

## I-380 – REMOÇÃO DE CILINDROSPERMOPSINA POR MEIO DE NANOFILTRAÇÃO: ESTUDO PROSPECTIVO EM ESCALA PILOTO

**Giovanna Viana Gerin<sup>(1)</sup>**

Estudante de Engenharia Ambiental na Universidade de Brasília, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

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

Professora Associada do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade de Brasília

**Andriane de Melo Rodrigues<sup>(3)</sup>**

Engenheira Ambiental, Mestre em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos pela Universidade de Brasília

**Endereço<sup>(1)</sup>:** QSC 19 Chác 25 Conj A Cs 07 – Taguatinga Sul - DF - CEP: 72016-190 - Brasil - Tel: (61) 99201-0915 - e-mail: giovannagerin@gmail.com

### RESUMO

O aumento das florações de cianobactérias, além de configurar-se como um problema ambiental, é também um problema sanitário, posto que as toxinas produzidas por estes micro-organismos podem acarretar prejuízos à saúde da população. A cilindrospermopsina (CYN) é uma cianotoxina de alto risco ao organismo humano e, por este motivo, o valor máximo recomendado pelo Ministério da Saúde em águas para consumo humano é de  $1\mu\text{g L}^{-1}$ . O tratamento convencional não é eficiente na remoção das cianotoxinas e a nanofiltração é uma proposta promissora para sua remoção. O presente trabalho avalia o desempenho da nanofiltração na remoção de cilindrospermopsinas utilizando duas membranas distintas: NF90 e NF270. Para tal avaliação, foi utilizada uma instalação piloto de nanofiltração que era alimentada com o efluente dos filtros da Estação de Tratamento de Água de Brasília enriquecido com  $20\mu\text{g L}^{-1}$  de CYN. Os experimentos com ambas as membranas foram conduzidos à pressão de operação de 8 bar. Para a membrana NF90, o experimento contou com duração de 8 horas, enquanto a membrana NF270 foi submetida a dois diferentes tempos de operação: 8 horas e 48 horas. Ao longo do tempo de operação, em intervalos definidos, foram coletadas amostradas no permeado, concentrado e água bruta para quantificação de CYN, além dos parâmetros de qualidade da água, pH, condutividade, turbidez e absorbância a 254nm. Nos mesmos intervalos, eram registrados os parâmetros operacionais (pressão, vazão e temperatura). Dentre as membranas estudadas, a NF270 apresentou melhor desempenho operacional: para o tempo de operação de 48 horas, obteve-se fluxo médio de permeado normatizado para 25°C de  $75,3\text{ L h}^{-1}\text{m}^{-2}$  e recuperação média de 49,5%, enquanto o desempenho desta mesma membrana com tempo de operação de 8 horas permitiu observar valor de fluxo médio de permeado, normatizado para 25°C, de  $52,7\text{ L h}^{-1}\text{m}^{-2}$  e recuperação média de 41,6%. A membrana NF90, cujo tempo de operação foi de 8 horas, apresentou fluxo médio de permeado, a 25°C, de  $32,4\text{ L h}^{-1}\text{m}^{-2}$  e recuperação média de 24,4%. A rejeição média de cilindrospermopsina (CYN) pela membrana NF270 foi de 98%, enquanto a membrana NF90 apresentou rejeição de praticamente 100%. A remoção de matéria orgânica natural por ambas as membranas foi total. A maior concentração de cilindrospermopsina no permeado foi  $0,62\mu\text{g L}^{-1}$ , valor que está abaixo do limite estabelecido pelo Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde.

**PALAVRAS-CHAVE:** Nanofiltração, Cianotoxinas, Cilindrospermopsina, Tratamento de água.

### INTRODUÇÃO E OBJETIVO

Cianobactérias são um grupo de micro-organismos procarióticos e autotróficos que possuem pigmentos fotossintéticos, que geram compostos que conferem sabor e odor à água e podem, ou não, gerar metabólitos tóxicos – cianotoxinas (Poniedzialek et al., 2012). As cianotoxinas mais comumente produzidas são as microcistinas, saxitoxinas, anatoxinas e cilindrospermopsinas (Walker, 2015). A cilindrospermopsina (CYN) é uma cianotoxina que originalmente foi identificada na cianobactéria *Cylindrospermopsis raciborskii*.

Até o momento, os efeitos conhecidos da CYN incluem hepatotoxicidade, genotoxicidade, dermatotoxicidade e toxicidade fetal (Poniedzialek et al., 2012). As cilindrospermopsinas são especialmente perigosas, visto que os

sintomas clínicos podem se manifestar somente vários dias após a exposição, dificultando a correlação dos efeitos tóxicos (Mankiewicz et al., 2003). Além disso, uma peculiaridade da cilindrospermopsina é que sua excreção pelas cianobactérias pode se dar mesmo em condições fisiológicas normais, o que a distingue de outras cianotoxinas.

Na Austrália, mais precisamente em Palm Island, no ano de 1979, a população ingeriu água contaminada com CYN, ocasionando a intoxicação de crianças e adultos. No Brasil, em 1996, a água utilizada em uma clínica de hemodiálise foi contaminada por microcistina e cilindrospermopsina; 52 mortes foram atribuídas a este incidente em 1996, denominado Síndrome de Caruaru. Devido aos efeitos nocivos da CYN ao organismo humano, o Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde limita sua concentração a  $1\mu\text{g L}^{-1}$  para águas destinadas ao consumo.

A cilindrospermopsina possui peso molecular de 415 Da e é altamente solúvel em água (Sivonen e Jones, 1999). Na forma extracelular, o processo convencional de tratamento de água não é eficiente na remoção das toxinas (Drikas et al., 2011), sendo necessária a busca por outras tecnologias de tratamento, como adsorção em carvão ativado e processos oxidativos avançados. Um tratamento também promissor para remover efetivamente cianotoxinas sem o risco de formação de subprodutos é o uso de membranas de alta pressão (Teixeira e Rosa, 2006).

A membrana é uma barreira que separa duas fases e que restringe total ou parcialmente o transporte de uma ou várias espécies químicas presentes nas fases, não ocorrendo transformações químicas e/ou biológicas durante a operação de separação. Os processos de separação por membrana comumente utilizados na produção de água para o consumo humano são osmose inversa, nanofiltração, ultrafiltração e microfiltração (AWWA, 2006); processos estes que utilizam gradiente de pressão como força motriz. Nos processos de separação por membranas, a alimentação se divide em duas correntes: a de permeado, que contém a água livre de impurezas, e a de concentrado, que é a água na qual estão as impurezas retidas pela membrana. É desejável, ao se utilizar de membranas para o tratamento, otimizar o arranjo de forma a maximizar o fluxo de permeado.

A microfiltração e a ultrafiltração são sistemas que operam a baixa pressão, utilizando membranas microporosas para remover material particulado (incluindo turbidez e micro-organismos), tomando como base o princípio de exclusão por tamanho; todavia tais processos não removem íons ou outros constituintes dissolvidos. A nanofiltração e a osmose inversa empregam membranas semipermeáveis que operam a alta pressão e que, ao contrário dos mecanismos de membrana a baixa pressão, atuam na remoção de compostos dissolvidos.

Apesar da remoção de íons monovalentes por parte de membrana de nanofiltração ser inferior à da membrana de osmose inversa, as duas membranas se assemelham no quesito da atuação de mecanismos; em ambas, os mecanismos vão além da exclusão por tamanho. Não se tratando de dessalinização, a membrana de nanofiltração se apresenta mais atrativa para o tratamento de água para consumo humano, devido ao fato de apresentar maior produção de permeado.

Teixeira e Rosa (2006) estudaram, em escala de bancada e com pressão de alimentação de 10 bar, a remoção de anatoxina-a e microcistina pela membrana de nanofiltração NFT50. Foram realizados dois conjuntos de experimentos, analisando-se diferentes valores de pH e configurações químicas da água de alimentação. A rejeição para as duas toxinas estudadas permaneceu acima do valor de 94%.

Dixon et al. (2011) analisaram, em escala de bancada, a rejeição de quatro cianotoxinas – dentre estas a microcistina e a cilindrospermopsina – por quatro diferentes membranas de nanofiltração: NF90, NF270, NTR7450 e Desal 5 DK. A NF90 e a NF270 apresentaram maior rejeição, com valores entre 90 e 100% para microcistinas e cilindrospermopsinas.

Um dos poucos estudos nesta temática realizado no Brasil foi desenvolvido por Pereira (2015), em escala de bancada, cuja matriz de alimentação constituiu-se água deionizada enriquecida com CYN. Conduzindo a operação com pressão de aproximadamente 8,3 bar, a rejeição média desempenhada apresentou valor de 90,7%.

Os estudos supracitados demonstraram satisfatório desempenho – acima de 90% de rejeição de cianotoxinas – da tecnologia de nanofiltração em escala de bancada. Neste contexto, tendo em vista a escassez de estudos, tanto no Brasil, como no mundo, direcionados à remoção de cilindrospermopsinas, este trabalho avaliou, em escala piloto, o desempenho das membranas de nanofiltração NF90 e NF270 no tratamento de água contendo essa cianotoxina.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A instalação piloto de nanofiltração, cedida pela empresa Dow Chemical Company® à UnB/Caesb, está localizada na Estação de Tratamento de Água de Brasília (ETA Brasília). A ETA Brasília é a segunda maior estação de tratamento de água de Brasília, com vazão de projeto de 2800 Ls<sup>-1</sup>; a tecnologia de tratamento empregada consiste nas etapas de coagulação, floculação, flotação por ar dissolvido, filtração rápida, desinfecção e correção do pH.

A unidade piloto conta com reservatório de alimentação fabricado em aço inox de volume 1m<sup>3</sup>, vaso de pressão para módulo de membrana de filtração com área de 2,6 m<sup>2</sup>, reservatório auxiliar em acrílico de volume 34 L para limpeza química e ensaio de permeabilidade, rotâmetros, manômetros, pontos de coleta, e uma válvula de esfera. Os equipamentos, tubulações e instrumentos permitiam a operação e o controle manual do sistema. A Figura 1 apresenta diagrama esquemático da instalação piloto de nanofiltração.

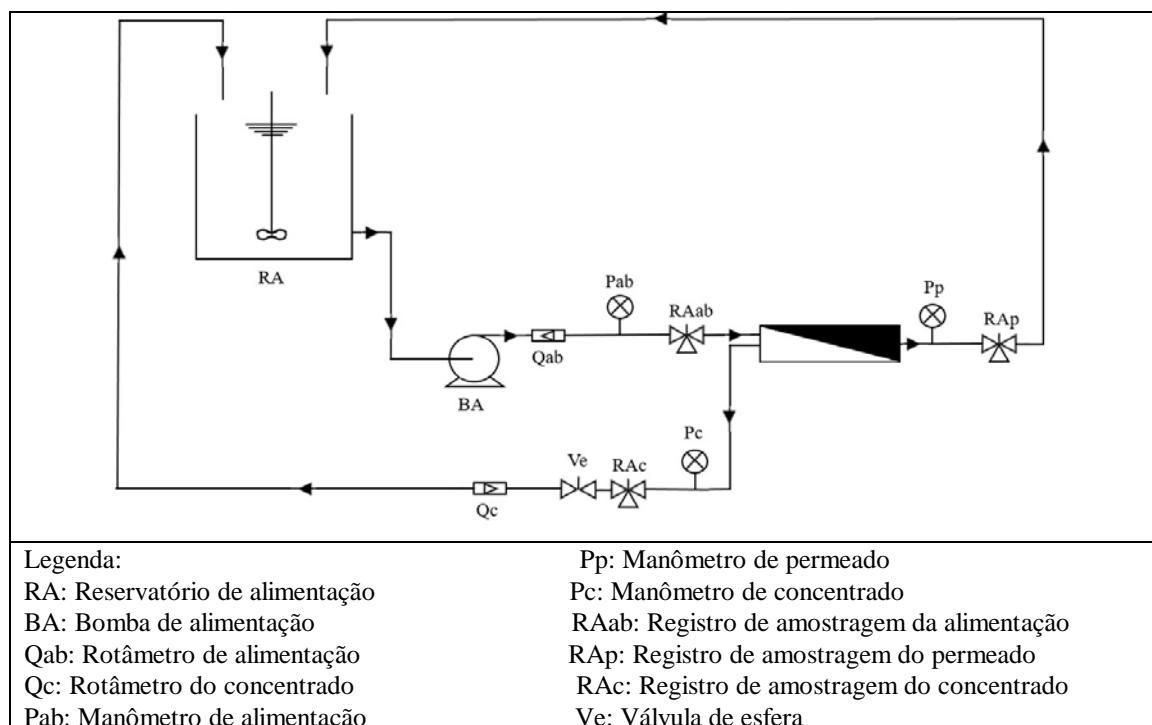


Figura 1: Diagrama da instalação piloto de nanofiltracão (Simões, 2016).

As membranas de nanofiltração empregadas foram a NF270-2540 e NF90-2540, ambas compostas pelo material de poliamida. As membranas possuem geometria plana, disposta em módulos espiral, e apresentam fluxo tangencial a membrana. A Tabela 1 apresenta as principais propriedades dessas membranas de acordo com Nghiem et al. (2008).

A realização de cada experimento de nanofiltração foi precedida por um ensaio de permeabilidade. Depois dos experimentos, era realizada limpeza química com solução alcalina e solução ácida. Posteriormente às limpezas químicas, era novamente conduzido ensaio de permeabilidade.

Nos ensaios para determinação da permeabilidade hidráulica, procedeu-se com a passagem de água ultrapura através da membrana sob diferentes pressões de alimentação (4, 5, 6, 7, 8 e 9 bar) e subsequente medição de vazão a cada ajuste de pressão. Dessa forma, a permeabilidade hidráulica é definida como a quantidade de permeado transportado através da membrana por unidade de área por unidade de tempo e por unidade de pressão.

**Tabela 1: Propriedades das membranas NF90 e NF270 – Nghiem et al. (2008).**

Propriedade	NF90	NF270
Diâmetro médio do poro (nm)	0,68	0,84
Rugosidade (nm)	76,8	8,55
Ângulo de contato (°)	42,2	23,4
Peso molecular de corte (Da)	200	300

O intuito da realização da limpeza química é prevenir ou retardar a formação de depósitos, restabelecer as características iniciais de operação – como o fluxo e a permeabilidade – e avaliar a reprodutibilidade dos experimentos. Tal limpeza era realizada após a retirada total dos resquícios de concentrado do sistema, a partir da alimentação com água deionizada em baixas pressões. A limpeza alcalina – realizada com 10 litros de solução de NaOH a 0,1% e pH 12 – atua na remoção do depósito causado por matéria orgânica natural, enquanto a limpeza ácida – constituída por 10 litros de solução de HCl 0,2%, pH entre 1 e 2 – visa eliminar os sais de dureza e hidróxidos metálicos.

Para a execução dos experimentos de nanofiltração, a água de alimentação era preparada e homogeneizada no reservatório de alimentação da instalação piloto. O sistema foi alimentado com o efluente dos filtros da ETA Brasília enriquecido com cerca de  $20 \mu\text{g L}^{-1}$  de CYN. A cilindrospermopsina, por sua vez, foi obtida a partir da lise de um cultivo de *Cylindrospermopsis raciborskii* – cianobactéria produtora de CYN.

Inicialmente foram realizados experimentos em que a piloto operara por 8 horas. Foram, então, coletadas amostras de água bruta, concentrado e permeado em intervalo de uma hora nas primeiras horas e nas horas seguintes em intervalos crescentes. Em cada experimento, a instalação piloto operou com pressão de cerca de 8 bar. Posteriormente, foram realizados com duração de 48 horas somente para a NF270.

O monitoramento de parâmetros operacionais (pressão, vazão e temperatura) e dos parâmetros de qualidade da água foi efetuado ao longo do experimento nas três correntes geradas – água bruta, concentrado e permeado. Foram realizadas as análises de pH, condutividade, turbidez (Laboratório da ETA Brasília – Caesb), além de matéria orgânica natural – estimada pela absorção de UV254nm – e cilindrospermopsina (Laboratório de Saneamento Ambiental – LSA, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UnB).

A cilindrospermopsina foi quantificada pelo método ELISA (Enzyme Linked Immunosorbent Assay) do fabricante Abraxis<sup>TM</sup>. A alta sensibilidade do método foi um fator que influenciou em sua escolha, já que o ELISA é capaz de detectar concentrações muito baixas de toxinas ( $0,04 \mu\text{g L}^{-1}$ ) e variantes da cilindrospermopsina.

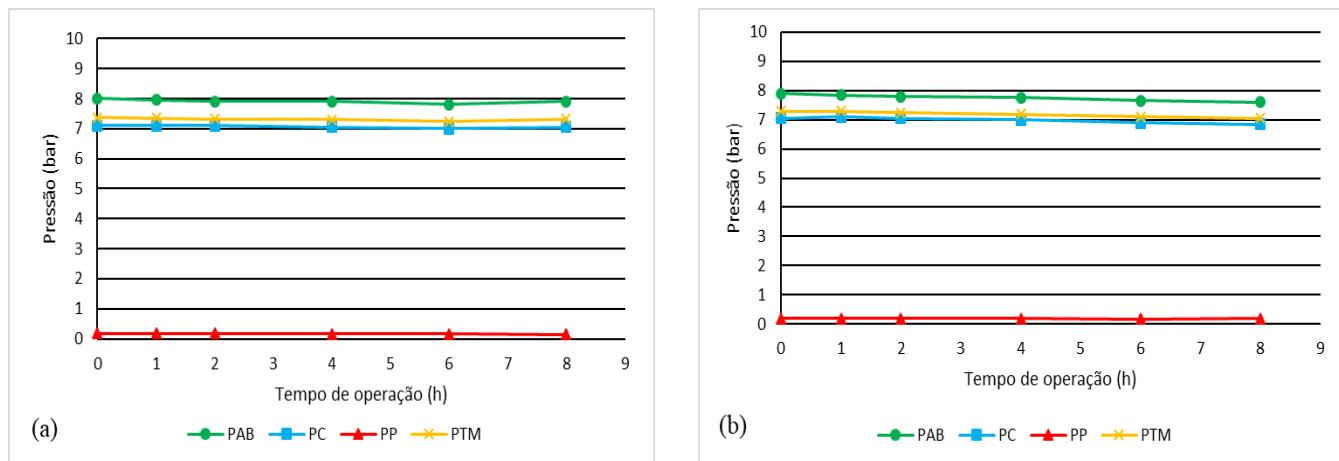
## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uma das finalidades dos ensaios de determinação da permeabilidade realizados para cada membrana foi a comparação com o manual informativo do produto, bem como verificar a diferença entre os módulos utilizados. A permeabilidade da membrana NF90, determinada antes do início dos experimentos, foi de  $6,71 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ bar}$ , estando um pouco abaixo da faixa de  $6,94$  a  $11,28 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ bar}$  especificada pelo fabricante (FILMTEC<sup>TM</sup>, 2015<sup>a</sup>). Já a membrana NF270 mostrou-se compatível com o intervalo de  $8,55$  a  $13,89 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ bar}$  indicado no manual do fabricante (FILMTEC<sup>TM</sup>, 2015B), apresentando permeabilidade de  $11,08 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ bar}$ . A menor permeabilidade da NF90 pode estar correlacionada com o fato de que o módulo já havia sido usado e já

apresentava alguma incrustação devido a experimentos anteriores, enquanto o módulo da NF270 não havia sido utilizado (módulo recém-adquirido).

A partir dos valores apresentados, nota-se que a NF270 apresentou maior permeabilidade que a NF90, o que é indicado pelo fabricante e também foi observado por Artug e Hapke (2006) e Rodrigues (2018), sendo condizente com o esperado, pois a NF270 é mais aberta e mais hidrofílica que a NF90.

O comportamento das pressões de alimentação (PAB), do concentrado (PC) e do permeado (PP) para as membranas NF90 e NF270, ao longo do tempo de operação de 8 horas, são mostradas nas Figuras 2(a) e 2(b). Observa-se que os valores das pressões variaram menos que 5% ao longo do experimento, ou seja, sem variações notáveis. A pressão transmembrana (PTM) variou 0,93% para a NF90 e 3,2% para a NF270 durante as oito horas de operação, sugerindo baixa incrustação (*fouling*) das membranas.



**Figura 2: Pressões de alimentação (PAB), do concentrado (PC) e do permeado (PP):**  
**(a) membrana NF90 e (b) membrana NF270 – tempo de operação de 8 horas e pressão de 8 bar.**

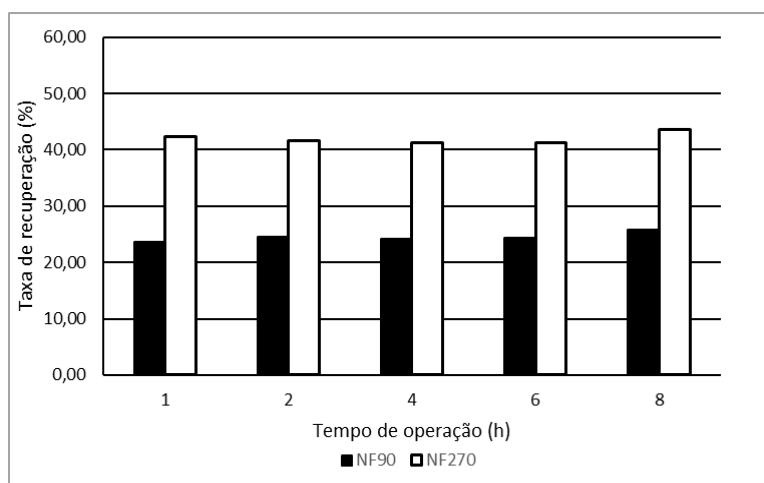
O fluxo de permeado apresentou pequenas oscilações ao longo da operação, não sendo observada nenhuma tendência de declínio ou aumento. As oscilações provavelmente foram devidas à imprecisão do método volumétrico usado para tal mensuração. Como pode ser observado na Tabela 2, a NF270 apresenta fluxo significativamente maior do que a NF90, como esperado, o que decorre do fato da membrana NF270 possuir maior diâmetro de poro que a NF90. Na Figura 3, se pode observar o comportamento da recuperação das membranas.

**Tabela 2: Fluxos máximos, mínimos e médios para as membranas NF90 e NF270 – tempo de operação de 8 horas e pressão de 8 bar.**

Membrana	Fluxo normalizado a 25°C (Lh <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> )		
	Máximo	Mínimo	Médio
NF90	34,7	30,4	32,4
NF270	62,2	52,8	57,2

Com relação a taxa de recuperação de ambas as membranas, assim como o fluxo de permeado, não apresentou tendência de variação ao longo dos experimentos. A recuperação média da membrana NF270 foi 41,6% superior à da NF90, cujo valor é 24,4%.

A avaliação da condutividade nas amostras de água bruta, concentrado e permeado pode ser usada para estimativa da capacidade de remoção de sais de cada membrana. A membrana NF90 reduziu em torno de 97% a condutividade da água bruta para o permeado, enquanto a NF270 reduziu 77% da condutividade, evidenciando o efeito do menor tamanho de poro da NF90 e a menor rejeição de sais indicada pelo fabricante da NF270. Os valores máximos e mínimos de condutividade para cada amostra estão dispostos na Tabela 3.



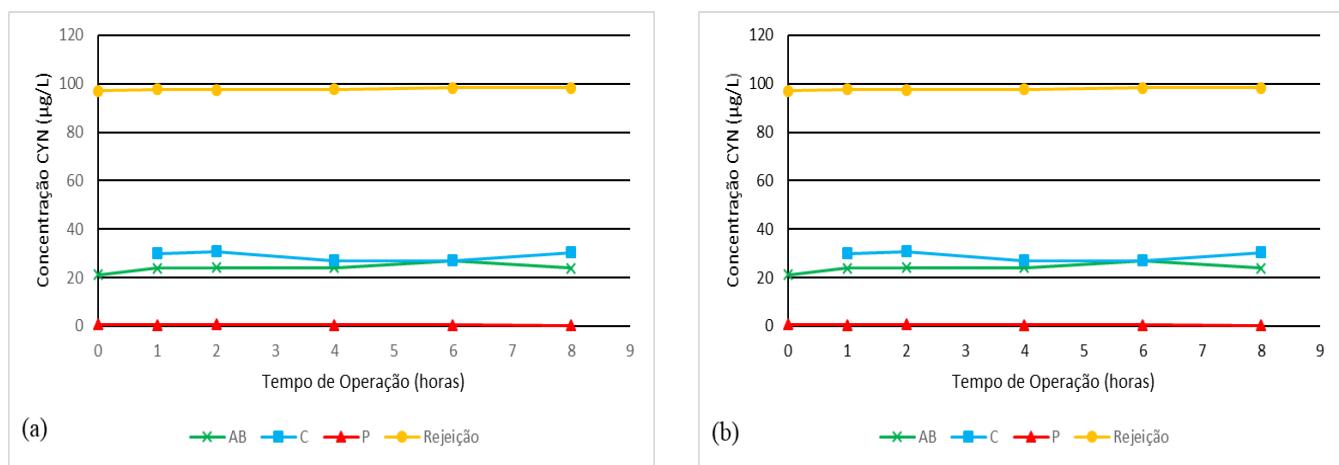
**Figura 3: Taxa de recuperação das membranas NF90 e NF270 – tempo de operação de 8 horas e pressão de 8 bar.**

**Tabela 3: Condutividade nas amostras de água bruta, de permeado e de concentrado – tempo de operação de 8 horas e pressão de 8 bar.**

Membrana	Condutividade ( $\mu\text{S}\text{cm}^{-1}$ )					
	Água Bruta		Permeado		Concentrado	
	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo
NF90	27	27	0,8	0,7	34	32
NF270	33	30	8,2	6,2	49	46

A matéria orgânica natural (MON) foi estimada por meio da quantificação da absorbância a UV254nm. As membranas apresentaram desempenho semelhante, já que em ambas a remoção de MON foi total. A diferença de comportamento das membranas quando se compara a redução da condutividade (rejeição de sais), em que a NF90 se mostrou mais efetiva, e a redução da absorbância UV254nm (rejeição de MON), em que ambas membranas foram capazes de promover a remoção total, está relacionada ao peso molecular elevado da MON, superior ao peso molecular de corte das duas membranas.

A rejeição (eficiência de remoção) da CYN pelas membranas foi elevada, sendo, em média, 97,8% no caso da NF270 e praticamente 100% no caso da NF90, uma vez que a cilindrospermopsina não foi detectada em nenhuma amostra de permeado desta membrana. As Figuras 5(a) e 5(b) mostram, respectivamente, a rejeição das membranas NF90 e NF270 ao longo dos experimentos, além das concentrações de CYN na água bruta (AB), no concentrado (C) e no permeado (P). Analisando a Figura 5(b) observa-se que a rejeição de CYN pela membrana NF270 apresenta uma suave tendência de aumento devido, provavelmente, à algum *fouling* na membrana.



**Figura 5: Rejeição (%) e concentrações de CYN na água bruta (AB), no concentrado (C) e no Permeado (P) ao longo do tempo de operação: (a) membrana NF90 e (b) membrana NF270 – tempo de operação de 8 horas e pressão de 8 bar.**

A maior rejeição da membrana NF90 era esperada em função de se tratar de membrana mais fechada, entretanto, a rejeição apresentada pela NF270 no presente trabalho foi superior à relatada por Pereira (2015) a partir de ensaios em escala de bancada. Pereira (2015) obteve rejeição média de 90,7% para matriz de água deionizada enriquecida com CYN e pressão de operação de aproximadamente 8,3bar. Por outro lado, o Autor obteve fluxo máximo (sem normalização) de  $131,4 \text{ Lm}^{-2}\text{h}^{-1}$  para a membrana NF270, enquanto neste trabalho o fluxo máximo (sem normalização) foi de  $62,27 \text{ Lm}^{-2}\text{h}^{-1}$ . Dixon et al. (2011) também relataram bons resultados com membranas de nanofiltração em escala de bancada, com rejeição entre 90 e 100%, utilizando água tratada de duas estações de tratamento em escala real.

A alimentação da NF90 apresentou concentração média de  $19 \mu\text{gL}^{-1}$  enquanto a NF270 foi alimentada com  $20 \mu\text{gL}^{-1}$ ; já a concentração de CYN no concentrado foi de, respectivamente,  $27 \mu\text{gL}^{-1}$  e  $29 \mu\text{gL}^{-1}$ . A maior concentração de CYN no concentrado da NF270 reflete o maior valor de concentração de CYN na água bruta que alimentava esta membrana.

A Tabela 4 apresenta um resumo dos principais resultados observados para as membranas de nanofiltração NF90 e NF270 com tempo de operação de 8 horas, e da membrana NF270 com tempo de operação de 48 horas. Para ambos os tempos de duração, a pressão de operação manteve-se estável em 8 bar ao longo das 48 horas de operação. O fluxo de permeado obtido na membrana NF270 fazendo uso da mesma matriz foi de  $77,9 \text{ Lh}^{-1}\text{m}^{-2}$ . A recuperação obtida para tal membrana foi de 49,5%, e a rejeição obtida foi de 98,2%.

**Tabela 4: Resumo dos resultados observados para as membranas NF90 e NF270.**

Parâmetro	Tempo de operação de 8 horas		Tempo de operação de 48 horas
	NF90	NF270	NF270
Rejeição de CYN (%)	~ 100	97,8	97,4
Recuperação (%)	24,4	41,6	49,5
Fluxo de permeado ( $\text{Lh}^{-1}\text{m}^{-2}$ )	32,4	52,7	75,3

Para a NF270, de maneira similar ao tempo de 8 horas, a pressão de trabalho se manteve estável para o tempo de operação de 48 horas; entretanto, o fluxo de permeado com operação de 48 horas se mostrou superior. Apesar de maior fluxo, não houve impacto na rejeição, o que sugere o potencial de aplicabilidade da membrana no sentido operacional.

A máxima concentração de cilindrospermopsina no permeado (água tratada) da NF270 foi  $0,62 \mu\text{gL}^{-1}$ , e a concentração mínima foi  $0,42 \mu\text{gL}^{-1}$  e, como já mencionado, as amostras do permeado da NF90 apresentaram

concentração inferior ao limite de detecção do método analítico, que é de  $0,04 \mu\text{gL}^{-1}$ . Em ambos os casos, apesar da elevada concentração da cianotoxina na água bruta, as duas membranas produziram água tratada com concentração abaixo do valor de  $1 \mu\text{gL}^{-1}$  recomendado pelo Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde para águas destinadas ao consumo humano.

## CONCLUSÕES

As membranas de nanofiltração NF90 e NF270 apresentaram comportamentos distintos nos quesitos permeabilidade e fluxo médio de permeado, entretanto ambas as membranas demonstraram ótima eficiência de remoção da matéria orgânica natural e da cilindrospermopsis, em função dos seus pesos moleculares de corte serem inferiores ao peso molecular dessa cianotoxina e predominar o mecanismo de exclusão por tamanho.

Na água tratada, mesmo ao se considerar a máxima concentração de CYN, obtida com uso da membrana NF270, o valor de  $0,62 \mu\text{gL}^{-1}$  está abaixo do limite de  $1 \mu\text{gL}^{-1}$  estabelecido Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5/2017 do Ministério da Saúde, sugerindo que qualquer dessas membranas será capaz de produzir água segura com relação à presença de cilindrospermopsis. Entretanto, do ponto de vista prático, é importante considerar que a membrana NF270, na pressão adotada de 8 bar e tempo de 8 horas, apresentou fluxo de permeado cerca de 1,8 vezes maior que a membrana NF90, o que implica numa redução significativa na área da membrana para tratar a mesma vazão, com implicação nos custos de implantação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ARTUG, G.; HAPKE, J. Characterization of nanofiltration membranes by their morphology, charge and filtration performance parameters. *Desalination*, v. 200, p 178-180. Alemanha, 2006.
2. AWWA Manual. Reverse Osmosis and Nanofiltration, 1 ed. Denver: American Water Works Association, 226 p. Estados Unidos, 2007.
3. BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. Portaria de Consolidação nº 05, de 28 de setembro de 2017. Diário Oficial da União, Brasília, DF.
4. DIXON, M.B.; FALCONET, C.; HO, L.; CHOW, C.W.K.; O'NEILL, B.K.; NEWCOMBE, G. (2011) Removal of cyanobacterial metabolites by nanofiltration from two treated waters. *Journal of Hazardous Materials*, v. 188, p. 288-295.
5. DRIKAS, M.; CHOW, C.W.K.; HOUSE, J.; BURCH, M.D. (2001) Using coagulation, flocculation, and settling to remove toxic cyanobacteria. *Journal of American Water Association*, v. 93, n. 2, p. 100-111.
6. FILMTEC™ (2015a). “Formulário Nº - 609-00378-1206 Membranes FILMTEC NF90 Nanofiltration Elements for Commercial Systems”. Disponível em: <http://www.lenntech.com/products/index.htm>, acesso em 20/07/2017.
7. FILMTEC™ (2015b). “Formulário Nº - 609-00519-1206 Membranes FILMTEC NF270 Nanofiltration Elements for Commercial Systems”. Disponível em: <http://www.lenntech.com/products/index.htm>, acesso em 20/07/2017.
8. MANKIEWICZ, J.; TARCZYNSKA, M.; WALTER, Z.; ZALEWSKI, M. (2003) Natural toxins from cyanobacteria. *Acta biologica cracoviensis*, v. 45, n. 2, p. 9-20.
9. 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.
10. PEREIRA, A.R. (2015). Remoção de cilindrospermopsis por carvão ativado granular e nanofiltração no tratamento de água para consumo humano: estudo em escala de bancada. Monografia de projeto final em Engenharia Ambiental.
11. PONIEDZIALEK, B.; RZYMSKI, P.; KOKOCINSKI, M. (2012) Cylindrospermopsin: Water-linked potential threat to human health in Europe. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, v. 34, n. 3, p. 651-660.
12. RODRIGUES, A.M. (2018). Avaliação em escala piloto do desempenho operacional e rejeição dos perturbadores endócrinos Bisfenol-A e cilindrospermopsis por membranas de nanofiltração. Dissertação de mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 143p.

13. 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 em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos.
14. SIVONEN, K.; JONES, G. (1999) Cyanobacterial toxins In: CHORUS, I.; BARTMAN, J. (Eds.) *Toxic Cyanobacteria in Water*. F&FN Spon, London, p. 41-111.
15. TEIXEIRA, M.R.; ROSA, M.J. (2006) Neurotoxic and hepatotoxin cyanotoxins removal by nanofiltration. *Water Reserach*, v. 40, p. 2837-2846.
16. WALKER, H.W. (2014) *Harmful Algae Blooms in Drinking Water: Removal of Cyanobacterial Cells and Toxins*. 1 ed. Florida: Ed. CRC Press, 174 p.