

I-294 - APLICAÇÃO DE DUAS MEMBRANAS DE NANOFILTRAÇÃO, EM ESCALA PILOTO, COMO PÓS TRATAMENTO PARA ETA CONVENCIONAL COM FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO, AVALIANDO A REMOÇÃO DE BISFENOL-A

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 Celia Silveira Brandão

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.

Yovanka Pérez Ginoris

Engenheira Química, Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos - UFRJ – 2006. Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental - ENC

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) 996541685 - e-mail: claudiasimoes@caesb.df.gov.br

RESUMO

O crescimento desordenado dos grandes centros urbanos, os resíduos gerados nas atividades domésticas e industriais trouxeram, como consequência, o comprometimento da qualidade da água dos mananciais. A disponibilização de água livre de contaminantes tem se tornado um desafio crescente a ser enfrentado pelos órgãos públicos pertinentes, comunidade acadêmica e empresas de saneamento. Em relação à segurança da qualidade da água de consumo humano destaca-se a remoção de microcontaminantes emergentes, que incluem substâncias suspeitas de alterar as funções do sistema endócrino e, conseqüentemente, causar efeitos adversos à saúde de um organismo intacto, sua descendência, ou população, denominadas perturbadores endócrinos. Os processos de separação por membranas (PSM) têm se mostrado uma opção promissora na remoção desse tipo de contaminante. De um modo geral, as membranas de nanofiltração (NF) e osmose inversa (OI) podem ser utilizadas na remoção de substâncias dissolvidas, entre elas o bisfenol-A (BFA), substância perturbadora do sistema endócrino. O presente trabalho avaliou a aplicação de duas membranas de nanofiltração, em escala piloto, como pós-tratamento para ETA convencional com flotação por ar dissolvido, avaliando a remoção de BFA, de outros contaminantes físico-químicos e microbiológicos naturalmente presentes na água de alimentação e o desempenho operacional. As membranas estudadas foram a NF270 e NF90, ambas fabricadas em poliamida sobre um suporte de polissulfona. Sendo a membrana NF90 caracterizada como mais fechada, com massa molecular de corte (MWCO) de 200Da, enquanto a MWCO da membrana NF270 está entre 200 e 300Da, portanto mais aberta. O ângulo de contato indica que a membrana NF90 é mais hidrofóbica (ângulo de contato entre 42,2 e 63,2°) do que a membrana NF270 (ângulo de contato entre 23,4 e 32°). A rejeição de bisfenol-A a rejeição de BFA obtida pela membrana NF90 foi praticamente 100%, enquanto, a membrana NF270 apresentou rejeição entre 43 e 54%. Já em relação ao desempenho operacional a NF90 apresentou melhor resultado, com fluxo de permeado (J_p) médio de 39,4L/(h.m²) e recuperação média de 22%. Enquanto a membrana NF270 apresentou J_p médio de 8,7L/(h.m²) e recuperação média de cerca de 5%, resultado inesperado que precisa ser investigado.

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

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A escassez de recursos naturais, somado ao crescimento desordenado dos centros urbanos faz do meio ambiente um tema indiscutivelmente urgente e estratégico, entre os campos da área ambiental um dos mais proeminentes é a qualidade da água, em especial a presença de microcontaminantes, que estão presentes no meio ambiente na ordem de µg/L ou ng/L, porém são capazes de produzir efeitos adversos aos organismos expostos, mesmos nessas baixas concentrações. Entre os microcontaminantes destacam-se os perturbadores endócrinos, que são substâncias suspeitas de alterar as funções do sistema endócrino e, conseqüentemente,

causar efeitos adversos à saúde de um organismo intacto, sua descendência, ou população (Comissão Européia, 2007).

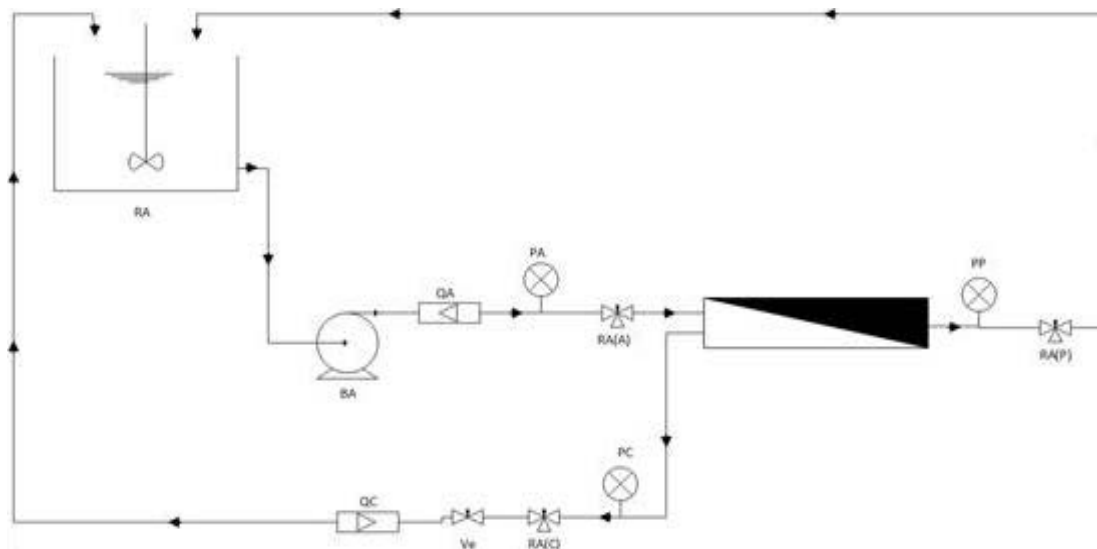
O bisfenol-A (BFA) é uma das substâncias perturbadoras do sistema endócrino de grande prevalência em águas superficiais e subterrâneas. Isto porque o bisfenol-A é um monômero amplamente usado na produção de policarbonatos plásticos, que estão presentes no cotidiano da população sob diferentes formas, 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).

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 e de vários parâmetros físico-químicos e microbiológicos por dois tipos de membranas de nanofiltração (NF), uma caracterizada como aberta, NF270, e outra como fechada, NF90, sendo realizada também uma avaliação operacional e qualitativa, visando uma possível aplicação ao tratamento de água para o consumo humano na realidade brasileira.

METODOLOGIA

Os experimentos foram conduzidos em instalação piloto alimentada com o efluente dos filtros de uma Estação de Tratamento de Água (ETA), em escala real, com tratamento convencional com flotação por ar dissolvido. A Figura 1 apresenta o fluxograma da instalação piloto.



Legenda:

RA: Reservatório de alimentação;	PP: Manômetro do permeado;	RA(C): Registro de amostragem de concentrado
BA: Bomba de alimentação;	PC: Manômetro do concentrado;	RA(A): Registro de amostragem da alimentação;
QA: Rotâmetro de alimentação;	Ve: Válvula de esfera;	RA(P): Registro de amostragem de permeado
PA: Manômetro da alimentação;	QC: Rotâmetro do concentrado	

Figura 1 – Fluxograma da instalação piloto de nanofiltração

Os experimentos foram realizados utilizando módulos das membranas de nanofiltração NF270 e NF90, ambas com as seguintes características: módulo com 2,5in de diâmetro e 40in de comprimento; área efetiva de 2,6m²; membrana enrolada em espiral; com fluxo tangencial e operada com pressão de alimentação de 8bar. A Tabela 1 mostra as características das membranas.

Tabela 1 – Principais características das membranas NF270, NF 90

Característica	NF270	NF90
Material	Poliamida sobre suporte de polissulfona ^(e)	Poliamida sobre suporte de polissulfona ^(j)
Tipo	Semi-aromática ^{(f); (g)}	Aromática ^{(f); (g)}
Massa molecular de corte (Da)	200-300 ^(f)	200 ^{(b); (j)}
Ângulo de contato	32° ^{(d); (g)} ; 23,4° ^(g)	42,2° ^(g) ; 63,2° ^(l) ; 54,6° ^(h)
Rejeição de NaCl	40% ^{(a); (d);(i)} ; 80% ^(h)	85% ^{(g); (i)} ; 90 a 96% ^(h) ; 95% ^(a)
Rejeição de CaCl ₂	43% ^(g) ; 50% ^(h)	95% ^(g)
Rejeição de COT	88,9% ^(g)	92,7% ^(g)
Permeabilidade em água pura (L/(h.m ² .bar)	13,5 ^{(c); (d); (h)} ; 17,0 ^(b)	6,4 ^{(g);(i)}
Pressão máxima de operação (bar)	41 ^(e)	41 ⁽ⁱ⁾
Temperatura máxima (°C)	45 ^(f)	45 ^(f)
Faixa de pH	3-10 ^(f)	3-10 ^(f)
Rugosidade	8,5 ^(g)	76,8 ^(g) ; 63,9 ^{(l); (a)}
Diâmetro médio dos poros (nm)	0,84 ^{(c); (d); (i)}	0,68 ^{(g); (i)}

Fonte: Arsuaga, *et al.* (2008) ^(a); Semião e Schäfer (2011) ^(b); Nghiem *et al.* (2010) ^(c); Vogel *et al.* (2010) ^(d); FILMTEC™ (2015c) ^(e); Yüksel *et al.* (2013) ^(f); Nghiem *et al.* (2008) ^(g); Mondal e Wickramasinghe (2008) ^(h); Nghiem e Hawkes (2007) ⁽ⁱ⁾; FILMTEC™ (2015b) ^(j); Xu *et al.* (2006) ^(l)

Para realização dos experimentos o reservatório de alimentação era completado com água efluente dos filtros da ETA, em escala real, sendo adicionado a esta água o BFA para se obter uma concentração de 500µg de BFA/L. Essa mistura era homogeneizada e iniciada a operação, o concentrado e o permeado retornavam para o reservatório de alimentação, a fim de se obter uma concentração aproximadamente constante da solução de alimentação, estratégia também utilizada na literatura (Arsuaga *et al.*, 2008 e Nghiem *et al.*, 2010).

Inicialmente, para cada uma das membranas, foi realizado um experimento sem a adição do bisfenol-A, com objetivo de avaliar possíveis interferências do contaminante no desempenho das membranas, esses experimentos foram denominados de NF270-0 e NF90-0, o índice zero posicionado após o tipo de membrana indica os experimentos sem a adição de bisfenol-A. Os experimentos para avaliação das membranas foram realizados em triplicata para a membrana NF270 e em quadruplicada para a membrana NF90, todos os experimentos tiveram duração de 48 horas. A técnica de quantificação do BFA foi à cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE) com detector de UV-fotodiodo, e a rotina analítica foi a mesma utilizada por Schleicher (2013). 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).

Foram realizados também ensaios de permeabilidade hidráulica da membrana e limpeza química para avaliação do *fouling* da membrana, esses procedimentos ocorreram no início e no fim do conjunto de experimentos, no caso da membrana NF270, enquanto para a membrana NF90 foram realizados antes e depois de cada experimento, permitindo assim uma avaliação mais detalhada do efeito do *fouling* e a eficiência da limpeza química na permeabilidade hidráulica. Para a realização das limpezas 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 era realizado o registro das vazões de permeado e de concentrado, da temperatura e da pressão da água bruta, do concentrado e do permeado. Os resultados do fluxo de permeado foram normalizados para a

temperatura de 25°C, permitindo assim a comparação de fluxos gerados em todos os ensaios de permeabilidade. A normalização foi realizada por meio de um fator de correção, calculado a partir de uma constante específica da membrana utilizada. Para isso foram utilizadas equações propostas pelo fabricante, que propõe uma equação para temperaturas maiores que 25°C e outra para temperaturas menores que 25°C (FILMTEC™, 2015a), a revisão bibliográfica sobre o assunto e as equações utilizadas na normalização dos dados estão disponíveis em Simões (2016).

Em dois experimentos com a membrana NF270 e em todos os experimentos com a NF90 foram monitorados ainda diferentes parâmetros físico-químicos e bacteriológicos, de origem natural, a saber: cálcio, cloreto, dureza total, fluoreto, fosfato dissolvido, magnésio, potássio, serie nitrogenada (nitrogênio total, nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato), sódio, sulfato, clorofila, coliformes totais e *Escherichia coli*. A Tabela 2 apresenta os instrumentos e métodos adotados nas análises realizadas.

Tabela 2 – Parâmetros físico-químicos e bacteriológicos monitorados, métodos e instrumentos utilizados

Análise	Instrumento	Método
Bisfenol-A	Sistema de CLAE Shimadzu	Cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE)
Turbidez	Hach, 2100 N	Nefelométrico (2130.B, SM-22*)
	Hach 2100Q	
Temperatura	Termômetro de mercúrio	Visual
Nitrogênio Total	Analizador de Carbono e Nitrogênio marca Analytik Jena, modelo Multi N-C 2100 S	Combustão em alta temperatura (5310.B, SM-22*)
Clorofila a	Espectrofotômetro UV/Vis marca Perkin Elmer, modelo Lambda 25	Espectrofotométrico com extração por acetona 90% - Monocromático (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 (9223.B, SM-22*)
Cálcio	Cromatógrafo Iônico marca Metrohm modelo 850 Professional IC	Cromatografia iônica (4110, SM-22*)
Cloreto		
Dureza Total		
Fluoreto		
Fosfato		
Magnésio		
Nitrato		
Nitrito		
Amônia		
Potássio		
Sódio		
Sulfato		

*SM-22: Standard Methods, 22ª Edição (APHA, AWWA, WEF, 2012)

RESULTADOS OBTIDOS

Para análise do desempenho operacional das membranas estudadas foram avaliados os parâmetros fluxo de permeado (J_p), pressão transmembrana (PTM) e recuperação. A Figura 2 ilustra o resultado do comportamento do fluxo de permeado para todas as repetições e a pressão transmembrana (PTM) média, que apresentou pequena variação entre os experimentos de cada membrana estudada, os dados completos de todos os experimentos estão disponíveis em Simões (2016). Todos os experimentos com a membrana NF270 apresentaram uma redução de fluxo de permeado mais acentuada nas primeiras horas, seguida de uma queda mais suave, enquanto a NF90 apresentou um comportamento mais estável com suave tendência crescente nas primeiras horas de operação.

O valor da pressão transmembrana tanto nos experimentos com a NF270 como com a NF90, foram similares e próximos ao valor da pressão de alimentação, o que sugere que o nível de incrustação durante os experimentos foi baixo, o que é corroborado pela pequena alteração do fluxo ao longo das 48 horas.

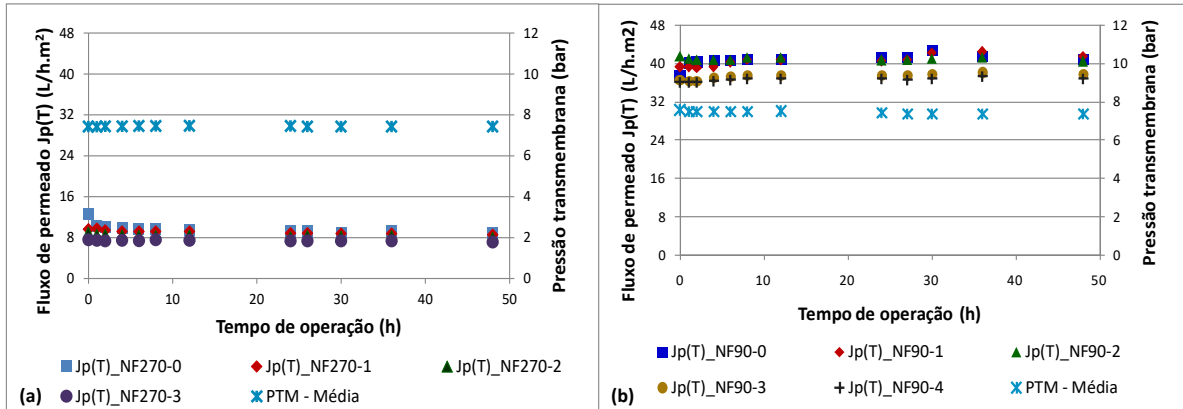


Figura 2 – Fluxo de permeado e pressão transmembrana (PTM) média obtidas nos experimentos com as membranas NF270 (a) e NF90 (b)

O fluxo médio de permeado obtido para a membrana NF270 foi de 8,7 L/(h.m²), muito inferior ao informado pelo fabricante, que especifica no manual informativo dessa membrana (FILMTEC™, 2015c) fluxos entre 41 e 66,7L/(h.m²), e também inferiores aos relatados na literatura, como no caso de Mondal e Wickramasinghe (2008) que obtiveram valores entre 40 e 110 L/(h.m²). Esse baixo valor de fluxo indica que a membrana já apresentava elevado grau de incrustação irreversível devido ao uso anterior do módulo. Foi observado também uma redução do fluxo de permeado entre os experimentos, no primeiro experimento (NF270-0), sem BFA, o fluxo de permeado ficou entre 10,38 e 9 L/(h.m²) e no último (NF270-3) os valores obtidos foram entre 7,61 e 7,15 L/(h.m²), confirmando a ocorrência de incrustação na membrana.

No entanto, no caso da membrana NF90 o fluxo médio de permeado foi de 39,4 L/(h.m²), coerente com a faixa de valores de 33,4 a 54,2 L/(h.m²) informada pelo fornecedor (FILMTEC™, 2015b) e superior ao obtido por Mondal e Wickramasinghe (2008), que relatam valores entre 8 e 20 L/(h.m²). Não foi observada redução significativa do fluxo de permeado entre os experimentos. No primeiro experimento (NF90-0) o fluxo de permeado variou entre 37,62 e 42,69L/(h.m²) e no último (NF90-4) os valores obtidos foram entre 36,23 e 37,38L/(h.m²).

Para quantificar a incrustação da membrana NF270 resultante dos experimentos, ensaios de permeabilidade hidráulica, precedidos de limpeza química, foram realizados antes e depois do conjunto de experimentos. Com relação à membrana NF90, os ensaios de permeabilidade foram realizados antes e depois de cada experimento, e depois de cada experimento, também precedido da a limpeza química da membrana. Esse procedimento permitiu avaliar de forma mais precisa o *fouling* da membrana e a eficiência das limpezas. A Figura 3 apresenta as curvas obtidas para correlação entre a PTM e o fluxo de permeado normalizado a 25°C, sendo que o coeficiente angular da reta representa o valor de permeabilidade hidráulica que está explicitada na Tabela 3.

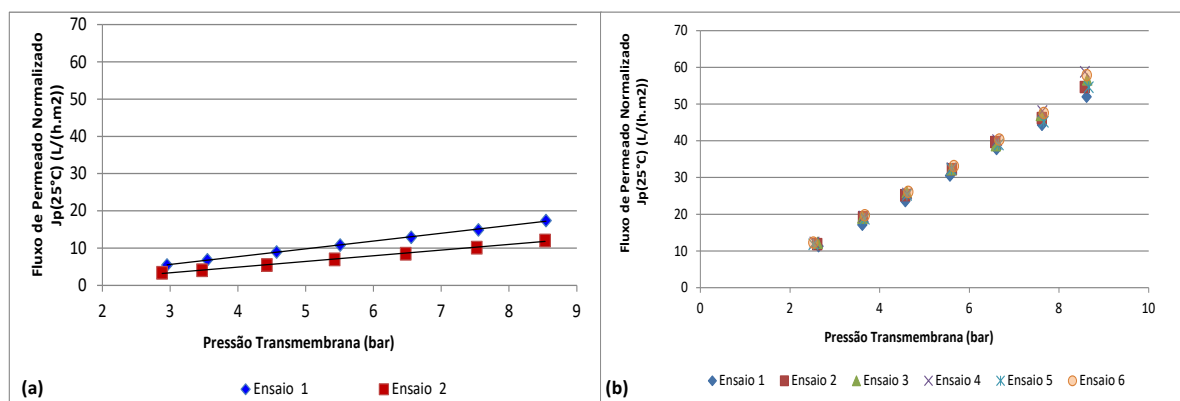


Figura 3 – Relação entre a pressão transmembrana e o fluxo de permeado normalizado a 25°C para as membranas NF270 (a) e NF90 (b)

Tabela 3 – Coeficiente de correlação linear e a permeabilidade hidráulica para os ensaios com as membranas NF270 e NF90

Ensaio de permeabilidade	Membrana NF270		Membrana NF90	
	Coeficiente de determinação (R^2)	Permeabilidade hidráulica ($L/h.m^2.bar$)	Coeficiente de determinação (R^2)	Permeabilidade hidráulica ($L/h.m^2.bar$)
Ensaio 1	0,999	2,092	0,999	6,81
Ensaio 2	0,997	1,525	0,998	7,06
Ensaio 3	*	*	0,995	7,22
Ensaio 4	*	*	0,991	7,53
Ensaio 5	*	*	0,997	6,85
Ensaio 6	*	*	0,993	7,29

Os resultados apresentados na Figura 3 (a) e Tabela 3 demonstram que no caso da NF270 houve redução da permeabilidade hidráulica da membrana após a realização de todos os experimentos realizados, evidenciando que a restauração e a manutenção das características iniciais da membrana não ocorreram em sua plenitude, mesmo após a limpeza química, demonstrando que houve um processo de incrustação (*fouling*) irreversível da membrana. Enquanto, os valores de permeabilidade obtidos para a membrana NF90 foram próximos para todos os ensaios. Assim, pode-se concluir que, nesse caso, as limpezas foram eficientes e houve a restauração e manutenção das características originais da membrana, confirmando que a incrustação ocorrida durante cada experimento não era de natureza irreversível. Fazendo um paralelo entre os resultados obtidos para a NF90 e a NF270, é possível verificar a importância da realização da limpeza química no momento adequado.

A Figura 4 ilustra o comportamento da recuperação para todos os experimentos realizados com cada membrana. As recuperações observadas corroboram os resultados de fluxo de permeado, apresentando, no caso da NF270, queda mais acentuada nas primeiras horas dos experimentos e redução na sequência, enquanto a membrana NF90 se manteve relativamente estável ao longo de cada experimento, sendo observado aumento suave após primeiras horas. Os dados completos dos experimentos estão disponíveis em Simões (2016).

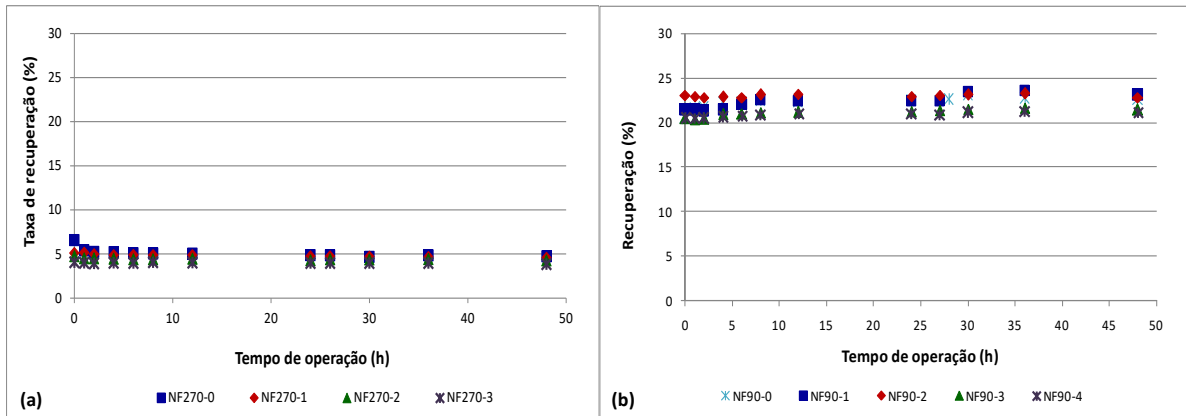


Figura 4 – Recuperação obtida para todos os experimentos com a membrana NF270 e NF90

Para avaliação da rejeição do perturbador endócrino BFA, esse composto foi adicionado ao efluente dos filtros de uma ETA convencional com flotação por ar dissolvido, em escala real. As concentrações de bisfenol-A na água bruta (AB), concentrado (C) e permeado (P), assim como a rejeição de bisfenol-A obtida pela membrana o NF270 são representadas na Figura 5.

A concentração de BFA, em cada ponto de coleta, apresentou pouca variação ao longo e entre os experimentos realizados com a NF-270. Consequentemente, a rejeição também não apresentou variações significativas 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.

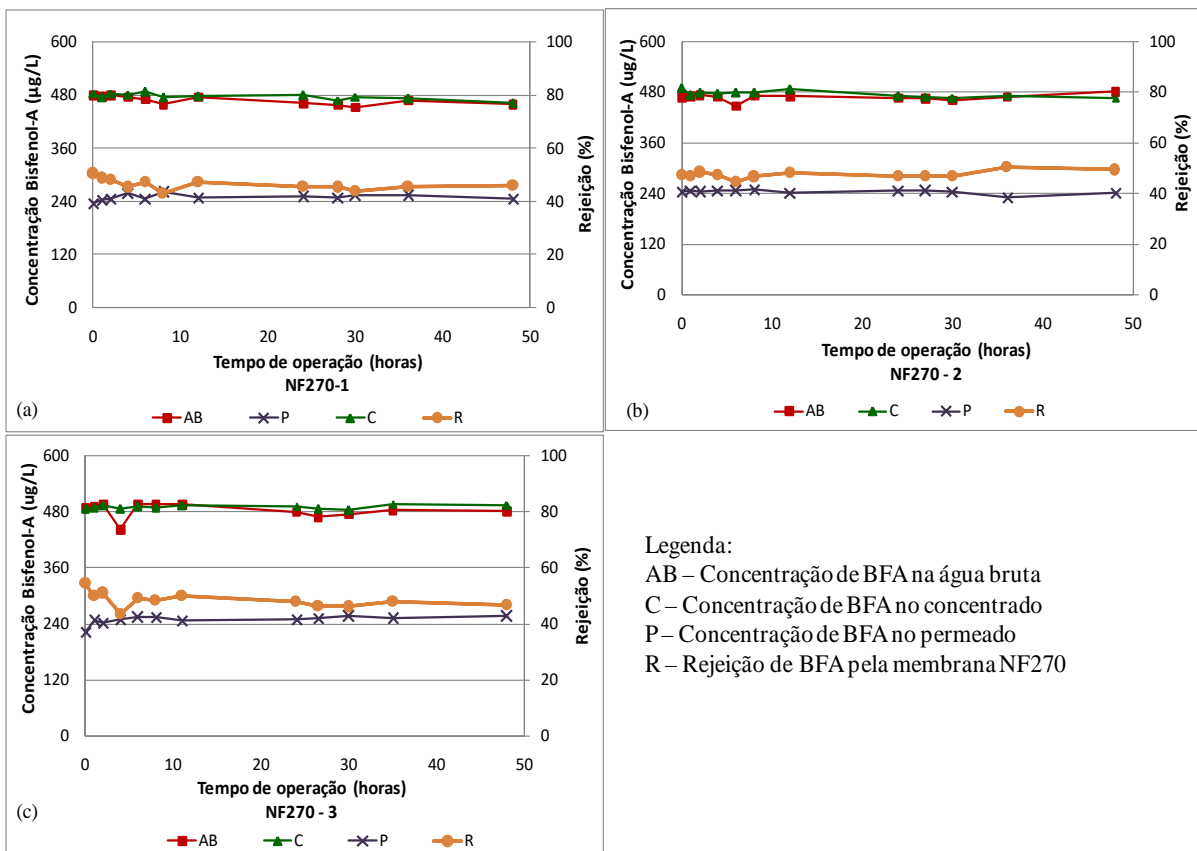
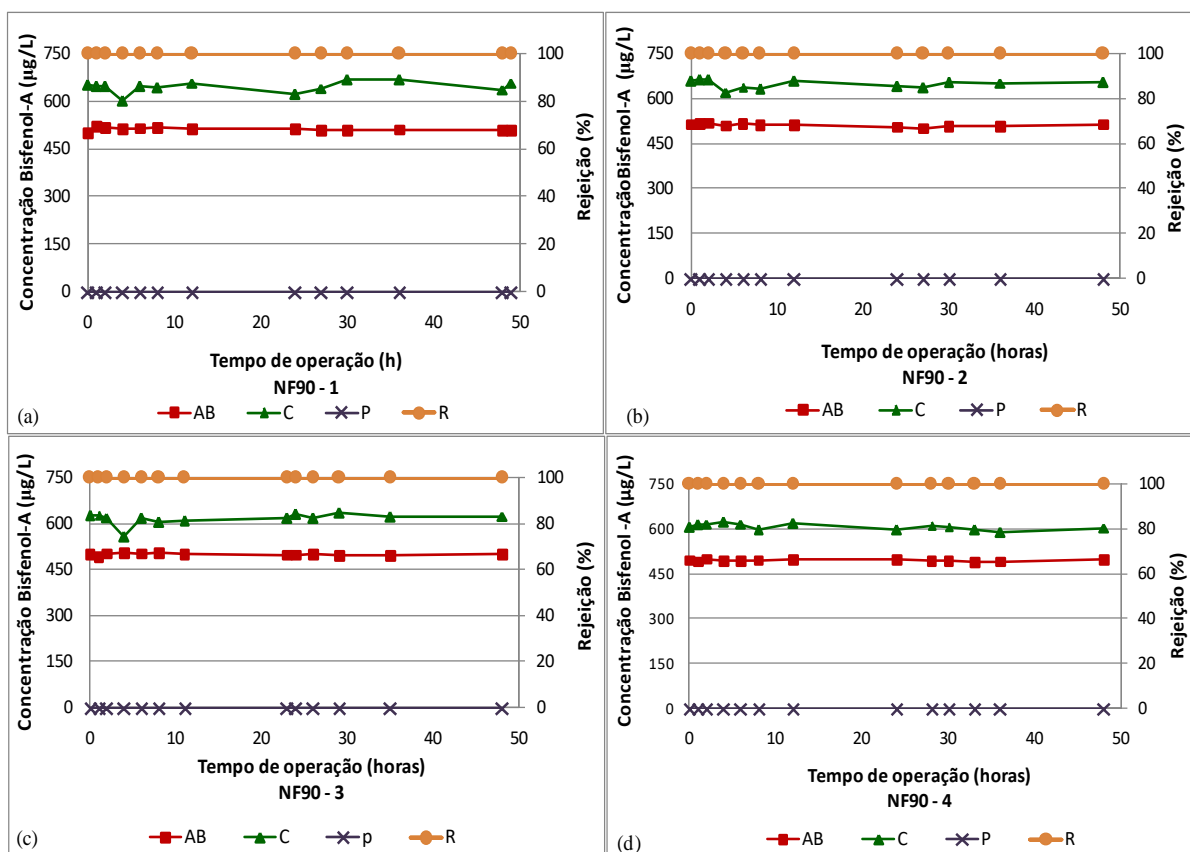


Figura 5 – Concentrações de BFA na água bruta, concentrado e permeado e rejeição de bisfenol-A pela membrana de nanofiltração NF270

A faixa de valores de rejeição de BFA obtidas no presente trabalho (43,2 a 54,5%) foi mais estreita do que a relatada por Nghiem *et al.* (2008), entre 28 e 55%, e relativamente superior aos resultados obtidos por Comerton *et al.* (2008), que obtiveram apenas 4,6 a 35,4 % de rejeição de BFA. Nos três estudos foi utilizada a membrana NF270.

A Figura 6 apresenta as concentrações de bisfenol-A na água bruta (AB), concentrado (C) e permeado (P), assim como a rejeição de bisfenol-A obtida pela membrana o NF90. As concentrações de bisfenol-A na água bruta e no concentrado apresentaram pouca variação durante os experimentos, e a concentração de BFA no concentrado foi superior à da água bruta, esse comportamento está relacionado à maior eficiência da membrana com relação à produção de permeado (maior recuperação) e demonstra consistência dos experimentos e do método analítico utilizado.

A membrana NF 90 apresentou praticamente 100% de rejeição de BFA. Utilizando a mesma membrana Yüksel *et al.* (2013) também relatam valores elevados de rejeição, em média 98%, assim como Nghiem *et al.* (2008), que obtiveram valores entre 95 e 99%. Segundo Nghiem *et al.* (2008) a rugosidade da superfície da NF90 é muito elevada e comparável às membranas de osmose inversa, apresentando portanto resultados semelhantes. O mecanismo de peneiramento também foi determinante na rejeição de BFA, uma vez que a molécula de BFA (massa molecular de 228Da) apresenta valor superior a massa molecular de corte (MWCO) da membrana NF90, que é de 200Da (Semião e Schäfer, 2011 e FILMTEC, 2015b).



Legenda:

AB – Concentração de BFA na água bruta
C – Concentração de BFA no concentrado
P – Concentração de BFA no permeado
R – Rejeição de BFA pela membrana NF90

Figura 6 – Concentrações de BFA na água bruta, concentrado e permeado e rejeição de bisfenol-A pela membrana de nanofiltração NF90

A Tabela 4 apresenta a rejeição média de alguns parâmetros físico-químicos e bacteriológicos analisados para as membranas estudadas. Os parâmetros fosfato dissolvido, magnésio, potássio, nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrito e *Escherichia coli* não foram detectados na água bruta. A rejeição da maioria dos parâmetros físico-

químicos e bacteriológicos foi compatível com a literatura. É importante destacar que a água utilizada como matriz, efluente dos filtros, não havia passado por nenhum processo de desinfecção.

Tabela 4 – Rejeição média dos parâmetros físico-químicos e bacteriológicos obtida para as membranas estudadas

Parâmetros	NF270 (%)	NF90 (%)
Coliformes Totais (NMP/100mL)	100	100
Clorofila(µg/L)	≈100	≈100
Dureza Total (mg/L)	≈100	≈100
Fluoreto(mg/L)	≈100	≈100
Cloreto(mg/L)	70	77,4
Cálcio(mg/L)	84,6	95,7
Sódio(mg/L)	25	≈100
Sulfato	-	32,3
Nitrogênio Total(mg/L)	0	41,5

As membranas de nanofiltração estudadas apresentaram bons resultados em relação à remoção da maioria dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos avaliados, aproximadamente 100%. Para os íons cloreto, cálcio, sódio e nitrogênio total a membrana NF90 apresentou melhor desempenho quando comparada à NF270, o que já era esperado uma vez que a NF90 apresenta uma estrutura mais fechada.

A remoção de sódio pela NF270 foi inferior ao relatado na literatura por Shen *et al.* (2015), que alcançaram 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. A membrana NF90 apresentou excelente desempenho na rejeição dos íons avaliados, exceto para o sulfato em que a remoção foi de 32,5%, inferior ao obtido na literatura por Richards *et al.* (2011) que observaram rejeições médias 99,5% para esse contaminante. Entretanto em relação ao sódio e cloreto esses Autores obtiveram remoção de 85,5 e 92,5%, respectivamente, valores próximos ao obtido neste trabalho.

CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

A partir da operação em regime contínuo do sistema de nanofiltração, por 48 horas de operação, em escala piloto, foi possível avaliar o comportamento de duas membranas de nanofiltração em termos operacionais, qualitativos e em relação à rejeição de vários parâmetros físico-químicos e bacteriológicos, naturalmente presentes na água de alimentação, e à rejeição de bisfenol-A. Como principais conclusões do estudo, tem-se:

- Nas condições em que foi realizado o trabalho, a membrana NF90 apresentou melhor desempenho operacional com fluxo de permeado 4,6 vezes superior ao fluxo da membrana NF270. Os índices de recuperação da NF90 também foram superiores, com valor médio de 21,9%, enquanto a recuperação média da NF270 foi de 4,6%. O desempenho inferior da NF270 em relação aos parâmetros operacionais não era esperado, já que ela é caracterizada como uma membrana aberta, porém esses resultados estão associados à condição inicial da membrana, que já havia sido utilizada no tratamento de outro tipo de água.

- Os bons resultados operacionais apresentados pela NF90 indicam compatibilidade do tratamento convencional com a utilização de membranas de NF no tratamento avançado de água de consumo humano, desde que a qualidade da água produzida pelo tratamento convencional não apresente variações significativas.

- A rejeição de BFA obtida com a utilização de membranas de nanofiltração foi semelhante à relatada na literatura, embora, a inexistência de uma legislação que estabeleça padrões de potabilidade para o bisfenol-A restrinja a avaliação quanto às metas de remoção de BFA a serem alcançadas. A rejeição de BFA pela NF90 (mais fechadas) foi praticamente 100%, enquanto, a membrana NF270 (mais aberta) apresentou valores de rejeição entre 43 e 55%, que pode ser considerado satisfatório quando comparado com resultados da literatura.

- As duas membranas de nanofiltração estudadas apresentaram bons resultados em relação à remoção da maioria dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos avaliados. Assim como no caso do BFA a membrana NF90 apresentou melhor desempenho quando comparada à NF270, o que já era esperado uma vez que a NF90 apresenta uma estrutura mais fechada.

Para corroborar os resultados obtidos, sugere-se:

- Realizar experimentos com membrana de nanofiltração NF270 nova, reavaliando principalmente os aspectos operacionais;
- Investigar a influência da qualidade da água, particularmente a MON, e das características da membrana no comportamento do fluxo nos instantes iniciais de operação;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ARSUAGA, J. M.; LÓPEZ-MUÑOZ, M. J.; AGUADO, J. e SOTTO, A. (2008). “Temperature, pH and concentration effects on retention and transport of organic pollutants across thin-film composite nanofiltration membranes”. *Desalination* 221, 253–258.
2. 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.
3. Comissão Européia (2007). “Community strategy for endocrine disrupter – a range of substances suspected of interfering with hormone systems of humans and wildlife” *SEC (2007)1635*.
4. FILMTEC™ (2015a). —Formulário N° - 609-00071-1009, Technical Manual, Filmtec™. Reverse Osmosis Membranes. Disponível em: <http://www.lenntech.com/products/index.htm>, acesso em 22/02/2015.
5. FILMTEC™ (2015b). “Formulário N°-609-00378-1206 Membranes FILMTEC NF90 Nanofiltration Elements for Commercial Systems”. Disponível em: <http://www.lenntech.com/products/index.htm>, acesso em 22/02/2015.
6. FILMTEC™ (2015c). “Formulário N°-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.
7. MARKEY, C. M.; RUBIN, B. S.; SOTO, A. M.; SONNENSCHNEIN, C (2003). “Endocrine disruptors: from Wingspread to environmental developmental biology”. *Journal of Steroid Biochemistry & Molecular Biology*, v. 83, p. 235-244.
8. MONDAL, S. E WICKRAMASINGHE, R. (2008). “Produced water treatment by nanofiltration and reverse osmosis membranes”. *Journal of Membrane Science* 322,162–170.
9. NGHIEM, L. D. e Hawkes, S. (2007). “Effects of membrane *fouling* on the nanofiltration of pharmaceutically active compounds (PhACs): Mechanisms and role of membrane pore size”. *Separation and Purification Technology* 57, 176–184.
10. 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.
11. NGHIEM, L.D., COLEMAN, P.J., ESPENDILLER, C. (2010). “Mechanisms underlying the effects of membrane *fouling* on the nanofiltration trace organic contaminants”. *Desalination*, 250, 682-687.
12. OLIVEIRA, T. F. (2010). “Tratamento de água para abastecimento público por sistema de separação por membrana de ultrafiltração: Estudo de caso na ETA Alto da Boa Vista (São Paulo, SP)”. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, São Paulo, SP 95p.
13. RICCI, B. C. (2015). “Avaliação do uso de processos de separação por membranas na remoção de metais, recuperação de ácido sulfúrico e geração de água de reuso a partir de efluente de indústria de mineração de ouro. Dissertação de mestrado, UFMG, Belo Horizonte, MG, 121p.
14. RICHARDS, L. A.; Richards, B. e Schäfer, A. I. (2011). “Renewable energy powered membrane technology: Salt and inorganic contaminant removal by nanofiltration/reverse osmosis”. *Journal of Membrane Science* 369, 188–195.
15. 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.
16. 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, UnB, Brasília, DF, 107p.
17. SEMIÃO, A. J. C E SCHÄFER, A. I. (2011). “Estrogenic micropollutant adsorption dynamics onto nanofiltration membranes”. *Journal of Membrane Science*, 381, 132-141.
18. 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.

19. 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 mestrado, UnB, Brasília, DF, 183p. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/20900>
20. 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.
21. VANDENBERG, L. N.; HAUSER R.; MARCUS M.; OLEA N.; WELSHONS W. V. (2007). “Human exposure to bisphenol A (BPA)”. *Science Direct Reproductive Toxicology* 24,p. 139–177.
22. 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.
23. YÜKSEL, S.; KABAY, N. E YÜK SEL, M. (2013). “Removal of bisphenol A (BPA) from water by various nanofiltration (NF) and reverse osmosis (RO) membranes”. *Jornal of Hazardous Materials* 263, 307-310.
24. XU, P.; Drewes, J. E.; Kim, T.; Bellona, C. e Amy, G. (2006). “Effect of membrane fouling on transport of organic contaminants in NF/RO membrane applications”. *Journal of Membrane Science* 279, 165–175