

Influência do emprego de retrolavagens no desempenho operacional da microfiltração aplicada ao tratamento de águas para abastecimento em escala piloto

Influence of the backwash on the operational performance of microfiltration applied to water treatment on a pilot scale

• **Data de entrada:**
09/02/2023


• **Data de aprovação:**
14/03/2023


Renan Borelli Galvão^{1*} | Rafaela Mayumi Kawata² | Ana Carolina Akioma² | Zaki Soares de Oliveira Nader² | Fernando Fernandes² | Emília Kiyomi Kuroda²

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2024.013>


ORCID ID


Galvão RB  <https://orcid.org/0000-0003-4278-0490>

Kawata RM  <https://orcid.org/0009-0002-2594-7332>

Akioma AC  <https://orcid.org/0009-0000-9404-5637>

Nader ZSO  <https://orcid.org/0009-0006-1801-9246>

Fernandes F  <https://orcid.org/0000-0003-4172-5588>

Kuroda EK  <https://orcid.org/0000-0001-8678-5619>

Resumo

A microfiltração - MF tem se mostrado uma alternativa interessante ao tratamento convencional de águas para abastecimento. No entanto, seus aspectos operacionais devem ser estudados atentamente para garantir maior produtividade do sistema. Este trabalho buscou avaliar, em escala piloto, a influência do uso de diferentes critérios para realização de retrolavagem durante o tratamento de água bruta por MF. Foram realizados 3 experimentos: E-MF - sem aplicação de retrolavagem; E-MF-R1 - aplicação de 1 retrolavagem a cada hora; E-MF-R2 - aplicação de 1 retrolavagem a cada 10% de perda de fluxo. A condição de operação da microfiltração sem retrolavagens apresentou o pior desempenho operacional, com a maior taxa de redução do fluxo de permeado ($0,0335 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$). As duas condições de aplicação de retrolavagens diminuíram a taxa de redução do fluxo de permeado na mesma proporção ($0,0271 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$), provocando, assim, o aumento de produtividade do sistema.

Palavras-chave: Filtração em membranas. Escala piloto. Contralavagem.

Abstract

Microfiltration - MF has proved to be an interesting alternative to conventional water treatment. However, its operational aspects must be carefully studied to ensure greater system productivity. This work aimed to evaluate, on a pilot scale, the influence of the application of different backwash methods during the treatment of raw water by MF. Three experiments were carried out: E-MF - without backwashing; E-MF-R1 - application of 1 backwash every hour; E-MF-R2 - application of 1 backwash for every 10% flow loss. The microfiltration operating condition without backwashes presented the worst operational performance, with the highest rate of permeate flux reduction ($0.0335 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$). The two conditions of backwash application reduced the rate of permeate flux reduction in the same proportion ($0.0271 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$), thus causing an increase in the productivity of the system.

Keywords: Membrane filtration. Pilot scale. Backwash.

¹ Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Campus Apucarana - Paraná - Brasil.

² Universidade Estadual de Londrina - Londrina - Paraná - Brasil.

* **Autor correspondente:** renanbgalvao@outlook.com.

1 INTRODUÇÃO

A tecnologia de filtração em membranas, já amplamente utilizada no tratamento de efluentes industriais e águas para reúso, vem se mostrando uma opção interessante e potencialmente viável para a aplicação em larga escala no tratamento de águas para consumo humano. Tal viabilidade se dá, especialmente, em casos de ampliação de Estações de Tratamento de Águas - ETAs já existentes que necessitam de pós-tratamento para remoção de compostos orgânicos dissolvidos, uma vez que o tratamento convencional é ineficaz na remoção desses contaminantes.

O mecanismo de rejeição de solutos na filtração por membranas consiste, predominantemente, na retenção física das moléculas de diâmetro maior que os poros da membrana, que pode ser do tipo porosa (microfiltração - MF e ultrafiltração - UF) ou densa (nanofiltração - NF e osmose inversa - OI). Pode ocorrer, ainda, em menor proporção, a retenção de compostos por mecanismos de adsorção, difusão e repulsão eletrostática, em função das características das membranas e dos compostos dissolvidos (METCALF e EDDY, 2016; SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001).

O emprego da tecnologia de filtração em membranas apresenta uma série de vantagens em relação aos demais tipos de tratamento, como: a não obrigatoriedade da adição de reagentes químicos; a maior seletividade; o elevado nível de automação permitido; a menor área requerida para implantação; a flexibilidade e a facilidade de escalonamento, devido a sua característica modular; e a melhora na qualidade da água tratada, considerando a elevada rejeição que a técnica apresenta para uma grande gama de compostos orgânicos dissolvidos potencialmente prejudiciais à saúde (DI BERNARDO et al., 2017; LI et al. 2008; METCALF e EDDY, 2016).

Sua aplicação em escala real para sistemas de saneamento ainda é restrita, principalmente no Brasil, devido aos custos elevados de instala-

ção e operação. Porém, tais custos estão sendo reduzidos devido à otimização dos processos, ampliação do domínio tecnológico e à produção/aplicação em maior escala (JUDD e CARRA, 2021; YOO et al., 2019). Considerando ETAs brasileiras, destacam-se os exemplos da ETA do Alto da Boa Vista (ETA ABV) e da ETA Rio Grande, ambas em São Paulo e operadas pela Sabesp.

Por serem porosas, as membranas de MF são utilizadas principalmente para a remoção de células, coloides e material em suspensão. Assim, apresentam grande potencial de aplicação no tratamento de águas para abastecimento, como uma alternativa ao ciclo completo ou à etapa de filtração em meio granular, por exemplo (FARIA, 2011; LIU et al., 2021; PLAKAS e KARABELAS, 2011; RODRIGUEZ-MOZAZ et al., 2015; SIMÕES, 2016). Em função das diferentes correntes de fluxo (alimentação, permeado e concentrado), dos arranjos dos módulos de membrana e dos modos de operação (pressão ou fluxo constante, recirculação total ou parcial do concentrado, aplicação ou não de retrolavagem), faz-se necessário o estudo atento das condições operacionais da referida técnica, de maneira a viabilizar e otimizar sua aplicação em escala real.

Além disso, embora a tecnologia de filtração por membranas possua extensa pesquisa publicada, em especial no que se refere a experimentos em escala de bancada (NGUYEN et al., 2021; ŞEN-GÜL et al.; 2018; ZHANG et al., 2020), pode-se considerar reduzida a produção científica focada na aplicação em escala piloto da microfiltração e no estudo de seu comportamento e desempenho em função de variáveis operacionais.

Dessa forma, este estudo teve como objetivo avaliar a influência do uso de diferentes critérios para realização de retrolavagem durante o tratamento de água bruta por filtração em membranas de MF, bem como analisar o desempenho operacional e a qualidade do permeado produzido.

2 METODOLOGIA

2.1 Água de estudo – AE

Para a realização dos experimentos de tratabilidade por filtração em membrana de Microfiltração - MF, foram coletados na ETA Cafezal de Londrina-PR (Companhia de Saneamento do Paraná - SANEPAR) 14 m³ de água bruta do Ribeirão Cafezal, com o auxílio de um caminhão-tanque devidamente higienizado. A água bruta coletada, denominada neste trabalho como Água de Estudo - AE, foi armazenada em reservatório de fibra de vidro com capacidade de 15 m³, previamente higienizado, localizado no Laboratório de Trata-

mento de Águas e Resíduos - LABTAR da Universidade Estadual de Londrina - UEL.

2.2 Instalação Piloto de Filtração em Membranas - IPFM

A avaliação dos parâmetros operacionais e de qualidade e da aplicação da retrolavagem no tratamento de águas para abastecimento pela técnica de filtração em membranas de MF foi realizada em uma Instalação Piloto de Filtração em Membranas - IPFM, constituída por uma unidade de alimentação de água de estudo e uma unidade de filtração em membranas da empresa Pam Membranas Seletivas (Fig. 1).

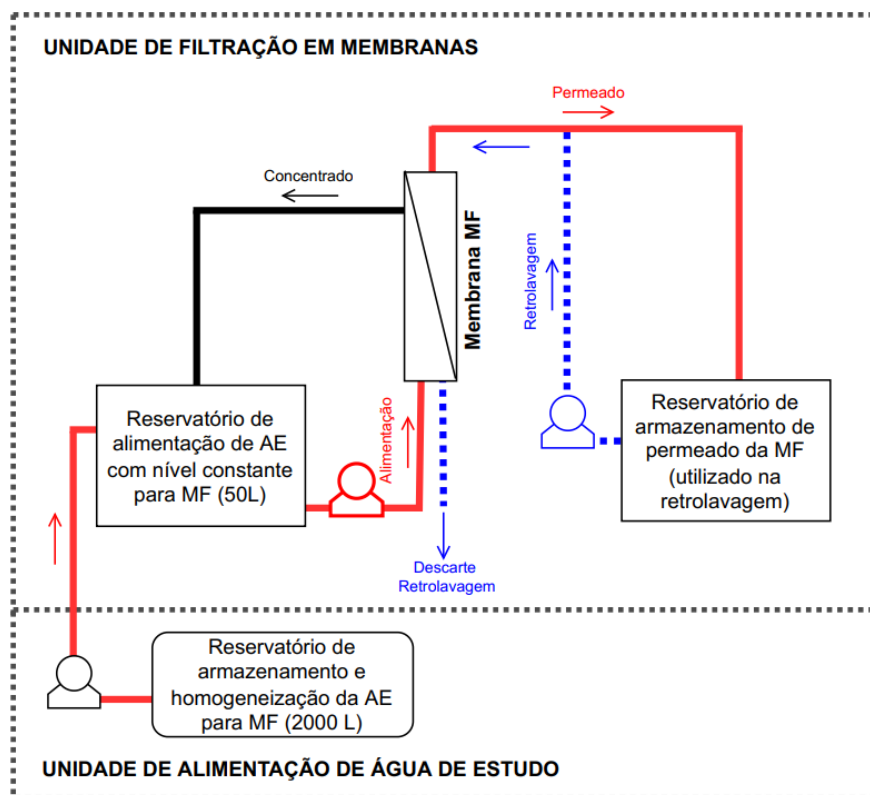


Figura 1 - Representação esquemática da IPFM

A unidade de alimentação de água de estudo foi composta por um reservatório (polietileno reforçado com fibra de vidro de capacidade volumétrica de 2000 L) para armazenamento da AE e um

dispositivo de recirculação para homogeneização permanente, composto por uma bomba centrífuga (Eletroplas – ICS-50B, 0,5 HP), válvulas de manobra e mangueiras (trançadas de PVC). Por meio do

dispositivo de recirculação, a água de estudo era encaminhada para o reservatório da unidade de filtração, em PVC, com capacidade volumétrica de 50 L, dotado de extravasor, que permitia a regularização de nível e alimentação do vaso de pressão.

A unidade de filtração em membranas, por sua vez, possui um suporte de aço carbono e sistema hidráulico montado com tubulações CPVC Schedule 80, composto pelos seguintes elementos: 2 bombas centrífugas para pressurização da linha de alimentação e de retrolavagem (Standex modelo 103B125F31BA), com velocidades de rotação controladas eletronicamente, o que permite operação automática para pressões pré-estabelecidas; vaso de pressão em aço inoxidável para a membrana de MF; manômetros e rotâmetros para a verificação da pressão e da vazão, respectivamente, nas diferentes linhas de escoamento; válvulas de esfera para acionamento e isolamento das diferentes linhas de escoamento e drenagem dos tanques de alimentação e de permeado; válvula de agulha para ajuste de vazão e controle de pressão manual do vaso; tanques de alimentação e de permeado em polipropileno, com volume de 50 L; válvulas solenoides de duas vias, com acionamento elétrico, que permitem o intertravamento para a realização automática de retrolavagem no vaso de pressão da MF; e painel de controle eletrônico com relé lógico programável que permite os ajustes dos tempos de filtração e retrolavagem da MF e operação automática ou manual. O módulo de microfiltração opera em regime de fluxo tangencial.

A membrana de MF (modelo nº 1444 da PAM Membranas Seletivas) foi do tipo fibra oca de poliéterimida, de geometria cilíndrica com diâmetro externo das fibras entre 0,9 e 1,0 mm, tamanho médio dos poros na superfície externa das fibras de 0,4 μm e fibras com camada seletiva externa. O módulo possui área total de permeação de 4 m^2 , 95 cm de comprimento e 6,5 cm de diâmetro. De acordo com a fabricante, a membrana de MF possui uma

eficiência de retenção de 99,9% de microrganismos e sólidos suspensos e opera em condições de pH entre 2,0 e 13,0 e temperatura máxima de 55°C.

2.3 Permeabilidade hidráulica da membrana

A determinação da permeabilidade hidráulica da membrana de MF foi realizada antes do uso (denominada permeabilidade original) e após a limpeza físico-química ao final de cada experimento.

O procedimento de ensaio de permeabilidade da membrana iniciava-se com a compactação da mesma, por meio da passagem de água ultrapura durante 30 minutos sob pressão de 0,20 bar (20 kPa), conforme recomendação da literatura (BAKER, 2004; STREIT, 2009; MORAVIA, 2010). Em seguida, diferentes pressões foram aplicadas (0,05; 0,10; 0,15 e 0,20 bar), e seus respectivos fluxos, monitorados. Cada patamar de pressão foi mantido por 15 minutos, de forma a garantir sua estabilização, e só então a vazão do permeado foi mensurada, por meio da coleta de água permeada por 30 segundos.

Os valores obtidos para vazão de permeado (L min^{-1}) foram convertidos para fluxo de permeado ($\text{L h}^{-1} \text{m}^{-2}$), considerando as diferentes temperaturas dos permeados coletados, a fim de possibilitar o ajuste dos valores de viscosidade para a temperatura padrão de 20°C. Os dados de ensaio foram, então, dispostos em uma curva fluxo de permeado vs. pressão, cujo coeficiente angular da reta ajustada corresponde à permeabilidade hidráulica da membrana ($\text{L h}^{-1} \text{m}^{-2} \text{bar}^{-1}$).

2.4 Procedimento de limpeza da membrana

De forma a recuperar a capacidade de filtração da membrana após sua utilização nos experimentos, a mesma era submetida a um processo de limpeza físico-química, que consistia nas seguintes etapas: (i) execução de duas retrolavagens de 5 minutos cada, intercalando-as com a passagem de 15 mi-

nutos de água potável, sob pressão de 0,10 bar (10 kPa); (ii) passagem de solução de hipoclorito de cálcio - $\text{Ca}(\text{ClO})_2$ a uma concentração de 1000 mg L⁻¹ por uma hora; (iii) passagem de água potável por mais uma hora, também sob pressão de 0,10 bar.

O procedimento de limpeza físico-química teve seu ciclo repetido até a obtenção de uma recuperação mínima de permeabilidade correspondente a 90% da permeabilidade original da membrana, de modo que a eficiência do experimento subsequente e a avaliação comparativa não fossem prejudicadas.

2.5 Fluxo Crítico e Pressão de Operação

De maneira simplificada, o fluxo crítico pode ser entendido como o fluxo máximo a partir do qual se inicia o processo de colmatação da membrana (*fouling*) em alta taxa (OLIVEIRA, 2016; ZHANG, et al., 2016). Dessa forma, foi realizado ensaio de fluxo crítico para determinação da correspondente pressão aplicada, que foi adotada como pressão de operação dos experimentos de MF.

Para este ensaio foi utilizada a água bruta do Ribeirão Cafezal (AE) como água de alimentação, simulando a operação do sistema durante os ensaios. Os valores de pressão avaliados no ensaio foram de 0,2; 0,3; 0,4 e 0,5 bar. Para cada pressão avaliada, aguardaram-se 30 min para adensamento da membrana e estabilização da pressão e, em seguida, monitorou-se o fluxo por 10 minutos. Os resultados foram plotados em gráficos que relacionam pressão e fluxo de permeado. A pressão

de operação foi determinada como aquela anterior ao patamar de pressão em que foi observado o decaimento do fluxo de permeado.

2.6 Experimentos de tratabilidade por filtração em membrana de MF

Com a finalidade de investigar os parâmetros operacionais e de qualidade da microfiltração aplicada ao tratamento de águas para abastecimento em escala piloto, bem como avaliar a influência de dois diferentes protocolos de aplicação de ciclos de retrolavagens na capacidade de produção de permeado, foram realizados os Experimentos E-MF, E-MF-R1 e E-MF-R2.

Ao início de cada experimento, um volume total de 2000 L da AE (água bruta do Ribeirão Cafezal) era transferido para o reservatório da unidade de alimentação de AE da IPFM.

O Experimento E-MF consistiu na passagem da AE através da membrana de MF, sob pressão de operação constante estabelecida pelo ensaio de fluxo crítico, fluxo de permeado variável e recirculação total do concentrado. A avaliação de desempenho foi realizada pelo monitoramento das linhas de alimentação, permeado e concentrado em relação aos seguintes parâmetros (i) operacionais: pressão, fluxo e temperatura e (ii) de qualidade: turbidez, pH e cor aparente (APHA, AWA e WEF, 2017), conforme Tabela 1. A unidade de filtração da IPFM foi operada em modo automático durante 5 horas de monitoramento.

Tabela 1 - Parâmetros e frequência de monitoramento

Parâmetro		Frequência de monitoramento
Operacional	Pressão (bar)	A cada 15 min na alimentação, permeado e concentrado
	Fluxo (L h ⁻¹ m ⁻²)	
	Temperatura (°C)	
Qualidade	Turbidez (uT)	Primeiros 15 min e posteriormente a cada 30 min no permeado
	pH	
	Cor Aparente (uH)	

Os Experimentos E-MF-R1 e E-MF-R2 foram realizados com a mesma água de estudo (AE), os mesmos parâmetros operacionais (pressão crítica e operação automática) e a mesma frequência de monitoramento utilizados no Experimento E-MF. Nesses experimentos foram aplicados ciclos de retrolavagens intermitentes segundo diferentes critérios. No Experimento E-MF-R1 foi aplicado um ciclo de retrolavagem a cada 1h de operação, totalizando 5 retrolavagens em 5h de operação. Já no Experimento E-MF-R2 foi aplicado um ciclo de retrolavagem a cada 10% de perda de fluxo de permeado, em um total de 10h de monitoramento, para que pelo menos 3 retrolavagens fossem observadas. O ciclo de retrolavagem era programado no painel de controle da unidade de filtração e realizado de forma automática. Iniciava-se com a despressurização

do vaso de pressão seguida da passagem da água do tanque de permeado em contrafluxo à membrana durante 30 segundos, sob pressão máxima obtida com o fechamento total do registro de pressurização da linha de retrolavagem. Todo o volume gerado durante a retrolavagem foi coletado e mensurado.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Permeabilidade hidráulica da membrana

A permeabilidade hidráulica inicial da membrana de microfiltração - MF foi determinada antes da execução dos experimentos e adotada como referência. A curva do ensaio pode ser visualizada na Fig. 2.

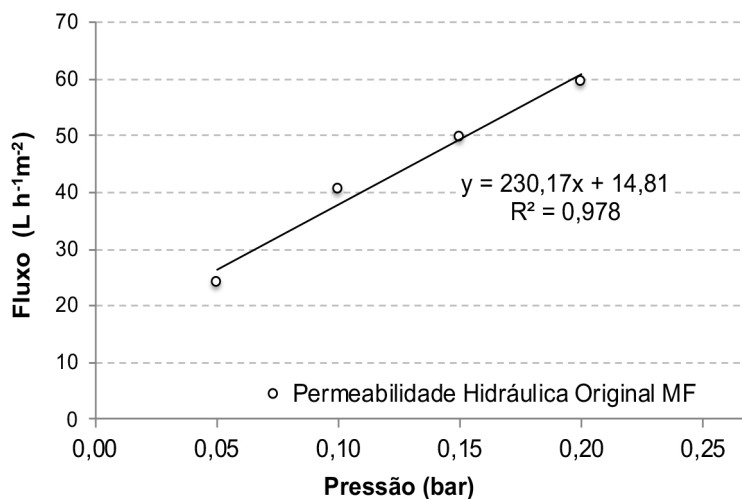


Figura 2 - Permeabilidade hidráulica inicial da membrana de MF

Ao correlacionar a pressão aplicada e o fluxo de permeado produzido pela membrana por meio de uma regressão linear, o coeficiente angular da reta obtido corresponde justamente à permeabilidade hidráulica da mesma. De acordo com a Fig. 2, a permeabilidade inicial obtida para a membrana de MF foi de $230,17 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ bar}^{-1}$.

3.2 Fluxo Crítico e Pressão de Operação

Na Fig. 3 são apresentadas as relações entre fluxo de permeado e pressão aplicada durante o ensaio de fluxo crítico para a membrana de MF e Água de Estudo - AE.

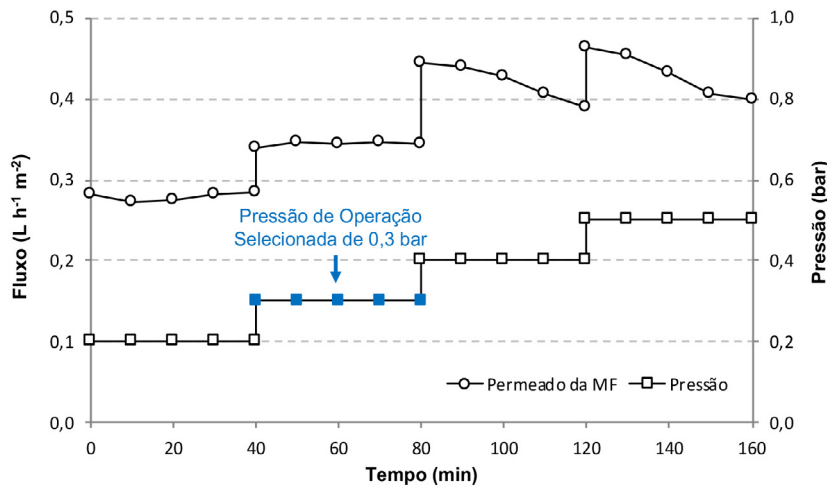


Figura 3 - Fluxo de permeado e pressão aplicada para determinação de fluxo crítico no processo de MF

Pode-se constatar a ocorrência de decaimento do fluxo de permeado a partir do patamar de pressão de 0,4 bar, com variação de 0,44 a 0,39 L h⁻¹ m⁻² (redução de 11,4%), indicando potencial início de *fouling* na membrana. Assim, a pressão de operação adotada para os experimentos (E-MF, E-MF-R1 e E-MF-R2) foi a de 0,3 bar (30 kPa), pressão correspondente ao patamar ensaiado imediatamente anterior àquele em que se observou decaimento do fluxo.

3.3 Experimentos de tratabilidade por filtração em membrana de MF

3.3.1 Parâmetros Operacionais

Os Experimentos E-MF, E-MF-R1 e E-MF-R2 de microfiltração da AE na Instalação Piloto de Filtração em Membranas - IPFM foi realizado com pressão de alimentação/operação constante de 0,3 bar (30 kPa), definida no ensaio de fluxo crítico, fluxo de permeado variável ao longo do tempo e recirculação total do concentrado por um período de 5h para os dois primeiros experimentos e 10h para o último. No decorrer dos

experimentos, a pressão transmembrana manteve-se estável e a temperatura do permeado e do concentrado variou entre: 28,5 e 29,5 °C para o Experimento E-MF; 25,8 e 28,6 °C para o Experimento E-MF-R1; e 23,1 e 24,9 °C para o Experimento E-MF-R2.

Em função da recirculação total do concentrado em todos os experimentos, a qualidade da água do tanque de alimentação também variou, o que pode ter contribuído para a aceleração da formação de torta devido ao aumento da concentração de particulados na água de alimentação ao longo do tempo.

As Fig. 4, 5 e 6 apresentam os dados de monitoramento dos referidos experimentos, indicando os valores pontuais dos fluxos de alimentação, de permeado e de recirculação do concentrado, além dos valores de pressão transmembrana resultante. As setas cinzas indicam os momentos de aplicação de retrolavagem. A Tabela 2, por sua vez, apresenta os valores mínimo, máximo e médio, o desvio padrão e o coeficiente de variação dos referidos parâmetros operacionais.

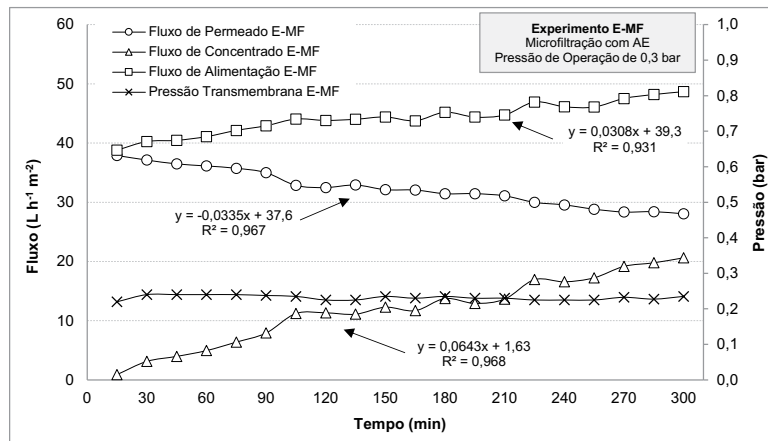


Figura 4 -Valores de pressão transmembrana e dos fluxos de alimentação, concentrado e permeado ao longo do Experimento E-MF

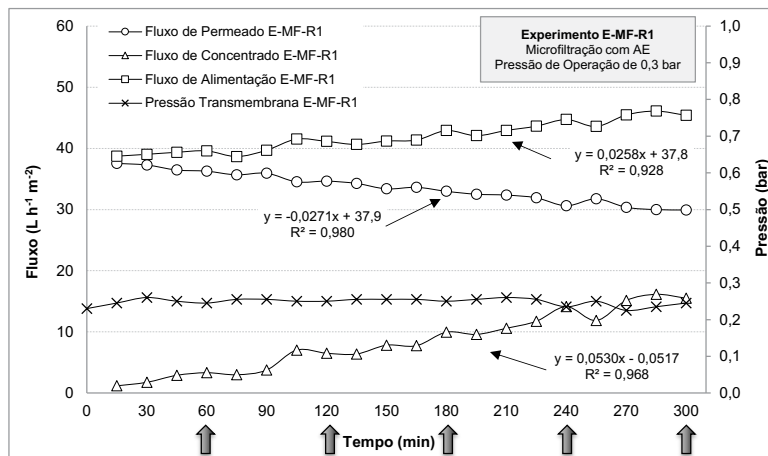


Figura 5 - Valores de pressão transmembrana, dos fluxos de alimentação, concentrado e permeado ao longo do Experimento E-MF-R1

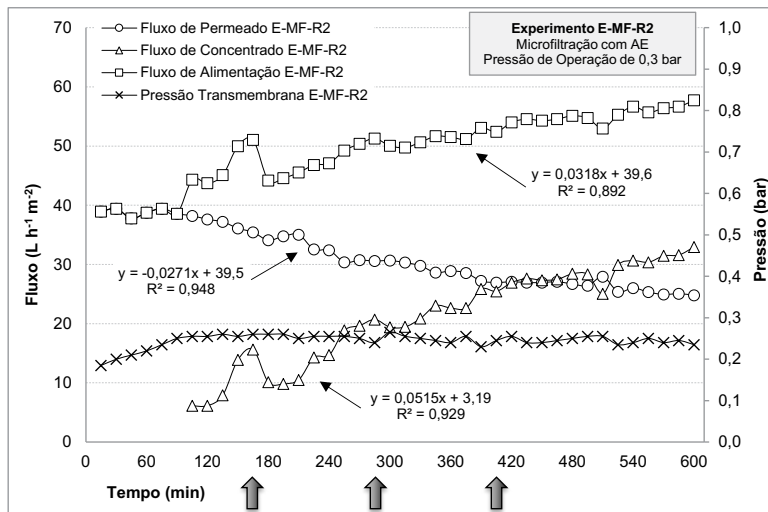


Figura 6 - Valores de pressão transmembrana, dos fluxos de alimentação, concentrado e permeado ao longo do Experimento E-MF-R2

Tabela 2 - Valores mínimo, médio e máximo, desvio padrão e coeficiente de variação dos parâmetros operacionais dos Experimento E-MF, E-MF-R1 e E-MF-R2

	Parâmetro Operacional	Valor Mín	Valor Máx	Valor Médio*	Desvio Padrão	Coef. de Var. (%)
E-MF	Pressão de Alimentação (bar)	0,26	0,30	0,29	0,01	3,4
	Pressão de Concentrado (bar)	0,15	0,18	0,17	0,01	5,9
	Pressão Transmembrana (bar)	0,20	0,24	0,23	0,01	4,3
	Fluxo de Alimentação (L h ⁻¹ m ⁻²)	38,8	48,7	44,2	2,7	6,1
	Fluxo de Permeado (L h ⁻¹ m ⁻²)	28,0	37,9	32,4	3,1	9,6
E-MF-R1	Fluxo de Concentrado (L h ⁻¹ m ⁻²)	0,9	20,6	11,8	5,8	48,9
	Pressão de Alimentação (bar)	0,29	0,33	0,31	0,01	2,9
	Pressão de Concentrado (bar)	0,16	0,20	0,19	0,01	6,9
	Pressão Transmembrana (bar)	0,23	0,26	0,25	0,01	3,6
	Fluxo de Alimentação (L h ⁻¹ m ⁻²)	38,7	46,1	41,9	2,4	5,7
E-MF-R2	Fluxo de Permeado (L h ⁻¹ m ⁻²)	29,9	37,6	33,6	2,4	7,2
	Fluxo de Concentrado (L h ⁻¹ m ⁻²)	1,2	16,1	8,3	4,8	57,6
	Pressão de Alimentação (bar)	0,23	0,32	0,30	0,02	6,1
	Pressão de Concentrado (bar)	0,14	0,21	0,19	0,02	8,7
	Pressão Transmembrana (bar)	0,19	0,27	0,24	0,02	6,8
	Fluxo de Alimentação (L h ⁻¹ m ⁻²)	37,8	57,8	49,4	5,9	11,9
E-MF-R2	Fluxo de Permeado (L h ⁻¹ m ⁻²)	24,8	39,4	31,2	4,9	15,8
	Fluxo de Concentrado (L h ⁻¹ m ⁻²)	6,1	33,0	21,4	8,0	37,4

*Para número de amostras n = 20 (E-MF e E-MF-R1) e 40 (E-MF-R2).

A partir das Fig. 4, 5 e 6 e da Tabela 2, confirma-se a manutenção das pressões de alimentação e transmembrana em valores aproximadamente constantes ao longo de todos os experimentos, com valores médios, respectivamente de: $0,29 \pm 0,01$ bar (coeficiente de variação - CV de 3,4%) e $0,23 \pm 0,01$ bar (CV de 4,3%) para o Experimento E-MF; $0,31 \pm 0,01$ bar (CV de 2,9%) e $0,25 \pm 0,01$ bar (CV de 3,6%) para o Experimento E-MF-R1; e $0,30 \pm 0,02$ bar (CV de 6,1%) e $0,24 \pm 0,02$ bar (CV de 6,8%) para o Experimento E-MF-R2.

O fluxo de permeado, como esperado, foi sendo reduzido do início ao fim dos experimentos. Tal variação está associada à colmatagem dos poros da membrana de MF e à formação de torta de lodo em sua superfície. O fluxo de permeado do Experimento E-MF variou de seu valor máximo de $37,9 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$, obtido aos 15 min de operação, até seu valor mínimo de $28,0 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$, às 5 h de operação, resultando em uma perda de 26,1% da capacidade de produção de água microfiltrada. De maneira análoga, o Experimento E-MF-R1 apresentou variação de fluxo de permeado de

$37,6$ a $29,9 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$, o que corresponde a uma perda de 20,5% da capacidade produtiva. Esse valor é inferior à perda de produção observada para o Experimento E-MF, o que indica um aumento de desempenho operacional para a condição estudada, possivelmente em função da aplicação das retrolavagens.

Para o Experimento E-MF-R2, o fluxo de permeado reduziu-se ao longo do experimento de $39,4 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$, aos 15 minutos de operação, a $24,8 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$, às 10 h de operação. A variação representa uma perda de 37,1% da capacidade de produção de água microfiltrada. Para efeito de comparação com os experimentos anteriores, às 5h de monitoramento o fluxo de permeado do Experimento E-MF-R2 foi de $30,7 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$, correspondendo a uma perda de fluxo de 22,1%. Esse valor é inferior à perda observada no Experimento E-MF (26,1%), porém superior à observada em E-MF-R1 (20,5%).

Em resumo, o fluxo de permeado apresentou valor médio de: $32,4 \pm 3,1 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ (CV de 9,6%) para o Experimento E-MF; $33,6 \pm 2,4 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ (CV de 7,2%)

para o Experimento E-MF-R1; e $31,2 \pm 4,9 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ (CV de 15,8%) para o Experimento E-MF-R2.

O fluxo da água recirculada, constituída pela vazão total de concentrado da unidade de filtração, aumentou gradativamente durante a microfiltração, com elevada variabilidade observada para o parâmetro. Para o Experimento E-MF, o fluxo de concentrado variou de 0,9 (aos 15 min de operação) a $20,6 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ (às 5h de operação) e apresentou valor médio de $11,8 \pm 5,8 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ (CV de 48,9%). O fluxo de concentrado do Experimento E-MF-R1, por sua vez, variou entre 1,2 e $16,1 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$, com valor médio de $8,3 \pm 4,8 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ (CV de 57,6%). Já no Experimento E-MF-R2, o fluxo de concentrado teve início apenas após 90 minutos (1h30m) de monitoramento e aumentou continuamente durante a microfiltração, variando de 6,1 a $33,0 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$, com valor médio de $21,4 \pm 8,0 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ e CV de 37,4%.

Ajustando os valores dos fluxos de permeado e de concentrado a um modelo de regressão linear, pode-se perceber que a taxa de variação (coeficiente angular da reta ajustada) dos mesmos difere significativamente. Para o Experimento E-MF, o fluxo de permeado decaiu a uma taxa de $0,0335 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ por minuto ($R^2 = 0,967$), enquanto o fluxo de concentrado se elevou a uma taxa de $0,0643 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ por minuto ($R^2 = 0,968$). Já para os experimentos com diferentes critérios de retrolavagem (E-MF-R1 e E-MF-R2), nota-se que o fluxo de permeado decaiu a uma mesma taxa de $0,0271 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ para ambos os experimentos ($R^2 = 0,980$ e $0,948$, respectivamente), enquanto o fluxo de concentrado se elevou a taxas próximas de $0,0530 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ($R^2 = 0,968$) para o Experimento E-MF-R1 e $0,0515 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ($R^2 = 0,929$) para o Experimento E-MF-R2.

Em comparação com as taxas obtidas no Experimento E-MF, é possível perceber a influência positiva da aplicação das retrolavagens nas duas condições avaliadas, que fez com que o fluxo de

permeado se reduzisse a uma taxa 19,1% menor, aumentando a produtividade do sistema.

Assim, ambos os métodos de operação com aplicação de retrolavagem se mostraram de equivalente eficiência no desempenho operacional da microfiltração, com maior produção de permeado do que na operação sem retrolavagem. No entanto, em função da maior variabilidade e do maior fluxo de alimentação observados no Experimento E-MF-R2, pode-se recomendar a adoção do protocolo de retrolavagens do Experimento E-MF-R1 (retrolavagem a cada uma hora de operação) a fim de garantir uma operação mais estável do sistema. O aumento da frequência de retrolavagens não irá aumentar significativamente a produção de rejeitos, pois são executadas com baixa vazão e curta duração.

O tanque de alimentação, que recebia a água de estudo e a totalidade do volume de concentrado, foi operado em nível constante para todos os experimentos. Ao final do experimento, em relação à geração de resíduos: (i) para o Experimento E-MF, o volume de concentrado gerado foi de 39,42 L, correspondendo a apenas 6,1% do volume de água microfiltrada (considerando o fluxo médio de permeado e o tempo de operação - 648 L produzidos); (ii) para o Experimento E-MF-R1, o volume total de rejeitos foi de 52,68 L (39,54 L de concentrado e 13,14 L de retrolavagens), o que corresponde a 7,9% do volume de água tratada produzida (666 L); e (iii) para o Experimento E-MF-R2, foi gerado um volume total de resíduos de 46,17 L (39,22 L de concentrado e 6,95 L de retrolavagens), equivalente a 3,7% do volume de água tratada produzida (1245 L).

3.3.2 Parâmetros de Qualidade

Em relação aos parâmetros de qualidade dos permeados produzidos, os valores mínimo, máximo e médio, o desvio padrão e a remoção média (em relação às características iniciais da AE) estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores mínimo, médio e máximo, desvio padrão, coeficiente de variação e porcentagem de remoção dos parâmetros de qualidade dos permeados produzidos

	Parâmetro de Qualidade	AE	Permeado					
			Valor Mín	Valor Máx	Valor Médio*	Desvio Padrão	Coef. de Var. (%)	Remoção média (%)
E-MF	Turbidez (uT)	29,6	0,71	1,40	1,10	0,25	22,9	96,3
	pH	7,02	7,14	7,29	7,20	0,05	0,7	-
	Cor Aparente (uH)	235	10	19	14	3	19,2	94,0
E-MF-R1	Turbidez (uT)	29,6	0,85	1,34	0,98	0,14	14,5	96,7
	pH	7,02	6,95	7,09	6,99	0,04	0,6	-
	Cor Aparente (uH)	235	10	19	15	3	22,1	93,6
E-MF-R2	Turbidez (uT)	29,6	0,62	1,45	1,10	0,29	26,2	96,3
	pH	7,02	6,80	7,22	7,03	0,11	1,6	-
	Cor Aparente (uH)	235	11	24	19	4	20,8	91,9

*Para número de amostras n = 11 (E-MF e E-MF-R1) e 21 (E-MF-R2).

Analisando a Tabela 3, nota-se que o valor de pH do permeado apresentou-se aproximadamente constante ao longo de todos os experimentos, com valores médios de $7,20 \pm 0,05$; $6,99 \pm 0,04$; e $7,03 \pm 0,11$, para os Experimentos E-MF, E-MF-R1 e E-MF-R2, respectivamente. A turbidez, por sua vez, apresentou valores médios de $1,10 \pm 0,25$; $0,98 \pm 0,14$; e $1,10 \pm 0,29$ uT, e elevadas porcentagens de remoção média de 96,3; 96,7; e 96,3%, respectivamente. O mesmo pode ser notado para a cor aparente, cujos valores médios foram de 14 ± 3 ; 15 ± 3 ; e 19 ± 4 uH, com porcentagens de remoção média de 94,0; 93,6; e 91,9%. Tais valores apontam a elevada eficiência da microfiltração na remoção do material em suspensão da água bruta.

De maneira geral, os permeados produzidos pelos experimentos não atenderam ao padrão de potabilidade estipulado pela Portaria nº 888 do MS-GM de 2021 (BRASIL, 2021), uma vez que a turbidez obtida foi maior que 0,1 uT, Valor Máximo Permitido - VMP estabelecido para efluentes de sistemas de filtração em membranas. Vale ressaltar que o referido VMP foi estabelecido somente nesta última atualização da Portaria e não há especificação qualquer sobre o tipo de membrana ou configuração de sistema para os quais deve ser atendido. Por outro lado, sabe-se que a técnica de microfiltração não apresenta capacidade para atingir tais níveis de eficiência em relação à turbidez, podendo-se considerar este VMP

bastante restritivo para tal aplicação. Com relação ao padrão organoléptico, a cor aparente média se enquadrou ao VMP de 15 uH somente para os Experimentos E-MF e E-MF-R1. Assim, faz-se necessária a adoção de técnica complementar de remoção dos sólidos dissolvidos do permeado, como por exemplo a associação de membrana densa de Nanofiltração ou Osmose Inversa.

4 CONCLUSÕES

A condição de operação da microfiltração sem retrolavagens (Experimento E-MF) apresentou o pior desempenho operacional dentre os cenários avaliados, com a maior taxa de redução do fluxo de permeado ($0,0335 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$).

As duas condições de aplicação de retrolavagens intermitentes ao longo da filtração (Experimento E-MF-R1 e E-MF-R2) diminuíram a taxa de redução de fluxo de permeado na mesma proporção ($0,0271 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$), provocando, assim, o aumento de produtividade do sistema.

A aplicação de uma retrolavagem a cada hora de operação (Experimento E-MF-R1) foi a condição que promoveu a maior estabilidade de operação, sendo, então, a recomendada para aplicação em escala real.

Em relação aos parâmetros de qualidade, a técnica de microfiltração se comprovou eficiente na remoção do material suspenso na água bruta, com remoções máximas de 96,7% de turbidez e 94,0% de cor aparente, mas não suficiente para o atendimento do padrão de potabilidade da Portaria nº 888 do MS-GM de 2021, exigindo, assim, a associação de membranas densas de nanofiltração ou osmose inversa, ou outra etapa de pós-tratamento.

5 FONTES DE FINANCIAMENTO

CAPES e Fundação Araucária.

6 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Conceitualização: Galvão RB, Kawata RM e Kuroda EK; **Metodologia:** Galvão RB, Kawata RM, Akioma AC, Nader ZSO e Kuroda EK; **Investigação:** Galvão RB, Kawata RM, Akioma AC e Nader ZSO; **Redação – Primeira versão:** Galvão RB; **Redação – Revisão & Edição:** Galvão RB e Kuroda EK; **Aquisição de Financiamento:** Kuroda EK e Fernandes F; **Recursos:** Kuroda EK e Fernandes F; **Supervisão:** Kuroda EK.

7 REFERÊNCIAS

APHA; AWA; WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23 ed. Washington, DC: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation 2017. 1496 p.

BRASIL. MINISTÉRIO DA SAÚDE. GABINETE DO MINISTRO. **Portaria nº 888**, de 04 de maio de 2021. Brasília: Ministério da Saúde, 2021.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. Di B.; VOLTAN, P. E. N. **Métodos e Técnicas de Tratamento de Água**. 3 ed. São Carlos: LDiBe, 2017.

FARIA, P. C. **Obtenção e caracterização de membranas assimétricas com pele densa à base de poliácrlonitrila**. 80 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Biomédica). Universidade do Vale do Paraíba. São José dos Campos, São Paulo. 2011.

JUDD, S. J.; CARRA, I. Low-pressure membrane technology for potable water filtration: true costs. **Water Research**, v. 191, p. 116826, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.116826>

LI, N.N.; FANE, A.G.; HO, W.S.W.; MATSUURA, T. **Advanced Membrane Technology and Applications**. John Wiley & Sons, Inc., Publication. USA. 2008.

LIU, M.; WANG, S.; WANG, T.; DUAN, M.; SU, Y.; HAN, H.; LIN, X.; LI, Z. Application of microfiltration–nanofiltration combined technology for drinking water advanced treatment in a large-scale engineering Project. **Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua**, v. 70, p. 619-636, 2021. <https://doi.org/10.2166/aqua.2021.020>

METCALF, L.; EDDY, H. P. **Tratamento De Efluentes E Recuperação De Recursos**. 5ª edição. Tradução: Ivanildo Hespanhol, Jose Carlos Mierzwa. Bookman. 2016.

NGUYEN, M. N.; HÉRVAS-MARTÍNEZ, R.; SCHÄFER, A. I. (2021). Organic matter interference with steroid hormone removal by single-walled carbon nanotubes - ultrafiltration composite membrane. **Water Research**, v.199, p.117148. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117148>

PLAKAS, K. V.; KARABELAS, A. J. Removal of pesticides from water by NF and RO membranes - A review. **Desalination**, v. 287, p. 255-265, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2011.08.003>

RODRIGUEZ-MOZAZ, S.; RICART, M.; KÖCK-SCHULMEYER, M.; GUASCH, H.; BONNINEAU, C.; PROIA, L.; BARCELÓ, D. Pharmaceuticals and pesticides in reclaimed water: efficiency assessment of a microfiltration–reverse osmosis (MF–RO) pilot plant. **Journal of hazardous materials**, v.282, p.165-173. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.09.015>

SCHNEIDER, R. P.; TSUTIYA, M. T. **Membranas filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reúso**. 1ª ed. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001.

ŞENGÜL, A. B.; ERSAN, G.; TÜFEKÇI, N. Removal of intra-and extra-cellular microcystin by submerged ultrafiltration (UF) membrane combined with coagulation/flocculation and powdered activated carbon (PAC) adsorption. **Journal of hazardous materials**, v.343, p.29-35. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.09.018>

SIMÕES, C. P. P. **Avaliação operacional e remoção de bisfenol-a no tratamento de água por diferentes tipos de membranas: avaliação em escala piloto**. 2016. 202 p.

YOO, Sung Soo et al. Operating cost reduction of UF membrane filtration process for drinking water treatment attributed to chemical cleaning optimization. **Journal of environmental management**, v. 206, p. 1126-1134, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.02.072>

ZHANG, J.; NGUYEN, M. N.; LI, Y., YANG, C.; SCHÄFER, A. I. Steroid hormone micropollutant removal from water with activated carbon fiber-ultrafiltration composite membranes. **Journal of hazardous materials**, v.391, p.12. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122020>