

I-099 – APLICAÇÃO DA NANOFILTRAÇÃO NO TRATAMENTO DE ÁGUA PARA O CONSUMO HUMANO PARA REMOÇÃO DE BISFENOL-A: AVALIAÇÃO EM ESCALA PILOTO

Claudia Patricia Pereira Simões⁽¹⁾

Engenheira Química pela Universidade Federal de Uberlândia, Mestre em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos pela Universidade de Brasília e Analista Operacional da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB).

Cristina Célia Silveira Brandão⁽²⁾

Doutora em Engenharia Ambiental pelo Imperial College of Science and Technology da Universidade de Londres. Professora Associada do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UNB.

Endereço⁽¹⁾: Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB), SAIN, Área Especial Caesb, ETA-Brasília, CEP 70.620-000, Brasília, DF, Brasil – Tel: (61)96541685 – e-mail: claudiasimoes@caesb.df.gov.br

RESUMO

Os problemas de qualidade e disponibilidade de água nos grandes centros urbanos são crescentes e demandam soluções preventivas e corretivas. A remoção de microcontaminantes e patógenos emergentes é um dos desafios com relação à segurança da qualidade da água de consumo humano e os processos de separação por membranas (PSM) têm se mostrado como uma opção promissora. As membranas de nanofiltração (NF) tem se destacado por apresentarem propriedades intermediárias entre a ultrafiltração (UF) e a osmose inversa (OI). Ou seja, a NF tem como vantagem a utilização de pressões de funcionamento mais baixas, quando comparadas com a OI, e uma elevada rejeição de produtos orgânicos, quando comparada com a ultrafiltração. Entre os produtos orgânicos de interesse está o bisfenol-A, que é uma das substâncias perturbadoras do sistema endócrino de grande prevalência em águas superficiais e subterrâneas. Isto porque o bisfenol-A é um monômero amplamente usado na produção de policarbonatos plásticos, que estão presentes no cotidiano da população sob diferentes formas. Dessa forma, no presente trabalho a membrana de nanofiltração NF270 foi empregada no tratamento do efluente dos filtros da Estação de Tratamento de Água de Brasília enriquecido, ou não, com bisfenol-A. Foi avaliado o desempenho operacional, a rejeição do perturbador endócrino bisfenol-A, bem como a rejeição de vários parâmetros físico-químicos e microbiológicos. O módulo da membrana NF270 já havia sido utilizado anteriormente e apresentava algum tipo de incrustação, assim não apresentou bons resultados operacionais, porém a rejeição de BFA e da maioria dos parâmetros físico-químicos e bacteriológicos foi compatível com a literatura. Dessa forma, apesar do baixo desempenho operacional a utilização prática dessa membrana não deve ser desconsiderada, uma vez que a especificação do fornecedor e a literatura relatam fluxos de permeado muito superiores aos obtidos no presente trabalho.

PALAVRAS-CHAVE: Remoção de Bisfenol-A, Nanofiltração, Perturbador Endócrino, Tratamento Avançado, Fluxo de Permeado.

INTRODUÇÃO

Os problemas de qualidade e disponibilidade da água nos grandes centros urbanos se mostram como um dos desafios a serem enfrentados no presente, e nas próximas décadas. O crescimento desordenado dos centros urbanos, os resíduos gerados nas atividades domésticas e industriais, o descompasso entre crescimento populacional e investimentos na infraestrutura de saneamento, são componentes desse problema e contribuem para o comprometimento da qualidade da água nos mananciais de abastecimento de água.

Entre os atuais desafios relacionados à qualidade da água pode ser destacada a questão dos micropoluentes emergentes, incluindo os perturbadores endócrinos. Segundo a Comunidade Européia, os perturbadores endócrinos são substâncias químicas (naturais, sintéticas, produtos químicos industriais ou subprodutos)

presentes no meio ambiente, suspeitos de alterar as funções do sistema endócrino e, consequentemente, causar efeitos adversos à saúde de um organismo intacto, sua descendência, ou população.

O bisfenol A (BFA) é uma das substâncias perturbadoras do sistema endócrino de grande prevalência em águas superficiais e subterrâneas. Isto porque o bisfenol-A é um monômero amplamente usado na produção de policarbonatos plásticos, que estão presentes no cotidiano da população sob diferentes formas, como por exemplo: revestimento interior de recipientes para a armazenagem de alimentos, garrafas de água, recipientes de leite, mamadeiras, tubulações de água, protetores de vidraças, discos compactos, lentes automotivas e ópticas, adesivos, materiais de construção, corantes para tintas, como estabilizador ou antioxidante em plásticos e até mesmo como composto e selante dental (Staples *et al.*, 1998; Markey *et al.*, 2003; entre outros).

A estrogenicidade do bisfenol-A foi investigada por meio de estudo *in vitro* e os resultados mostraram que o BFA é capaz de estimular a síntese e proliferação de células cancerígenas. Outros estudos, realizados em camundongos, mostraram que baixas concentrações de bisfenol-A, cerca de 2µg/kg em doses diárias, foram suficientes para provocar efeitos nos órgãos sexuais. Para concentrações diárias de 20µg/kg houve redução na produção de espermatozoides desses animais. Pesquisas realizadas em peixes da espécie *Pimephales promelas*, expostos a concentrações entre 1 e 1.280µg/L, mostraram uma redução na fertilidade desses animais, que sofreu aumento com o passar das gerações (Lintelmann *et al.*, 2003).

Vandenberg *et al.* (2007) realizaram uma extensa revisão da literatura e concluíram que a maioria das crianças, bem como homens e mulheres, incluindo mulheres grávidas, apresentam níveis mensuráveis de BFA em fluidos e tecidos corporais. As concentrações de BFA no sangue humano (soro e plasma) são da ordem 0,3 - 4,4ng/mL. As medições de BFA no soro materno, soro fetal, de sangue do cordão umbilical, líquido amniótico e placenta indicaram que o feto humano em desenvolvimento pode ser exposto a concentrações de 1-3 ng/mL. Foi verificada também a existência evidências de BFA em produtos de consumo humano, especialmente pela lixiviação a partir de embalagens de alimentos e utensílios como mamadeiras e outros plásticos de consumo, sendo estimado que a exposição humana varie entre 1 e 5 µg/(kg.d) em função desse processo.

A legislação brasileira não contempla limites de BFA para a água de consumo humano, já no caso dos alimentos a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA) em sua Resolução RDC nº 17 de março de 2008, estabelece que o Limite de Migração Específico máximo permitido para embalagens de alimentos e bebidas é de 0,6 mg/kg de alimento. Em 2012 a ANVISA também proibiu a venda de utensílios para lactentes que contenham BFA (SBEM, 2015).

Dentre os processos capazes de remover de forma eficiente os micropoluentes das águas, existe um que vem se mostrando promissor, que é o processo de separação por membranas (PSM). A aplicação de membranas de alta pressão, como às de nanofiltração, na remoção de bisfenol-A já foi objeto de vários estudos (Comerton *et al.*, 2008; Nghiem *et al.*, 2008; Schleicher, 2013; Yüksel *et al.*, 2013, entre outros), apresentando rejeições que variam de 5% a, praticamente, 100%, em função das características da membrana e da qualidade da água.

Assim, considerando o potencial das membranas de alta pressão para remoção de perturbadores endócrinos, este trabalho teve como principal objetivo investigar a remoção do BFA por meio de nanofiltração, sendo realizada também uma avaliação operacional e qualitativa, visando uma possível aplicação ao tratamento de água para o consumo humano na realidade brasileira.

O desenvolvimento desse trabalho contou com o apoio e a participação da Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal (CAESB-DF) e da empresa Dow Chemical Company®, que cedeu, por empréstimo, a instalação piloto e a membrana NF270, utilizadas para realização dos experimentos.

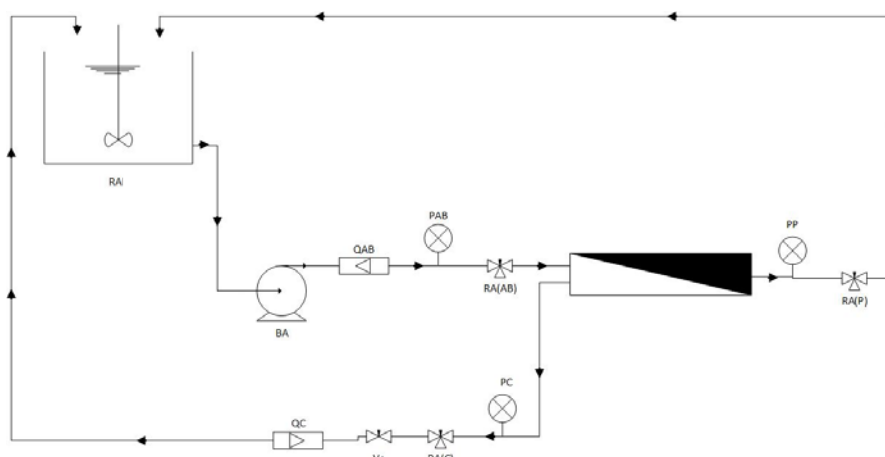
MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos em escala piloto. A instalação piloto era alimentada com o efluente dos filtros da Estação de Tratamento de Água de Brasília (ETA Brasília), que adota o tratamento convencional com flotação por ar dissolvido (FAD). Esta água era enriquecida, ou não, com bisfenol-A. A Tabela 1 contém

as principais características do efluente dos filtros da Estação de Tratamento de Água de Brasília (ETA Brasília), água utilizada no estudo. Enquanto a Figura 1 apresenta a ilustração esquemática da instalação piloto de nanofiltração.

Tabela 1 – Caracterização do efluente dos filtros da ETA Brasília

| Parâmetros | Número de Dados | Mínimo | Máximo | Médio | Desvio padrão |
|------------------------------------|-----------------|--------|--------|-------|---------------|
| Turbidez (UT) | 209 | 0,20 | 0,69 | 0,40 | 0,09 |
| pH | 209 | 5,5 | 7,4 | 6,8 | 0,19 |
| Cor aparente (UH) | 208 | 0 | 7 | 1 | 0,9 |
| Clorofila ($\mu\text{g/L}$) | 11 | 0 | 0,50 | 0,25 | 0,17 |
| Condutividade ($\mu\text{S/cm}$) | 11 | 8,7 | 10,4 | 9,8 | 0,5 |
| Cloreto (mg/L) | 11 | 1,0 | 1,3 | 1,1 | 0,1 |
| Cálcio (mg/L) | 11 | 1,0 | 1,5 | 1,2 | 0,13 |
| Dureza total (mg/L) | 10 | 3,0 | 4,2 | 3,4 | 0,4 |
| Sódio (mg/L) | 11 | 0,41 | 0,61 | 0,47 | 0,06 |
| Fosfato (mg/L) | 11 | 0,15 | 0,32 | 0,26 | 0,05 |



Legenda:

RA: Reservatório de alimentação

BA: Bomba de alimentação

QA: Rotâmetro de alimentação

PA: Manômetro da alimentação

PP: Manômetro do permeado

PC: Manômetro do concentrado

RA(C): Registro de amostragem de concentrado

Ve: Válvula de esfera

QC: Rotâmetro do concentrado

Figura 1 – Fluxograma da instalação piloto de NF

Os experimentos foram realizados utilizando módulo da membrana de nanofiltração NF270, com 2,6 m² de área de membrana, enrolada em espiral, com fluxo tangencial, e operada com pressão de alimentação de 8 bar. A Tabela 2 mostra as características da membrana.

Os experimentos para avaliar a rejeição de BFA foram realizados em triplicata, com duração de 48 horas cada. O monitoramento dos parâmetros operacionais ocorreu em 0, 1, 2, 4, 6, 8, 20, 24, 30, 36 e 48 horas de operação, e nesses instantes também foram realizadas coletas de amostras do concentrado, do permeado e da água de alimentação (denominada água bruta) para a quantificação do BFA. Em dois experimentos, NF270-2 e NF270-3, também foram monitorados diferentes parâmetros físico-químicos e bacteriológicos, a saber: clorofila a, condutividade, cálcio, cloreto, dureza total, fluoreto, fosfato, magnésio, potássio, série nitrogenada (nitrogênio total, nitrato, nitrito e amônia), sódio, sulfato, coliformes totais e Escherichia coli.

Foi adotada a concentração de 500 $\mu\text{g/L}$ do perturbador endócrino bisfenol-A, que era adicionada ao reservatório de alimentação, a fim de avaliar a sua remoção. Foi também realizado um experimento sem a adição do bisfenol-A, com objetivo de avaliar possíveis interferências do contaminante no desempenho das membranas, esse experimento foi denominado de NF270-0.

Tabela 2 – Principais características da membrana de NF utilizada

| Característica | Valor |
|--|--|
| Material | Poliamida sobre suporte de polissulfona ^(e) |
| Tipo | Semi-aromática |
| Massa molecular de corte (Da) | 150 ^(c) ; 200-300 ^(b) |
| Ângulo de contato | 32° ^(a) ; 23,4° ^(c) ; 42,7° ^(d) |
| Rejeição de NaCl | 40% ^(a) |
| Rejeição de CaCl ₂ | 43% ^(c) ; 50% ^(d) |
| Permeabilidade em água pura (L.h ⁻¹ .m ⁻² .bar ⁻¹) | 13,5 ^{(a); (d)} |
| Pressão máxima de operação (bar) | 41 ^(e) |
| Temperatura máxima (°C) | 45 ^(e) |
| Rugosidade | 8,5 ^(c) |
| Faixa de pH | 3-10 ^(b) |
| Diâmetro médio dos poros (nm) | 0,84 ^(a) |

Fontes: Vogel *et al.* (2010) ^(a); Yüksel *et al.* (2013) ^(b); Nghiem *et al.* (2008) ^(c); Mondal e Wickramasinghe (2008) ^(d) e FILMTEC™ (2015) ^(e).

No início e no fim do conjunto dos experimentos foram realizadas limpezas químicas e ensaios de permeabilidade. Para a realização da limpeza foi utilizada uma solução alcalina de NaOH à 0,1% e pH 12 e uma solução ácida de HCl 0,2%, pH entre 1 e 2. Os ensaios de permeabilidade foram realizados utilizando água deionizada como água de alimentação da instalação piloto. Neste caso, a unidade piloto era operada com pressões de 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9 bar e para cada pressão os valores de fluxo de permeado eram determinados e normalizados para a temperatura de 25°C, utilizando equação descrita por Simões (2016). A permeabilidade hidráulica (Lp) é obtida por meio da inclinação da reta (coeficiente angular) resultante da representação gráfica entre o fluxo de permeado normalizado em função da pressão transmembrana.

A técnica de quantificação do BFA foi a cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE) com detector de UV-fotodiodo, a coluna utilizada nas análises foi do tipo RP-18 (4mm de diâmetro, 125mm de comprimento e recheio com partículas de 5µm de diâmetro). A Tabela 3 apresenta um resumo dos parâmetros, instrumento e método adotado para análise dos vários parâmetros.

Tabela 3 – Parâmetros monitorados, método e instrumento

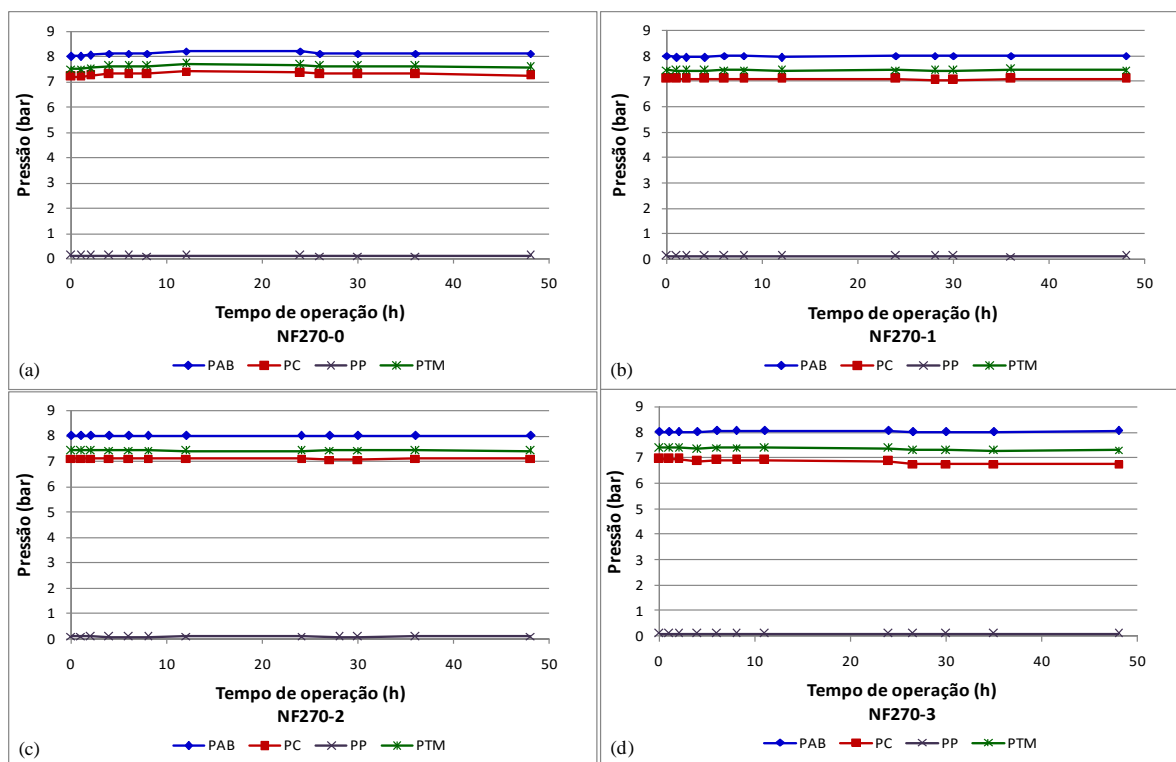
| Análise | Instrumento | Método |
|-----------------------------------|---|--|
| Bisfenol-A | Sistema de CLAE Shimadzu | Cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE) |
| | Condutivímetro, Jenway, modelo 4510 | |
| Nitrogênio Total | Analizador de Carbono e Nitrogênio marca Analytik Jena, modelo Multi N-C 2100 S | Combustão Catalítica |
| Clorofila a | Espectrofotômetro UV/Vis marca Perkin Elmer, modelo Lambda 25 | Espectrofotométrico com extração por acetona 90% - Monocromático SM 5540.C - SM-22 |
| Coliformes Totais e <i>E-coli</i> | Sala climatizada a 35 ± 0,5 °C, marca Ethik, modelo 421/SLDE | Substrato Enzimático SM 9223 B - SM-22 |
| Cálcio | Cromatógrafo Iônico marca Metrohm modelo 850 Professional IC | Cromatografia iônica SM 4110 - SM-22 |
| Cloreto | | |
| Dureza Total | | |
| Fluoreto | | |
| Fosfato | | |
| Magnésio | | |
| Nitrato | | |
| Nitrito | | |
| Amônia | | |
| Potássio | | |
| Sódio | | |
| Sulfato | | |

RESULTADOS

Os parâmetros operacionais monitorados durante os experimentos foram: pressão da água bruta, pressão de concentrado, pressão de permeado, vazão da água bruta, vazão de concentrado e a vazão de permeado. A partir desses dados foram obtidas a PTM, a recuperação e o fluxo de permeado.

DESEMPENHO OPERACIONAL

Os resultados da pressão da água bruta (PAB), do concentrado (PC) e do permeado (PPA) são apresentados na Figura 2.



Legenda:

PAB – Pressão da água bruta

PC – Pressão do concentrado

PP – Pressão do permeado

PTM – Pressão transmembrana

Figura 2 – Pressões de trabalho ao longo dos experimentos para a membrana de nanofiltração NF270

Analisando a Figura 2 não se observa alterações notáveis nas pressões de trabalho ao longo de cada experimento. Porém, é possível verificar uma pequena redução nos valores da pressão de concentrado quando se compara os experimentos. No primeiro experimento a pressão média de concentrado foi de 7,3bar, enquanto no último a pressão média foi de 6,9bar. Essa redução ocorreu em função do processo de incrustação, comprovado pelos resultados dos ensaios de permeabilidade hidráulica, antes e depois do conjunto de experimentos. A Figura 3(a) apresenta o ajuste de curvas obtidas para correlação entre a PTM e o fluxo de permeado normalizado à 25°C e os valores de permeabilidade obtidos são mostrados na Figura 3(b).

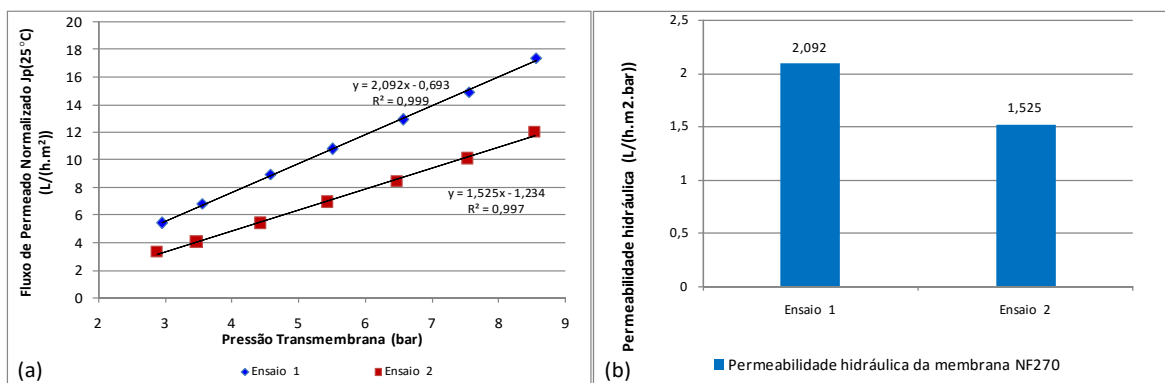
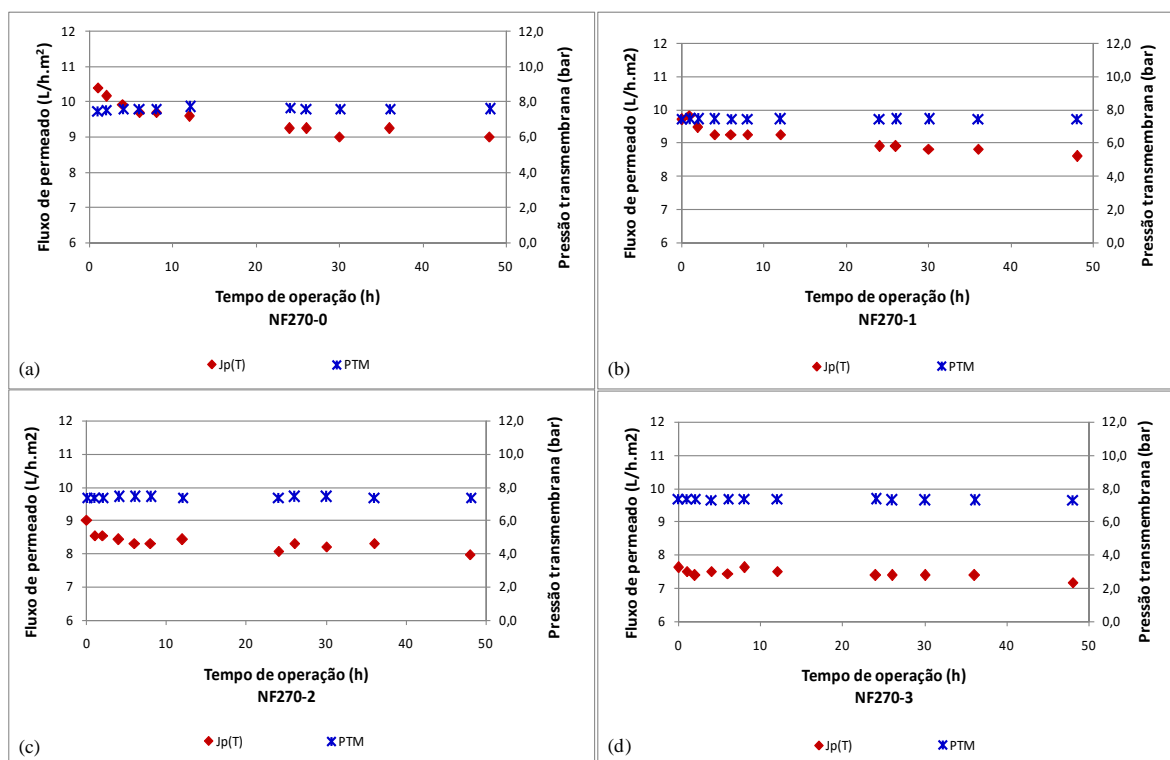


Figura 3 – (a) Relação entre a pressão transmembrana (PTM) o fluxo de permeado normalizado à 25°C para a membrana de nanofiltração NF270, antes e depois do conjunto de experimentos; (b) Valores de permeabilidade hidráulica para a membrana NF270

Como pode ser observado na Figura 3(b) houve uma redução da permeabilidade hidráulica da membrana, confirmando a formação de *fouling* na membrana, e, os valores obtidos foram muito inferiores ao valor calculado (10,7L/(h.m².bar)) a partir dos dados disponíveis no manual informativo do produto (FILMTEC™, 2015). Esse resultado indica que a membrana já apresentava elevado grau de incrustação irreversível devido ao uso anterior do módulo, o que justifica também a obtenção de valores inferiores aos relatados na literatura. Yüksel *et al.* (2013) obtiveram permeabilidade hidráulica de 14,89 L/(h.m².bar) e Nghiem e colaboradores (2007 e 2008) relataram valores para a NF270 de 13,5 L/(h.m².bar). O *fouling* da membrana afetou negativamente o desempenho operacional da membrana que apresentou uma redução do fluxo de permeado entre os experimentos. A Figura 4 apresenta a evolução do fluxo permeado ao longo de cada experimento, bem como a pressão transmembrana.



Legenda:

Jp(T) – Fluxo de permeado à temperatura de permeação

PTM – Pressão transmembrana

Figura 4 – Fluxo de permeado e PTM para os experimentos com a membrana de nanofiltração NF270

Conforme ilustrado na Figura 4, a PTM não apresentou variações notáveis ao longo dos experimentos, e, o valor médio obtido para a pressão transmembrana foi de 7,4bar. No entanto, em todos os experimentos foi verificada uma redução acentuada do fluxo de permeado nas primeiras horas dos experimentos, seguida de uma tendência mais suave de queda. Vogel *et al.* (2010) observaram comportamento semelhante em estudos com a mesma membrana, tratando água com 20mg/L de ácido húmico. Os Autores verificaram um declínio imediato e significativo do fluxo de permeado nas primeiras horas de experimento, em resposta a incrustação orgânica da membrana. Nghiem *et al.* (2008) trabalhando com condições similares (presença de matéria orgânica e a mesma membrana) também observaram que nas primeiras 8 horas de operação o fluxo diminuiu drasticamente, após 18 horas de operação o fluxo de permeado reduziu 69,14%. No presente estudo a queda de fluxo foi inferior, sendo observada uma redução média de 10,6% entre a primeira hora e o instante final dos experimentos (48 horas de operação).

Outra observação importante em relação aos resultados é a redução do fluxo de permeado entre os experimentos. No primeiro experimento, Figura 4(a), o fluxo de permeado ficou entre 10,38 e 9 L/(h.m²) e no último, Figura 4(d), os valores obtidos foram entre 7,61 e 7,15 L/(h.m²) confirmando a ocorrência de incrustação na membrana.

O fluxo médio de permeado obtido foi de 8,7L/(h.m²), operação com pressão de 8 bar, muito inferior ao informado pelo fabricante, que especifica no manual informativo dessa membrana (FILMTEC™, 2015) fluxos entre 41 e 66,7L/(h.m²), para pressões de operação de 4,8bar. Esse resultado foi coerente com os dados de permeabilidade apresentados anteriormente, e como já discutido, o baixo desempenho está relacionado ao fato de que o módulo já havia sido utilizado anteriormente e já apresentava alguma incrustação. Como já era esperado, o fluxo médio de permeado obtido também foi inferior ao relatado por Yüksel *et al.* (2013), 121L/(h.m²) utilizando 10bar e por Mondal e Wickramasinghe (2008), valores entre 40 e 110 L/(h.m²), adotando pressões de 7 bar, trabalhos realizados em escala de bancada.

A Figura 5 apresenta o comportamento da recuperação ao longo dos 4 experimentos com a membrana NF270.

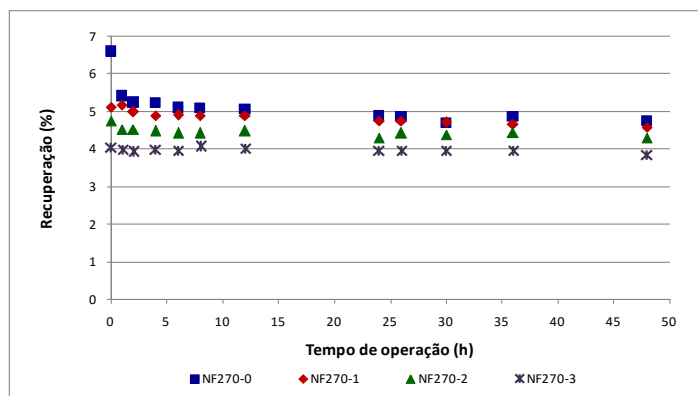


Figura 5 – Recuperação obtida ao longo dos experimentos com a membrana NF270

A recuperação teve um comportamento similar ao fluxo de permeado, como pode ser observado na Figura 5, apresentando uma queda mais acentuada nas primeiras horas do experimento, e uma redução na sequência dos experimentos. A recuperação média do primeiro experimento foi de 5,1% e do último de 4%, enquanto a recuperação média de todos os experimentos foi de 4,6%. Fato que já era esperado, uma vez que a recuperação é obtida pelo quociente entre a vazão de permeado e de alimentação da membrana, esta última mantida aproximadamente constante.

REJEIÇÃO DE BISFENOL-A

As concentrações de BFA na água bruta (AB), concentrado (C) e permeado (P), assim como a rejeição da membrana obtida, são representadas na Figura 6.

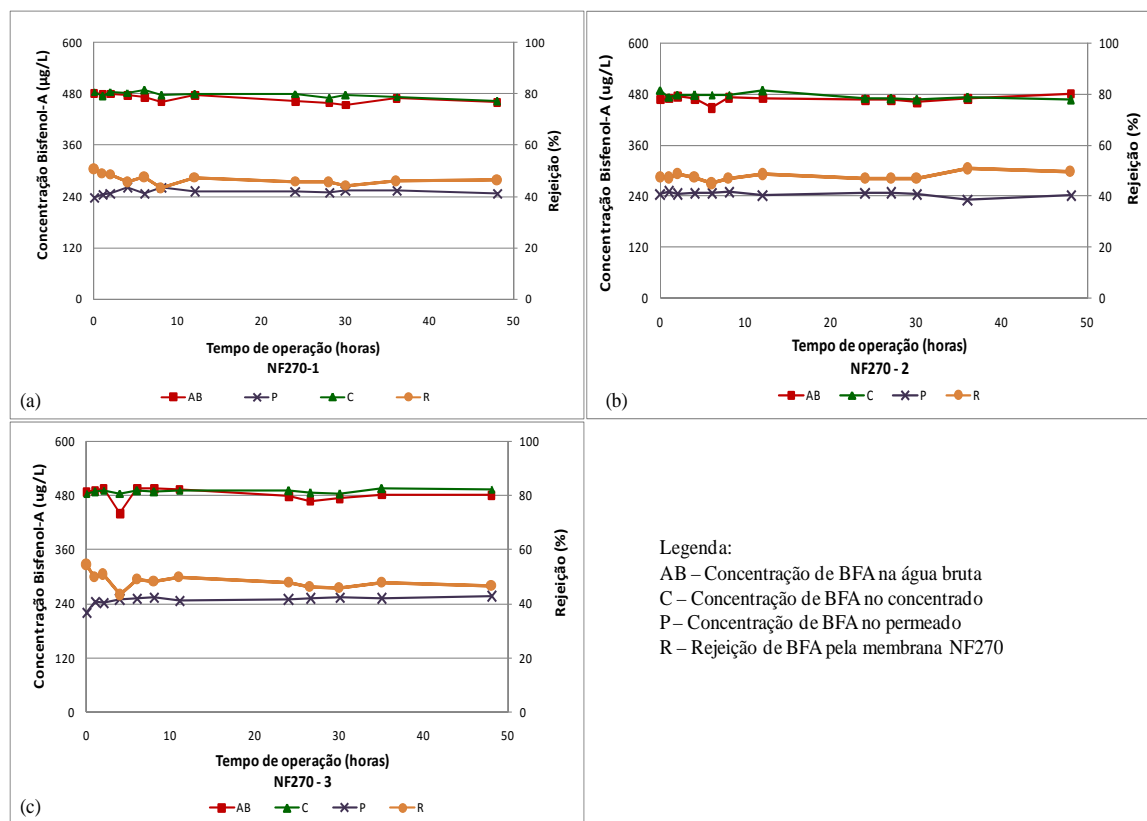


Figura 6 - Rejeição de bisfenol-A pela membrana de nanofiltração NF270

A concentração de BFA na água bruta, concentrado e permeado apresentou pouca variação ao longo dos experimentos. É interessante observar que as concentrações de BFA no concentrado e na água bruta foram muito próximas, isso ocorreu em função do baixo desempenho da membrana em relação à produção de permeado. A rejeição não apresentou grandes variações entre os três experimentos, permanecendo entre 43,2 e 50,7% no primeiro experimento; entre 44,9 e 50,7% no segundo e entre 43,4 e 54,5% no terceiro experimento.

A faixa de valores de rejeição de BFA foi mais estreita do que a observada por Nghiem *et al.* (2008), entre 28 e 55%, e relativamente superior aos resultados de Comerton *et al.* (2008), que obtiveram apenas 4,6 a 35,4 % de rejeição de BFA. Nos três estudos foi utilizada a membrana NF270. Dessa forma, o fato da membrana já ter sido utilizada comprometeu o desempenho operacional, mas não impactou os resultados de rejeição de BFA.

Schleicher (2013), trabalhando com a mesma membrana, obteve valores de rejeição entre 60 e 70%, porém os experimentos foram realizados em escala de bancada e que tiveram a duração de 8 horas. Segundo o Autor o seria necessária a condução de experimentos por maior período de tempo, uma vez que durante as 8 horas avaliadas a concentração de bisfenol-A no permeado não havia estabilizado, e a rejeição apresentava uma tendência decrescente.

REJEIÇÃO DE PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS E MICROBIOLÓGICOS

Para avaliar o desempenho da unidade piloto em termos de rejeição de outros parâmetros físico-químicos e microbiológicos, de origem natural, foram realizadas análises de vários parâmetros na água bruta e permeado nos experimentos NF270-2 e NF270-3. Os resultados das análises e a rejeição para cada experimento/parâmetro estão apresentados na Tabela 4. Além dos parâmetros apresentados na Tabela 4 foram analisados o magnésio, potássio, nitrato, nitrito, amônia e fosfato, porém esses parâmetros apresentaram valores abaixo do limite de quantificação do método utilizado, tanto na água bruta como no permeado.

Tabela 4 – Resultado das análises físico-químicas e microbiológicas realizada para a membrana de nanofiltração NF270

| Parâmetros | NF270-2 | | | NF270-3 | | |
|-------------------------------------|------------|----------|--------------|------------|----------|--------------|
| | Água Bruta | Permeado | Rejeição (%) | Água Bruta | Permeado | Rejeição (%) |
| Coliformes Totais (NMP/100mL) | 6,3 | ND | ≈100 | ND | ND | - |
| <i>Escherichia coli</i> (NMP/100mL) | ND | ND | - | ND | ND | - |
| Clorofila(µg/L) | ND | ND | - | 0,3 | ND | ≈100 |
| Condutividade (µS/cm) | 10 | 3 | 70 | 10 | 3 | 70 |
| Dureza Total (mg/L) | - | - | - | 3,5 | <1,6 | - |
| Fluoreto(mg/L) | 0,1 | <0,1 | - | 0,1 | <0,1 | - |
| Cloreto(mg/L) | 1,1 | 0,4 | 63,6 | 1,0 | 0,3 | 70,0 |
| Cálcio(mg/L) | 1,4 | 0,3 | 78,6 | 1,3 | 0,2 | 84,6 |
| Sódio(mg/L) | 0,4 | 0,3 | 25 | 0,4 | 0,3 | 25 |
| Nitrogênio Total(mg/L) | 0,2 | 0,1 | 50 | 0,1 | 0,1 | 0 |
| Sulfato(mg/L) | 0,16 | <0,1 | - | 0,15 | <0,1 | - |

A membrana NF270 apresentou bons resultados em relação à remoção dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos avaliados, exceto em relação ao sódio. A concentração desse parâmetro no permeado foi em média 25% inferior à sua concentração na água bruta, esse resultado também foi inferior ao obtido na literatura. Shen *et al.* (2015) obtiveram valores de rejeição de sódio em torno de 83%, porém a concentração de sódio na água bruta adotada pelos Autores era de 89,2 mg/L, enquanto, que a concentração dessa substância na água de alimentação utilizada neste trabalho era de apenas 0,4mg/L.

Os íons fluoreto e sulfato não foram detectados no permeado, apesar de terem sido detectados na água bruta, demonstrado que a membrana NF270 apresentou elevados valores de rejeição para essas substâncias. Esses resultados são compatíveis com os relatados na literatura (Mänttari *et al.*, 2004 e Shen *et al.* 2015). Por outro lado, Shen *et al.* (2015) relataram valores de rejeição de cálcio próximos à 99%, superiores aos obtidos neste trabalho que foi, em média, de 82%.

Apesar das análises individuais dos compostos nitrogenados nitrato, nitrito e amônia não terem sido identificados individualmente, foram detectados teores de nitrogênio total, que estão relacionados à presença de nitrogênio orgânico e à soma desses compostos, que podem estar presentes em pequenas quantidades não detectáveis individualmente pelo método analítico.

CONCLUSÕES

A partir dos resultados experimentais obtidos no presente trabalho, foi possível avaliar o desempenho operacional e a eficiência de rejeição do perturbador endócrino bisfenol-A, pela membrana de nanofiltração NF270. Além da quantificação do bisfenol-A foi realizado também um amplo monitoramento de vários parâmetros físico-químicos e microbiológicos, presentes naturalmente na água. Com base nos resultados, concluiu-se que:

A membrana NF270 apresentou eficiência compatível com a literatura em termos de rejeição de BFA e da maioria dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos avaliados, sua utilização prática dependerá da meta de remoção desses compostos. Porém, no caso do BFA a inexistência de uma legislação que estabeleça padrões de potabilidade, para esse contaminante, dificulta o estabelecimento dessa meta.

Os ensaios de permeabilidade hidráulica demonstraram que a restauração e a manutenção das características iniciais da membrana não ocorreram em sua plenitude, mesmo após a limpeza química, demonstrando um processo de incrustação irreversível da membrana.

A membrana NF270, caracterizada como membrana aberta, não apresentou bom desempenho operacional, em função da utilização prévia da membrana, ou seja, o módulo já havia sido utilizado anteriormente e já apresentava alguma incrustação. Porém, a literatura relata valores elevados de fluxo de permeado, entre 40 e 121 L/(h.m²). Dessa forma, a utilização da membrana NF270 no tratamento avançado de água não deve ser desconsiderada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Comerton, A.M.; Andrews, R.C.; Bagley, D.M. e Hao, C. (2008). "The rejection of endocrine disrupting and pharmaceutically active compounds by NF and RO membranes as a function of compound and water matrix properties". *Journal of Membrane Science* 313, 323–335.
2. FILMTEC™ (2015c). "Formulário Nº - 609-00519-1206 Membranes FILMTEC NF270 Nanofiltration Elements for Commercial Systems". Disponível em: <http://www.lenntech.com/products/index.htm>, acesso em 22/02/2015
3. Lintelmann, J.; Katayama, A.; Kurihara, N.; Shore, L. e Wenzel, A. (2003). "Endocrine disruptors in the environment". *Pure and Applied Chemistry* 75, 631–681.
4. Mänttari, M.; Pekuri, T. e Nyström, M. (2004). "NF270, a new membrane having promising characteristics and being suitable for treatment of dilute effluents from the paper industry". *Journal of Membrane Science* 242, 107–116.
5. Markey, C. M.; Rubin, B. S.; Soto, A. M.; Sonnenschein, C. (2003). "Endocrine disruptors: from Wingspread to environmental developmental biology". *Journal of Steroid Biochemistry & Molecular Biology*, v. 83, p. 235-244.
6. Mondal, S. e Wickramasinghe, R. (2008). "Produced water treatment by nanofiltration and reverse osmosis membranes". *Journal of Membrane Science* 322, 162–170.
7. Nghiem, L.D., Vogel, D., Khan, S. (2008). "Characterizing humic acid fouling of nanofiltration membranes using bisphenol A as a molecular indicator". *Water Research*, **42**, 4049–4058.
8. SBEM - Sociedade Brasileira de Endocrinologia e Metabologia (2015). *Bisfenol A*. Disponível em: <<http://www.endocrino.org.br/bisfenol/>> Acesso em 25 de julho de 2015.
9. Schleicher, A.T. (2013). "Remoção de estrona, estradiol, etinilestradiol e bisfenol-A por meio de nanofiltração aplicada ao tratamento avançado de águas para consumo humano". Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 107p.
10. Shen, J.; Mkong, G.; Abbt-Braun, G.; Ceppi, S. L.; Richards, B. S. e Schäfer, A. I. (2015). "Renewable energy powered membrane technology: Fluoride removal in a rural community in northern Tanzania". *Separation and Purification Technology* 149, 349–361.
11. Simões, C. P. P. (2016). "Avaliação operacional e remoção de bisfenol-A no tratamento de água por diferentes tipos de membranas: avaliação em escala piloto". Dissertação de mestrado, Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Brasília, DF, 184p.
12. Staples, C. A.; Dorn, P. B.; Klecka, G. M.; O'Block, S. T.; Harris, L. R. (1998). "A review of the environmental fate, effects, and exposures of bisphenol A". *Chemosphere*, v. 36, p. 2149-2173.
13. Vandenberg, L. N.; Hauser R.; Marcus M.; Olea N.; Welshons W. V. (2007). "Human exposure to bisphenol A (BPA)". *Science Direct Reproductive Toxicology* 24, 139–177.
14. Vogel, D.; Simon, A.; Alturki, A. A.; Bilitewski, B.; Price, W. E. e Nghiem, L. D. (2010). "Effects of fouling and scaling on the retention of trace organic contaminants by a nanofiltration membrane: The role of cake-enhanced concentration polarization". *Separation and Purification Technology* 73, 256–263.
15. Yüksel, S.; Kabay, N. e Yüksel, M. (2013). "Removal of bisphenol A (BPA) from water by various nanofiltration (NF) and reverse osmosis (RO) membranes". *Journal of Hazardous Materials* 263, 307-310.