLIET e CRÉN-OLIVÉ, 2011).

Devido aos seus efeitos, alguns PE possuem limites de lançamento em corpos hídricos e/ou de potabilidade em águas para consumo humano, dentre eles o 17β-estradiol. A Organização Mundial de Saúde recomendou o 17β-estradiol como referência de ocorrência de PE em águas destinadas ao consumo humano, com limite de concentração de 1 ng/L, sendo adicionado à lista de vigilância por meio da Diretiva (UE) 2020/2184 (UE, 2020). Não há atualmente no Brasil recomendação local quanto à concentração desse composto em águas.

O tratamento de água em ciclo completo (comum no Brasil) é eficiente na remoção de turbidez, matéria orgânica natural e patógenos, mas ineficiente na remoção dos PE (HUERTA-FONTELA *et al.*, 2011), demandando a adoção de tratamentos avançados. Dentre eles estão os processos de separação por membranas (PSM), utilizados na dessalinização de água para consumo humano desde a década de 1960. Membranas de nanofiltração (NF) são alternativas para remoção de substâncias inorgânicas dissolvidas, carbono orgânico total e contaminantes de baixo peso molecular. Entretanto, sua viabilidade no tratamento de água para abastecimento urbano ainda é discutida, com escassez de estudos em escala real de operação. Custos operacionais, obstrução (*fouling*) e manutenção da membrana além da variabilidade de qualidade e complexidade da água bruta dificultam a disseminação dos PSM.

No Distrito Federal, a ETA Lago Norte opera com sistema de tratamento de ultrafiltração (UF) utilizando o Lago Paranoá como manancial. Nesse mesmo corpo hídrico são lançados efluentes de duas estações de tratamento de esgoto, fontes potenciais de contaminação por PE. Sabendo da inadequação da UF para remoção dos PE e outros CE, faz-se necessário investigar tecnologias complementares, como a NF, para remoção destes compostos.

OBJETIVOS

Avaliar, em escala piloto e empregando sensores programáveis de baixo custo, a remoção de 17β-estradiol e matéria orgânica natural por um módulo usado (M1) e outro novo (M2) de membrana de nanofiltração NF270-2540, usando como matriz o permeado do sistema de UF da ETA Lago Norte – DF

METODOLOGIA UTILIZADA

Os experimentos em escala piloto empregaram um módulo já bastante usado de membrana NF270-2540 (M1) e um módulo novo (M2), e seguiram três etapas:

- Etapa Preliminar – Aferição dos sensores de vazão e pressão e ajustes da instalação piloto de nanofiltração (IPNF). O diagrama de operação da IPNF utilizada é apresentado na Figura 1;
- Etapa 1 – Módulo M1, Experimentos A1 (branco), A2 e A3;
- Etapa 2 – Módulo M2, Experimentos A4 e A5.

Os experimentos utilizaram pressão de alimentação de 6,2 bar e concentração de 300-400 µg/L de E2 (exceto A1, sem adição de E2), sem ajustes de pH da água de alimentação. Todos eles duraram 8 horas baseando-se em trabalhos anteriores (SCHLEICHER, 2013; GERIN, 2020), pois normalmente nesse intervalo de tempo já fica estabelecida tendência de rejeição para esse cotaminante. O sistema foi avaliado principalmente quanto ao fluxo, rejeição de E2, rejeição de matéria orgânica, pressão transmembrana e obstrução.

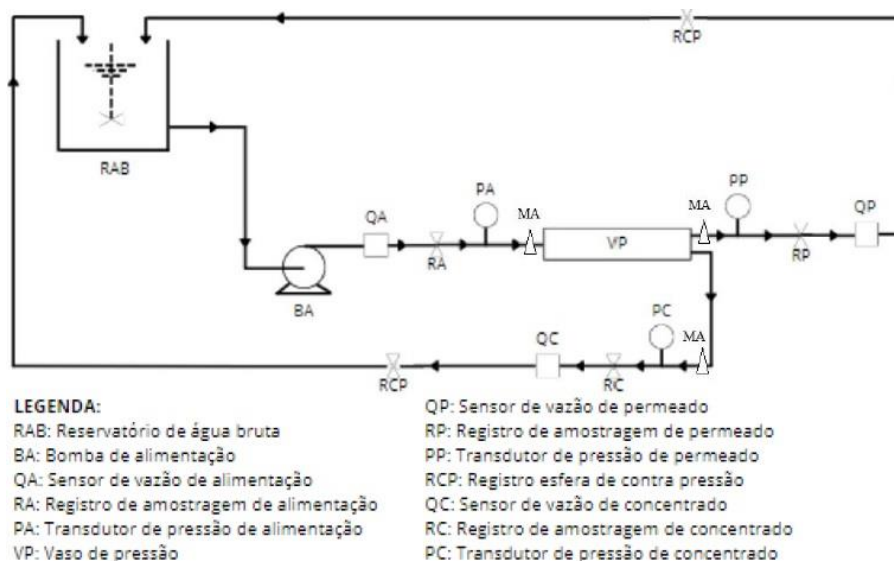


Figura 1: Diagrama da instalação piloto de nanofiltração (Fonte: Pedrosa, 2024).

A membrana de nanofiltração NF270-2540 tem geometria plana (área efetiva de 2,6 m²) disposta em espiral e possui fluxo tangencial, composta por uma camada de poliamida sobre suporte de polissulfona microporosa, apoiados em tecido de poliéster (FILMTECTM, 2015b). A Tabela 1 apresenta suas principais características.

Tabela 1: Principais características da membrana NF270

Características	NF270
Tipo	Semi-aromática ^{(c) (d)}
Massa molecular de corte	200-300 ^(c)
Ângulo de contato	23,4° ^(d)
Permeabilidade em água pura (L/(h.m ² .bar))	13,5 ^(a)
Pressão máxima de operação (bar)	41 ^(b)
Temperatura máxima (°C)	45 ^(c)
Faixa de pH	3-10 ^(c)
Rugosidade	8,55 ^(d)
Diâmetro médio dos poros (nm)	0,84 ^{(a) (e)}
Potencial Zeta	8,0 (pH 4) ^(e) -19,4 (pH 6) ^(e) -24,7 (pH 8) ^{(a) (e)}
NGHIEM <i>et al.</i> (2010) ^(a) ; FILMTEC TM (2015b) ^(b) ; YÜKSEL <i>et al.</i> (2013) ^(c) ; NGHIEM <i>et al.</i> (2008) ^(d) ; NGHIEM e HAWKES (2007) ^(e) ; FILMTEC TM (2015a) ^(f)	

Foi utilizada uma plataforma ArduinoTM compatível para automatizar o monitoramento da vazão e pressão de operação na IPNF. Essa plataforma apresenta baixo custo de prototipagem, softwares de simulação gratuitos (utilizou-se o ArduinoTM IDE) e facilidade de programação. Foram empregados os seguintes sensores, todos com registro de dados em dispositivo datalogger (com cartão SD):

- Vazão: YF-S201 (diâmetro de 1/2", fluxo de água entre 0 e 30 L/min, pressão máxima de 2 Mpa). Aferição (vazão x rotação) por comparação com dados de medidor de vazão eletromagnético MAGFLO-3100, em vazões pré-determinadas: 35, 30, 25, 20, 15, 10, 8,0, 6,0, 4,0 e 2,0 L/min. Para as vazões de 10 a 2,0 L/min a determinação ocorreu de forma manual utilizando proveta de 1000 mL e cronômetro.
- Pressão: Sreed Studios modelo G1/4 1.2 Mpa (diâmetro de 1/4", tensão de operação de 0,5V a 4,5V, pressão máxima de 2.4 Mpa). Aferição (carga de pressão x tensão elétrica) por comparação com dados de manômetro digital calibrado, em pressões pré-determinadas de 0 a 70 mca variando em incrementos de 5 mca.

A ETA Lago Norte (esquema operacional na Figura 2), operada pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal, tem vazão de projeto de 700 L/s e capta água do Lago Paranoá tratando-a por processo de separação de membranas de ultrafiltração (fibra-oca), com área útil de 77 m² por módulo, totalizando uma área de filtração de 48.510 m². Coletou-se água do Backwash na ETA Lago Norte como água de estudo, enriquecida posteriormente com 17 β -estradiol na concentração alvo de 400 μ g/L, para facilidade de detecção pelo método analítico empregado.



Figura 2: Fluxograma de operação da ETA Lago Norte com o ponto de coleta de água de estudo (Fonte: Modificado – Abreu, 2022).

Ensaio de permeabilidade foram conduzidos com água ultrapura Milli-Q antes de cada experimento, a fim de avaliar a presença de incrustações, depósitos irreversíveis e deteriorações na membrana. Com a pressão inicial estabilizada em 2 bar, monitoraram-se as seguintes variáveis:

- Vazão de alimentação e permeado;
- Pressão de saída do permeado e concentrado;
- Temperatura da água de alimentação.

Na sequência a pressão foi estabilizada em 3, 4, 5, 6, 7 e 8 bar. Metodologias semelhantes foram utilizadas por Simões (2016), Rodrigues (2018), Gerin (2020) e Barros (2022).

Determinou-se a permeabilidade hidráulica a partir do coeficiente angular da equação da reta obtida entre o fluxo de permeado em função da pressão transmembrana, com os fluxos normalizados para temperatura de 25°C conforme equação fornecida pelo fabricante do módulo.

Limpezas químicas foram feitas após cada experimento concluído, para restabelecer as características iniciais de operação, conforme procedimento recomendado pelo fabricante (FILMTEC™, 2015), envolvendo limpeza alcalina (10 litros de solução NaOH a 0,1% e pH 12, 45 min de submersão e 45 em circulação) seguida de limpeza ácida (10 litros de solução de HCl a 0,2% e pH entre 1 e 2, 30min de submersão).

As variáveis quantificadas de qualidade de água foram matéria orgânica natural (estimada por UV 254 nm), 17 β -estradiol (LC-MS/MS), pH (potenciométrico) e temperatura. Amostras para avaliação da qualidade da água de alimentação e de permeado foram obtidas nos tempos de operação de 0,5h, 1h, 2h, 4h, 6h e 8h. Já as variáveis operacionais monitoradas foram pressão (alimentação, concentrado e permeado) e vazão (alimentação, permeado e concentrado), monitoradas a cada 1 segundo. Alguns procedimentos metodológicos foram baseados em Simões (2016), Rodrigues (2018), Gerin (2020) e Abreu (2022).

O 17 β -estradiol foi analisado em triplicatas, com condições cromatográficas apresentadas na Tabela 2. A curva de calibração foi preparada em água ultrapura nas concentrações de 10, 20, 30, 40, 50, 60 e 70 μ g/L. Nos experimentos com M1 houve diluição de 1:5 das amostras de permeado em água ultrapura, consequência da rejeição inferior ao esperado. Não foi preciso diluir as amostras de permeado para as análises com M2. As amostras de alimentação de ambos os módulos foram diluídas em 1:10 para análise.

Tabela 2: Condições para utilização da LC-MS/MS

Parâmetro	Condição/Valor
Coluna	C18, (4,6x150mm, 5µm porosidade)
Pré-coluna	C18 (Sigma Aldrich ®)
Fase móvel	Água Milli-Q + NH ₄ OH 0,15% e Metanol HPLC
Fluxo	0,6 mL/min
H ₂ O:MeOH	0-1 min: 50:50; 1-8 min: 15:85; 8-9 min: 15:85; 9-12 min: 50:50
Volume de injeção	10 µL
Duração de análise	12 minutos

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A transformação da frequência de rotação do sensor de vazão YF-S201 para vazão em L/min é feita pela Equação 1, sugerida pelo fabricante. Conforme os testes de aferição, verificou-se que a Equação 2 se ajustava melhor aos dados observados nos ensaios. Os dados obtidos, utilizando a Equação 2, estão apresentados na Figura 3.

$$\text{Vazão} = \text{Frequência de rotação} / 7 \quad \text{Equação (1)}$$

$$\text{Vazão} = \text{Frequência de rotação} / 6,8 \quad \text{Equação (2)}$$

Em que:

Vazão: [L/min]

Frequência de rotação: número de rotações por unidade de tempo [Hz]

Para todos os sensores de vazão o R² se apresentou acima de 0,999 com a Equação 2. A maior variação foi de 8%, pouco acima da margem de erro informada pelo fabricante (5%). Os maiores desvios foram observados para baixas vazões, sendo essas medidas realizadas por volumetria com auxílio de uma proveta, uma vez que o medidor eletromagnético utilizado não possuía sensibilidade suficiente para os menores valores de vazão ensaiados. A Figura 3 apresenta as relações obtidas entre as vazões de referência (determinadas por volumetria na faixa 2 – 10 L/min ou sensor eletromagnético na faixa 15 – 35 L/min) e as vazões apresentadas pelo equipamento

O valor registrado pelo manômetro digital de referência (em mca) foi correlacionado ao valor da tensão de saída registrado pelo sensor de pressão, em Volts. A Equação 3, sugerida pelo fabricante, transforma as tensões (V) em pressões (MPa). Cabe ressaltar que o monitoramento da tensão de saída (Vsaída) do sensor, variável contínua, é feito em porta analógica do circuito ArduinoTM compatível, com resolução de 10 bits. Portanto, seriam indicados valores discretos de 0 a 1023 (1024 valores possíveis), atribuindo-se a eles o nome de tensão digital.

$$V_{saída} = 5 \cdot (0,6667 \cdot P + 0,1) \quad \text{Equação (3)}$$

Em que:

Vsaída: tensão lida na porta analógica [V];

P: pressão indicada pelo sensor [Mpa];

Com os dados obtidos ajustaram-se equações para cada sensor de pressão conforme a Equação 4, associando o valor de tensão digital registrado pelo circuito ArduinoTM compatível com a carga de pressão avaliada, em mca. As correlações tensão (V) versus carga (mca), suas respectivas equações de retas obtidas e seus coeficiente de correlação (R²) são apresentados na Figura 4. Para todos os sensores de pressão o R² se apresentou acima de 0,9989, com as maiores variações observadas de 4%, dentro da margem de erro informada pelo fabricante (5%).

$$(\text{Tensão digital} \cdot 5/1024) = (\text{Coeficiente angular} \cdot \text{Carga}) + \text{Constante da reta} \quad \text{Equação (4)}$$

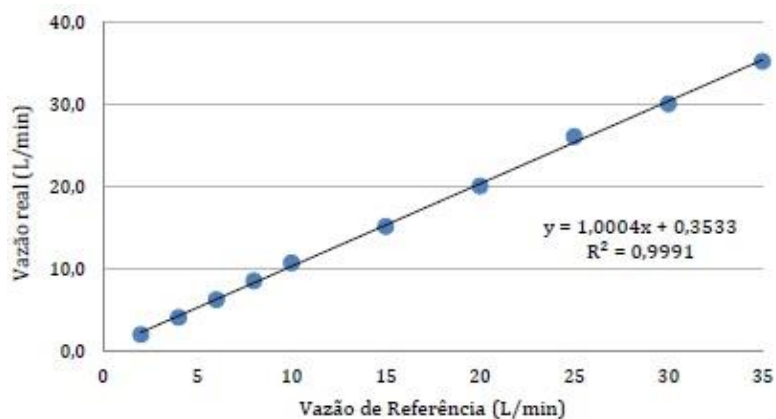
Em que:

Carga: [mca];

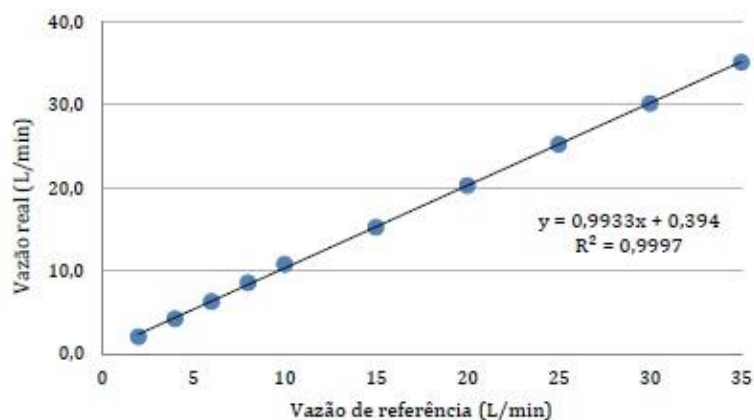
Tensão digital: valor discreto medido da tensão elétrica [unidades];

Coeficiente angular: declividade da reta [V/mca]

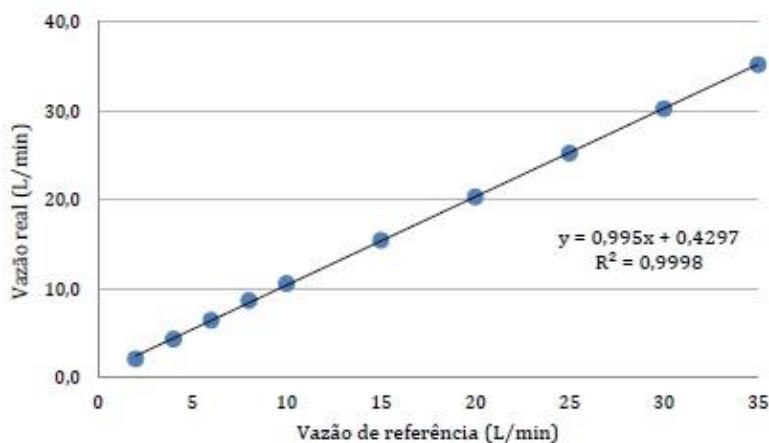
Constante da reta: intercepto da reta no eixo da tensão de saída [V];



(a)



(b)



(c)

Figura 3: Aferição dos sensores de vazão (a) permeado, (b) alimentação, (c) concentrado (Fonte: Abreu, 2022)

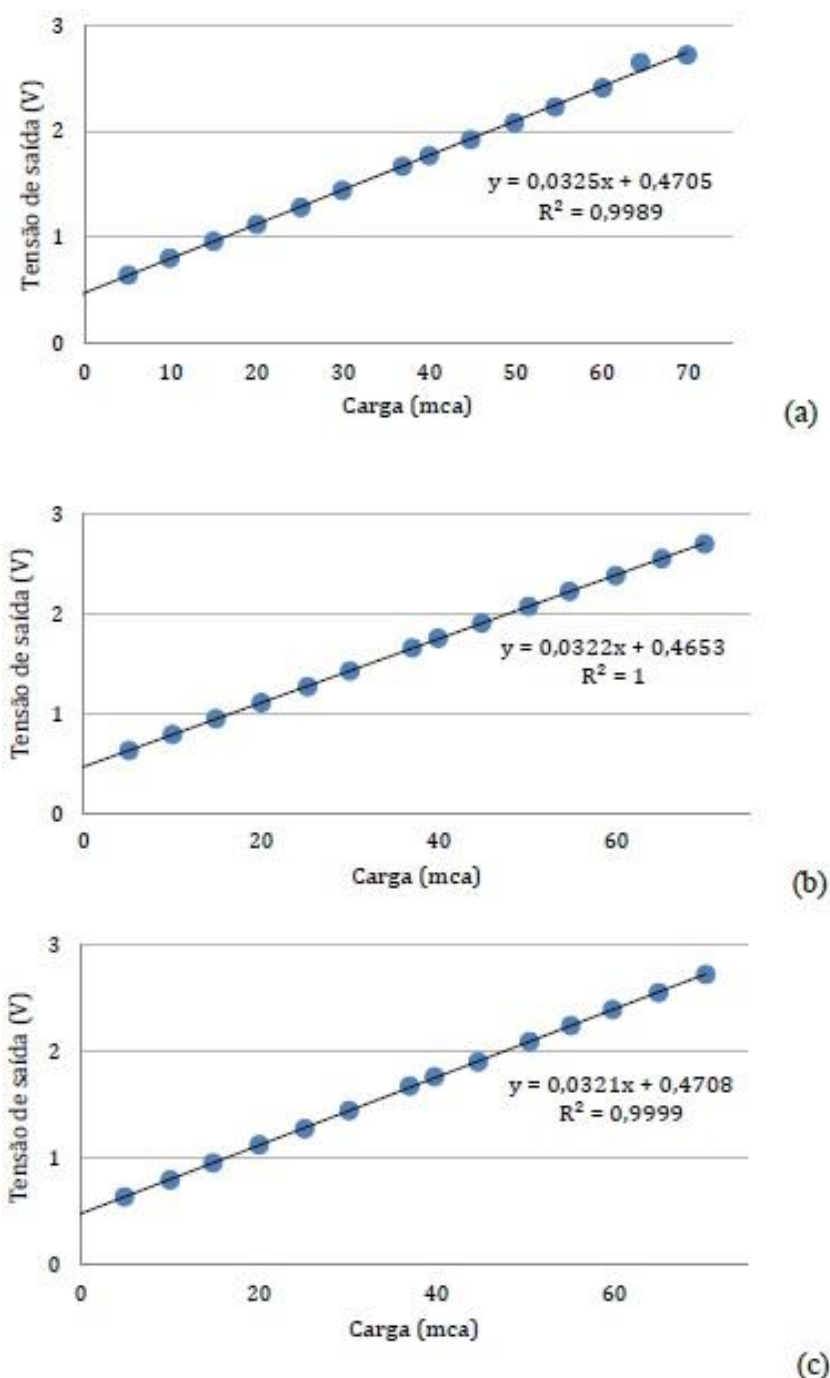


Figura 4: Aferição dos sensores de pressão (a) alimentação, (b) concentrado, (c) permeado (Fonte: Abreu, 2022).

Os dados obtidos nos ensaios de permeabilidade são apresentados na Figura 5, conforme a ordem de realização do experimentos (A1 – primeiro, A5 – último). Os valores de fluxo de permeado foram normalizados para 25°C. Não foi observada diferença significativa de permeabilidade nos ensaios de permeabilidade para a membrana usada (ensaios A1 – A3) e nova (A4 e A5). Os valores obtidos foram da ordem de $6,5 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{bar}^{-1}$, divergindo daqueles obtidos por Rodrigues (2018) e Gerin (2020) para a mesma membrana, de respectivamente 13-15 e $11,8 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{bar}^{-1}$. Se apresentaram também abaixo da faixa de -20% a +30% calculados a partir dos dados disponíveis em FILMTEC™ (2015b), esperando-se valores entre 8,55 e $13,9 \text{ L} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{bar}^{-1}$. Para as membranas já utilizadas com diversos ciclos de limpeza concluídos e fouling irreversível tal comportamento se justificaria, entretanto não para um módulo novo, demandando investigações posteriores.

Para os ensaios A2, A3, A4 e A5 foi utilizado o permeado de UF da ETA Lago Norte, coletado no reservatório de Backwash, posteriormente enriquecido com 17β-estradiol. O valor de pH inicial foi o natural da água de

alimentação, entre 7,7 e 7,9. Após a normalização dos resultados, devido à variação de temperatura durante os experimentos, o fluxo específico apresentou pequeno declínio ao longo dos experimentos. O fluxo específico médio obtido para a membrana usada e nova foi de 8,01 e 6,6 L/(h.m².bar).

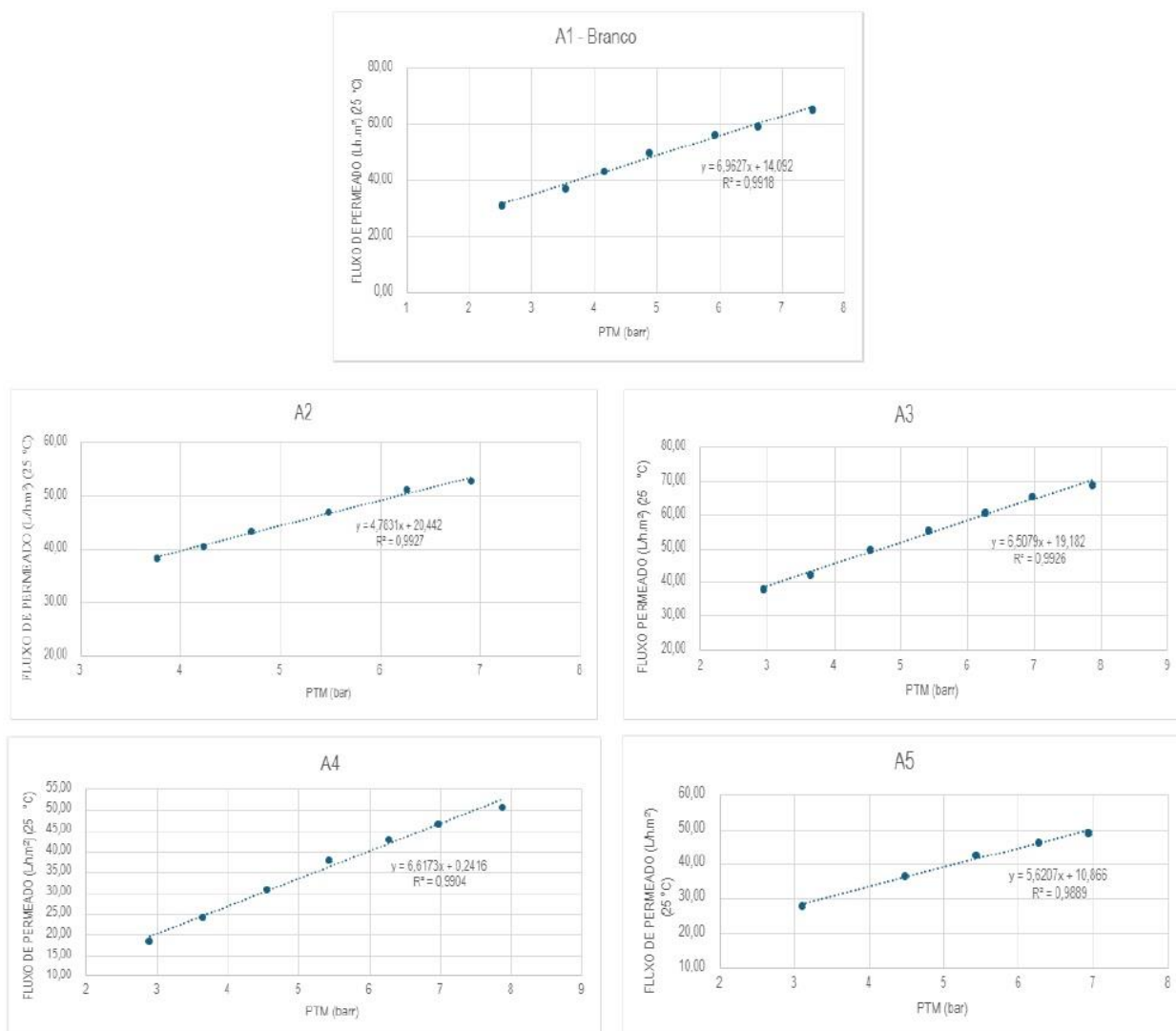


Figura 5: Resultados dos ensaios de permeabilidade (Fonte: Pedrosa, 2024).

Apesar da diferença de estado das membranas, os valores médios de fluxo de permeado foram parecidos. Para M1, o fluxo foi de 49,7 L.h⁻¹.m⁻², enquanto para M2 foi de 40,3 L.h⁻¹.m⁻². Ambas as membranas apresentaram redução constante de fluxo nas primeiras 4 horas de operação e após esse tempo, o fluxo da membrana nova mostrou tendência à estabilização. Os dados de fluxo de permeado ao longo do experimento foram apresentados como fluxo específico (Figura 6). Os valores de fluxo obtidos foram compatíveis com aqueles obtidos nos ensaios preliminares de permeabilidade.

Rodrigues (2018) obteve, para a mesma membrana e mesma pressão de operação, utilizando como matriz o efluente dos filtros da Estação de Tratamento de Água Brasília, fluxo específico mínimo e máximo de 9 e 11,4 L.h⁻¹.m⁻².bar⁻¹, enquanto para o presente trabalho os valores foram de 7,1 e 8,9 (membrana usada) e 6,01 e 7,51 L.h⁻¹.m⁻².bar⁻¹ (membrana nova), respectivamente, apontando leve declínio no fluxo específico observado ao longo de várias horas de operação, o que pode ter ocorrido pela diferença entre as matrizes empregadas.

Schleicher (2013) relatou fluxo específico médio de permeado de 16,6 L.h⁻¹.m⁻².bar⁻¹ para mesma membrana (NF270), com matriz de água deionizada enriquecida com E1, E2 e EE2. A diferença no entanto deve ser considerada com ressalvas, visto que o autor desenvolveu seu trabalho em escala de bancada (membrana plana retangular de 140 cm² de área efetiva) e o presente estudo se deu em escala piloto (módulo espiral 2,6 m²).

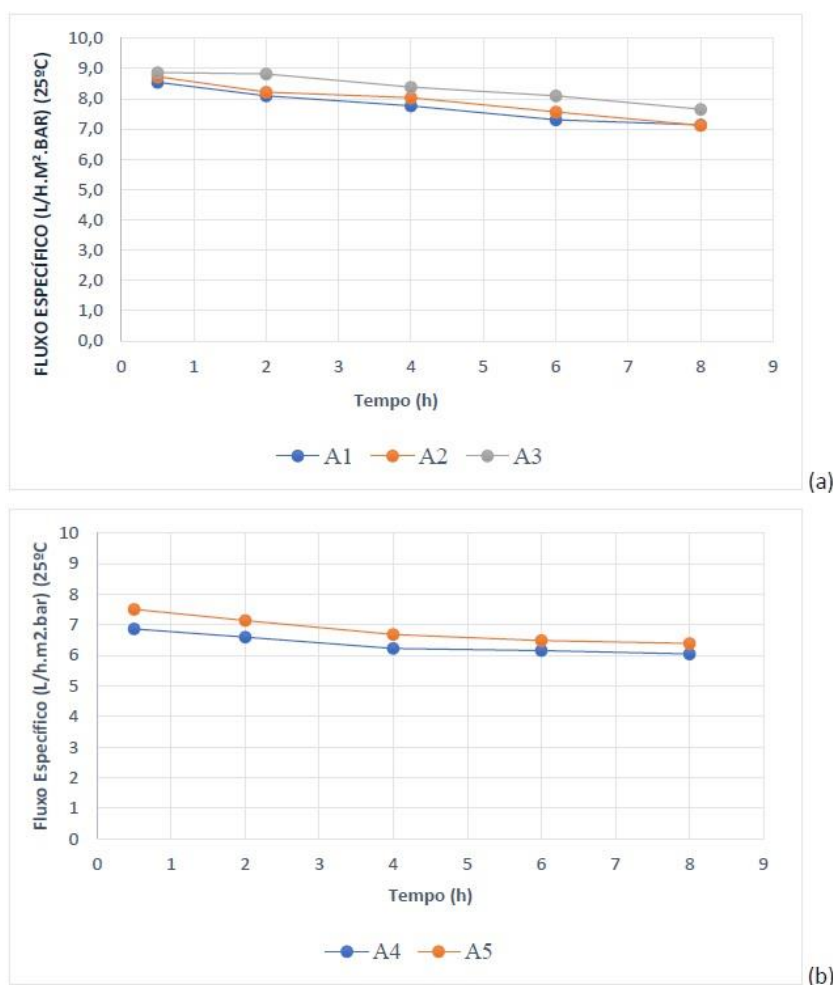


Figura 6: Fluxo específico normalizado ao longo dos experimento (a) membrana usada, (b) membrana nova (Fonte: Pedrosa, 2024).

Os resultados de recuperação obtidos nos experimentos A1 a A5 são apresentados na Figura 7. A recuperação média para M1 (usada) foi de 21,50%, e para M2 foi de 18,63% (nova). Em todos os experimentos houve redução da recuperação (de 1,5 a 3%), ao longo das 8 horas de operação. Essa redução foi influenciada pela normalização do fluxo, devido à variação de temperatura. A redução da recuperação ao longo dos experimentos pode indicar a obstrução dos poros (*fouling*). Gerin (2020), utilizando como matriz água ultrapura enriquecida com EE2, obteve recuperação média de 21%, similar à deste trabalho. Todos os experimentos da autora também utilizaram a membrana NF270 e o sistema operou com pressão de alimentação de cerca de 6 bar.

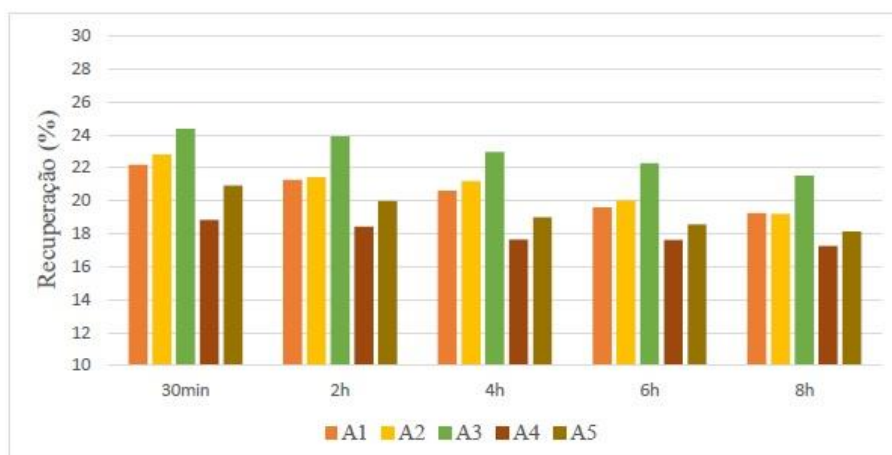


Figura 7: Recuperação observada nos experimentos (Fonte: Pedrosa, 2024).

Houve notável diferença entre os experimentos realizados com M1 e M2. A rejeição média de E2 nos experimentos com M1 foi de 29%, sem tendência de rejeição, que variou de 20-40% nas 8 horas de experimento. Simões (2016) obteve rejeição de 40% (para BFA) utilizando NF270 que já havia passado por diversas limpezas - informações que condizem com os resultados obtidos com M1. A rejeição média de E2 utilizando M2 (86%) se mostrou superior à de M1. Nos instantes iniciais de operação, a rejeição de M1 chegou a 96%, e reduziu ao longo das primeiras 6 horas dos experimentos A4 e A5 (Figura 10), indicando uma estabilização a partir de então. Yoon *et al.* (2004) observaram comportamento parecido em suas análises, com maior remoção inicial de E2 por adsorção hidrofóbica e, após estabilização, dominância de exclusão por tamanho. Esses mecanismos, somados ao fouling, podem explicar a redução de rejeição ao longo dos experimentos com a M2.

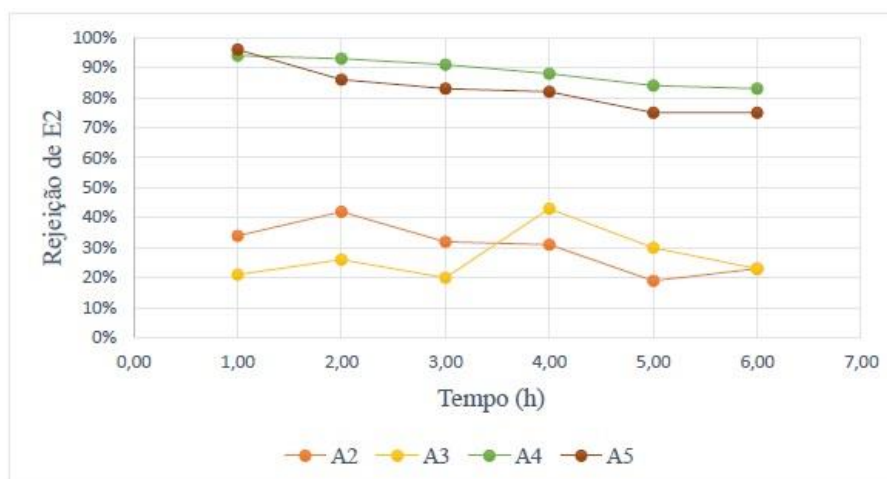


Figura 10: Rejeição de E2 obtida nos experimentos (Fonte: Pedrosa, 2024).

A rejeição de matéria orgânica natural (MON) estimada por UV 254 nm é apresentada na Figura 11. Assim como na rejeição de E2, os resultados obtidos reforçam a ideia de que o estado da membrana influenciou nos valores de rejeição. Para M1, a média de variação UV 254 nos experimentos foi de 65,4%, e para M2, 96,4%. Os valores para a M2 convergem com a alta rejeição (>95%) estimada por UV 254 nm relatada na literatura (Rodrigues, 2018; Simões, 2016; Schleicher, 2013).

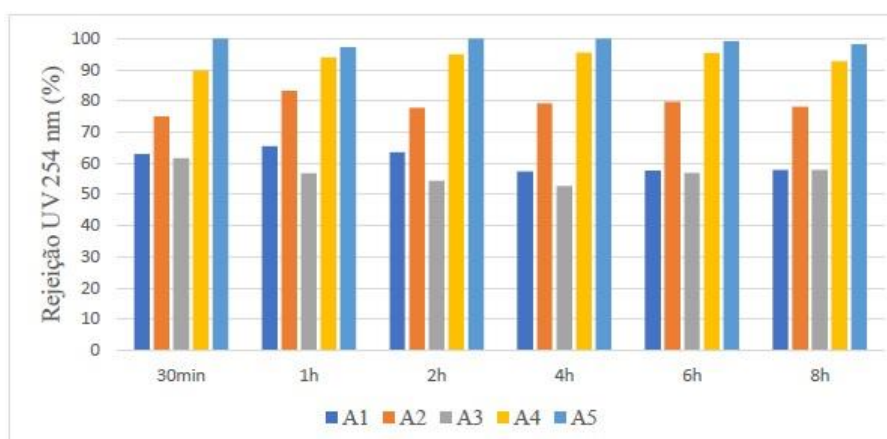


Figura 11: Rejeição estimada por UV 254 nm obtida nos experimentos (Fonte: Pedrosa, 2024).

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho avaliou o desempenho operacional e de eficiência de rejeição de MON e de 17 β -estradiol (E2), utilizando a membrana NF270 (módulo novo e outro usando) em escala piloto, utilizando como água de estudo o permeado de UF da ETA Lago Norte. Durante os experimentos a pressão de operação foi mantida constante (6,2 bar). Dentro do escopo do trabalho, considerando suas limitações, podem-se elencar as seguintes conclusões:

- Os sensores de vazão YF-S201 e os de pressão G1/4 1.2 Mpa apresentaram consistência nos dados monitorados

e registrados, com intervalos de 1 segundo, ao longo dos experimentos.

- A média de rejeição de E2 da M2 foi muito superior ao de M1 (86% e 29%, respectivamente). O mesmo pode ser dito para a rejeição de matéria orgânica estimada por UV 254 nm (96,4% e 65%), indicando que o estado da membrana afetou seu desempenho. A elevada rejeição observada utilizando a membrana M2 condiz com os resultados da literatura.
- A rejeição de E2 com M2 foi maior no início do experimento (96%), e caiu nas primeiras 6 horas de operação, estabilizando em 76%. Conclui-se que houve obstrução dos poros (fouling) na membrana, e a redução de permeabilidade entre os experimentos A4 e A5 sugere que esse fouling pode ser irreversível.
- O fluxo específico médio para M1 e M2 foi de 8,01 e 6,6 L/(h.m².bar), respectivamente, inferiores aos encontrados na literatura para membranas em bom estado.
- A recuperação média de M1 foi de 21,50% e de 18,63% para M2. Valores baixos de recuperação favorecem alta rejeição, como apresentados por M2.

Com base nos resultados obtidos apresentados e nas constatações e limitações que se deram a partir da realização deste trabalho, recomenda-se:

- Medições das variáveis operacionais nos primeiros 15 minutos de operação e possuam intervalos menores até o período de estabilização reportado na literatura (4 horas de duração).
- Sugere-se que a membrana nova (M2) passe por novas avaliações de fluxo, visto que foi utilizada pela primeira vez, podendo não estar estabilizada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABREU, L. T. S. F. Remoção de 17 β -Estradiol por meio de nanofiltração aplicada ao tratamento de água da estação de tratamento de água do Lago Norte: Estudo preliminar em escala piloto. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2022, 108 p.
- BARROS, J. P. R. Remoção de carbamazepina de esgoto tratado: influência do tipo de membrana e da matriz de alimentação nas rejeições e nos parâmetros operacionais. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM-243/2022, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2022, 118p.
- BITENCOURT, F.; FRIGHETTO, R. T. S.; QUEIROZ, J. F.; LOSEKANN, M. E.; LUIZ, A. J. B.; ALMEIDA, E. A.; PALHARES, J. C. P. Enzimas de biotransformação em tilápia (*Oreochromis niloticus*) exposta ao hormônio natural 17 β -estradiol. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento/ Embrapa Meio Ambiente*; 1º edição eletrônica; 2011, 32 p.
- FILMTEC™ (2015a). Formulário No - 609-00378-0811 Membranes FILMTEC NF90 Nanofiltration Elements for Commercial Systems. Disponível em: <http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_082d/0901b8038082d59b.pdf?filepath=liquidseps/pdfs/noreg/609-00378.pdf&fromPage=GetDoc>. Consultado em 10/03/2022.
- FILMTEC™ (2015b). Formulário No - 609-00519-1206 Membranes FILMTEC NF270 Nanofiltration Elements for Commercial Systems. Disponível em: <http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_0074/0901b803800749e1.pdf?filepath=liquidseps/pdfs/noreg/609-00519.pdf&fromPage=GetDoc>. Consultado em 10/03/2022.
- GERIN, G. V. Remoção de etinilestradiol por meio de nanofiltração aplicada ao tratamento avançado de esgotos: estudo em escala piloto. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2020, 84p.
- HARZER, B.; STIPP, M.C.; HERRERIAS, T. Avaliação da função hepática de peixes *Rhamdia quelen* expostos aos desreguladores endócrinos estriol e estrona. *Revista Intertox-EcoAdvisor de Toxicologia Risco Ambiental e Sociedade*, v. 8, n. 1, 2015, p. 82-99.
- HUERTA-FONTELA, M., GALCERAN, M.T., VENTURA, F. Occurrence and removal of pharmaceuticals and hormones through drinking water treatment. *Water Research*, v. 45, n. 3, 2011, p. 1432-1442.
- LUPEPSA, L.; PRIZON, A.C.; CIUS, A.; RANUCCI, L.; LEMOS, L.Z.; GAZOLLA, C.B.; BARBIERI, P.A.; MELO, R. F.; OLIVA, J.H.; CARVALHO, L.A.B.; PORTELA-CASTRO, A.L.B.P. Avaliação do potencial genotóxico em espécimes *Astyanax altiparanae* (Pisces, Characidae) submetidos ao hormônio 17 β - estradiol. *Semina: Ciências Biológicas e da Saúde*, Londrina, v. 38, n. 1 - Supl 1, 2017, p. 103.
- Nghiem, L.D., Hawkes, S. Effects of membrane fouling on the nanofiltration of pharmaceutically active compounds (PhACs): Mechanisms and role of membrane pore size. *Separation and Purification Technology*, v. 57, n. 1, 2007, p.176–184.
- Nghiem, L.D., Vogel, D., Khan, S. Characterizing humic acid fouling of nanofiltration membranes using bisphenol A as a molecular indicator. *Water Research*, v. 42, n. 15, 2008, p. 4049-4058.
- Nghiem, L.D., Coleman, P.J., Ependiller, C. Mechanisms underlying the effects of membrane fouling on the

nanofiltration trace organic contaminants. *Desalination*, v. 250, n. 2, 2010, p. 682-687.

PEDROSA, A. L. F. Avaliação da membrana NF270 para a remoção de 17 β -Estradiol por meio de nanofiltração aplicada à água ultrafiltrada da estação de tratamento de água do Lago Norte: estudo preliminar em escala piloto. Monografia de Projeto Final, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2024, 46 p.

PONTELLI, R. C. N. Desreguladores endócrinos e síndrome do olho seco. Tese de Doutorado em Oftalmologia, Otorrinolaringologia e Cirurgia de Cabeça e Pescoço - Faculdade de Medicina de Ribeirão Preto da Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2019. 104 p.

RODRIGUES, A.M. Avaliação em escala piloto do desempenho operacional e rejeição dos perturbadores endócrinos Bisfenol-A e cilindrospermopsina por membranas de nanofiltração. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM-209/2018, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 2018, 143p.

SCHLEICHER, A. T. Remoção de estrona, estradiol, etinilestradiol e bisfenol-A por meio de nanofiltração aplicada ao tratamento avançado de águas para consumo humano. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM-153/2013, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 2013, 107 p.

SIMÕES, C.P.P. Avaliação operacional e remoção de bisfenol-A no tratamento de água por diferentes tipos de membranas: avaliação em escala piloto. Dissertação de Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM-181/2016, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 2016, 183 p.

UE – União Europeia (2020). Diretiva (EU) 2020/2184 do Parlamento Europeu e do Conselho de 16 de dezembro de 2020 relativa à qualidade da água destinada ao consumo humano – texto relevante para efeitos do EEE. Jornal Oficial da União Europeia L435/1 de 23.12.2020

VULLIET, E., CREN-OLIVÉ, C. Screening of pharmaceuticals and hormones at the regional scale, in surface and groundwaters intended to human consumption. *Environmental Pollution*, v. 159, n. 10, 2011, p. 2929-2934.

YOON, Y.; WESTERHOFF, P.; YOON, J.; SNYDER, S. A. Removal of 17 β -estradiol and flouanthene by nanofiltration and ultrafiltration. *Journal of Environmental Engineering*, v. 130, n. 12, 2004, p. 1460-1467.

YÜKSEL, S., KABAY, N., YÜKSEL, M. Removal of bisphenol A (BFA) from water by various nanofiltration (NF) and reverse osmosis (RO) membranes. *Journal of Hazardous Materials*. v. 263, parte 2, n. 15, 2013, p. 307-310