

Reúso potável direto – estudo de viabilidade técnica em unidade piloto

Direct potable water reuse – Technical feasibility study using a pilot plant

Ivanildo Hespanhol/Raphael Rodrigues/José Carlos Mierzwa

DOI: 10.4322/dae.2019.026

Resumo

Considerando a escassez de água na Região Metropolitana de São Paulo, uma alternativa que está se tornando mais econômica e tecnicamente viável é o reúso de água. Considerando os problemas associados a dois anos consecutivos de escassez de chuvas (2014 e 2015), este estudo, apoiado pelo Comitê de Bacias do PCJ (Piracicaba-Capivari-Jundiaí), teve como foco a avaliação do reúso direto de água, considerando o uso do efluente tratado da Estação de Tratamento de Águas Residuárias Capivari (ETAR) - Capivari II, que utiliza a Tecnologia de Biorreatores de Membrana. A avaliação foi realizada por meio da operação e do monitoramento constante de uma planta piloto operando com a combinação de quatro tecnologias de tratamento: osmose reversa (OR), processos oxidativos avançados (POA), carvão ativado granular (CAG) e carvão ativado biológico (CAB). O arranjo da planta piloto permitiu a avaliação de cinco diferentes configurações de tratamento: OR, OR/POA, OR/CAG, OR/POA/CAG e CAB. Cada arranjo foi testado por pelo menos duas semanas em períodos de verão e inverno. O experimento também permitiu uma operação de curta duração com membranas de OR de baixa pressão, com melhor desempenho em termos de consumo de energia, sem alteração significativa na qualidade do permeado em comparação com a membrana de OR de alta pressão. Amostras de água foram coletadas em pontos específicos da planta piloto para serem analisadas de acordo com os padrões brasileiros de qualidade de água potável. O monitoramento mostrou que os efluentes da ETAR cumprem todos os padrões de qualidade da água potável. Considerando as preocupações com poluentes emergentes, este estudo também avaliou compostos como N-Nitrosodimetilamina (N-NDMA), risco de mutagenicidade e presença de vírus entéricos. Os resultados mostraram que, independentemente do arranjo em operação, o efluente tratado não apresentava vírus ou atividade mutagênica, e a concentração de N-NDMA estava abaixo do limite de detecção do método. Considerando os resultados obtidos até o momento e considerando as questões relativas a desreguladores endócrinos, foram realizados mais testes para a avaliação do potencial estrogênico e androgênico utilizando triagem de estrogênio em levedura e ensaios de triagem de andrógenos em levedura, que não indicaram a presença de potencial estrogênico ou androgênico nas amostras analisadas. Com essa abordagem, este estudo pretende ser uma referência de informação para novas discussões sobre as possibilidades de reúso direto potável no país.

Palavras-chave: Reúso potável. Tratamento de água. Tecnologias avançadas.

Ivanildo Hespanhol – Engenheiro. Professor Titular da Escola Politécnica da USP. Fundador e Diretor do Centro Internacional de Referência em Reúso de Água - CIRRA/IRCWR/USP.

Raphael Rodrigues – Engenheiro Ambiental formado pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Pesquisador Visitante na Harvard School of Engineering and Applied Sciences). Doutor em Ciências - Programa de Engenharia Civil - Área de Concentração Engenharia Hidráulica/Saneamento Básico.

José Carlos Mierzwa – Pós-doutorado na Escola de Engenharia e Ciências Aplicadas de Harvard. Livre-docência e doutorado pela Universidade de São Paulo. Mestrado em Tecnologia Nuclear pela Universidade de São Paulo. Graduado em Engenharia Química pela Universidade de Mogi das Cruzes.

***Endereço para correspondência:** Centro Internacional de Referência em Reúso de Água - Escola Politécnica de Universidade de São Paulo - Av. Professor Lúcio Martins Rodrigues, 120 - Butantã - São Paulo - SP. E-mail: cirra@usp.br ou mierzwa@usp.br.

Abstract

Considering the short supply of water in São Paulo's Metropolitan Region, an alternative that is becoming more economically, and now technically, feasible is water reuse. Considering the problems associated with two consecutive years, 2014 and 2015, of rainfall shortage, this study, supported by the Comitê de Bacias do PCJ (Piracicaba-Capivari-Jundiá Basin Comitee), focused on the evaluation of direct potable reuse considering the use of the treated effluent from the Capivari II Wastewater Treatment Plant (WWTP) that uses the Membrane Bioreactor Technology. The evaluation was conducted through the operation and constant monitoring of a pilot plant operating with the combination of four treatment technologies, reverse osmosis (RO), advanced photochemical oxidation process (APO), granular activated carbon (GAC) and biological activated carbon (BAC). The pilot plant arrangement allowed the evaluation of five different treatment configurations, RO, RO/APO, RO/GAC, RO/APO/GAC and BAC. Each arrangement was tested for at least two weeks, in the winter and summer seasons. The experiment also allowed a short time operation with low pressure RO membranes with a better performance in terms of energy consumption without significant change in the permeate quality, compared to the high-pressure RO membrane. Water samples were collected from specific points at the pilot plant to have it analyzed according to the Brazilian drinking water quality standards. The monitoring along all the evaluation period showed the effluent from the WWTP comply with all, but color and heterotrophic bacteria, drinking water quality standards. For all, but the BAC, evaluated arrangements the treated water fully complied with the Brazilian drinking water quality standards. However, chemiluminescence toxicity assay indicated that the only treatment arrangement that produced a treated water with no toxicity after chlorination was the RO/AOP. Considering the concerns for emerging pollutants, this study also evaluated compounds such as N-Nitrosodimethylamine (N-NDMA), risk of mutagenicity and presence of enteric viruses. Results showed that regardless of the arrangement in operation, the treated effluent did not have viruses or mutagenic activity, and the concentration of N-NDMA was below the method detection limit. In addition, the evaluation of estrogenic and androgenic potential using yeast estrogen screening and yeast androgen screening assays (YES/YAS) also demonstrated the effectiveness of the treatment array evaluated. With this approach, this study aims to be a reference of information for further discussions about the possibilities of direct potable reuse in the country.

Keywords: Potable reuse. Water treatment. Arrangements. Advanced technologies.

1 INTRODUÇÃO

A região metropolitana de São Paulo está situada em um planalto a cerca de 700 metros acima do nível do mar, na cabeceira da Bacia do Alto Tietê. Os recursos hídricos disponíveis estão longe das necessidades de mais de 21 milhões de habitantes e do maior conglomerado industrial da América Latina. O fornecimento é pouco satisfatório e ocorre com a importação de água de bacias vizinhas e distantes a altos custos de bombeamento. Um deles, ainda em construção, tem cerca de 100 km de comprimento, precisando de carga de bombeamento de 360 m para alcançar o planalto.

Em condições normais, a demanda por abastecimento de água em São Paulo é de cerca de 61 m³/s, e cerca de 19,5% correspondem às perdas físicas e não físicas (perdas de faturamento). Portanto, a necessidade de fontes alternativas de água é iminente. Aproximadamente 43 m³/s de esgotos estão disponíveis como uma potencial fonte de água. No entanto, a capacidade de tratamento de esgotos em nível secundário é de 18 m³/s, resultando no despejo direto da carga remanescente nos rios da Região Metropolitana de São Paulo e na Bacia do Médio Tietê.

Os anos de 2014 e 2015 foram bastante críticos para todos os estados da região sudeste do Brasil, incluindo a Região Metropolitana de São Paulo. No período de 2013 a 2014, a pluviosidade na RMSP foi a menor observada desde o período de 1943-1944 [1], o que chamou a atenção para o problema da escassez de água na região.

A primeira proposta feita pelos tomadores de decisão foi executar projetos para reutilização indireta de água potável, o que necessita de estudos mais aprofundados para a região, já que a maior parte dos reservatórios utilizados como atenuadores ambientais apresenta maiores riscos quanto à poluição, inclusive com poluentes emergentes, como disruptores endócrinos, produtos farmacêuticos, compostos químicos e cosméticos.

Em outros países, como Austrália e Estados Unidos, o problema de escassez de água vem sendo abordado de maneira diferente, com a inclusão da possibilidade da prática do reúso potável direto, o qual traz diversos benefícios em relação às outras formas de reúso [2]. Com base nessas experiências, a Organização Mundial da Saúde publicou uma diretriz específica para o reúso potável direto [3].

Do ponto de vista tecnológico, a prática do reúso potável direto não é uma limitação, uma vez que é possível adotar diferentes combinações de processos e operações unitárias para a sua viabilização [4].

Para superar as limitações de um programa indireto de reúso, o Comitê de Bacias do Piracicaba, Capivari e Jundiá decidiu apoiar uma pesquisa voltada para reúso direto de água potável. O Centro Internacional de Referência em Reúso de Água - CIRRA, foi responsável pela realização desta pes-

quisa, incluindo a concepção e operação de uma planta piloto instalada próxima a uma estação de tratamento de águas residuais projetada como um biorreator de membrana (MBR) com membranas de ultrafiltração de fibra oca. Esta unidade é de propriedade da Sanasa Campinas, Companhia de Água da Cidade de Campinas, responsável pelo abastecimento de água e coleta e tratamento de esgoto na região.

Após a decisão sobre a pesquisa sobre reúso direto de água, foi idealizada e montada uma versátil unidade de tratamento de água que poderia combinar diferentes tecnologias de tratamento a serem testadas na Estação de Tratamento de Efluentes Capivari II, conforme detalhado nas próximas seções.

2 MÉTODOS

2.1 Unidade de tratamento piloto

A planta piloto, com capacidade de tratamento de 700 L/h, abrange 4 diferentes tecnologias de tratamento, osmose reversa (OR), processo de oxidação fotoquímica avançada (POA), carvão ativado granular (CAG) e carvão ativado biológico (CAB), seguido de um processo de desinfecção (D). Esse conjunto permitiu que a planta piloto operasse sob cinco configurações diferentes: (1) OR e D; (2) OR, POA e D; (3) OR, CAG e D; (4) OR, POA, CAG e D; e (5) CAB (linha paralela) e qualquer combinação das configurações anteriores. Para evitar o crescimento microbológico na unidade de OR, uma unidade de desinfecção ultravioleta foi incorporada ao sistema. A figura 1 apresenta um fluxograma da unidade piloto.

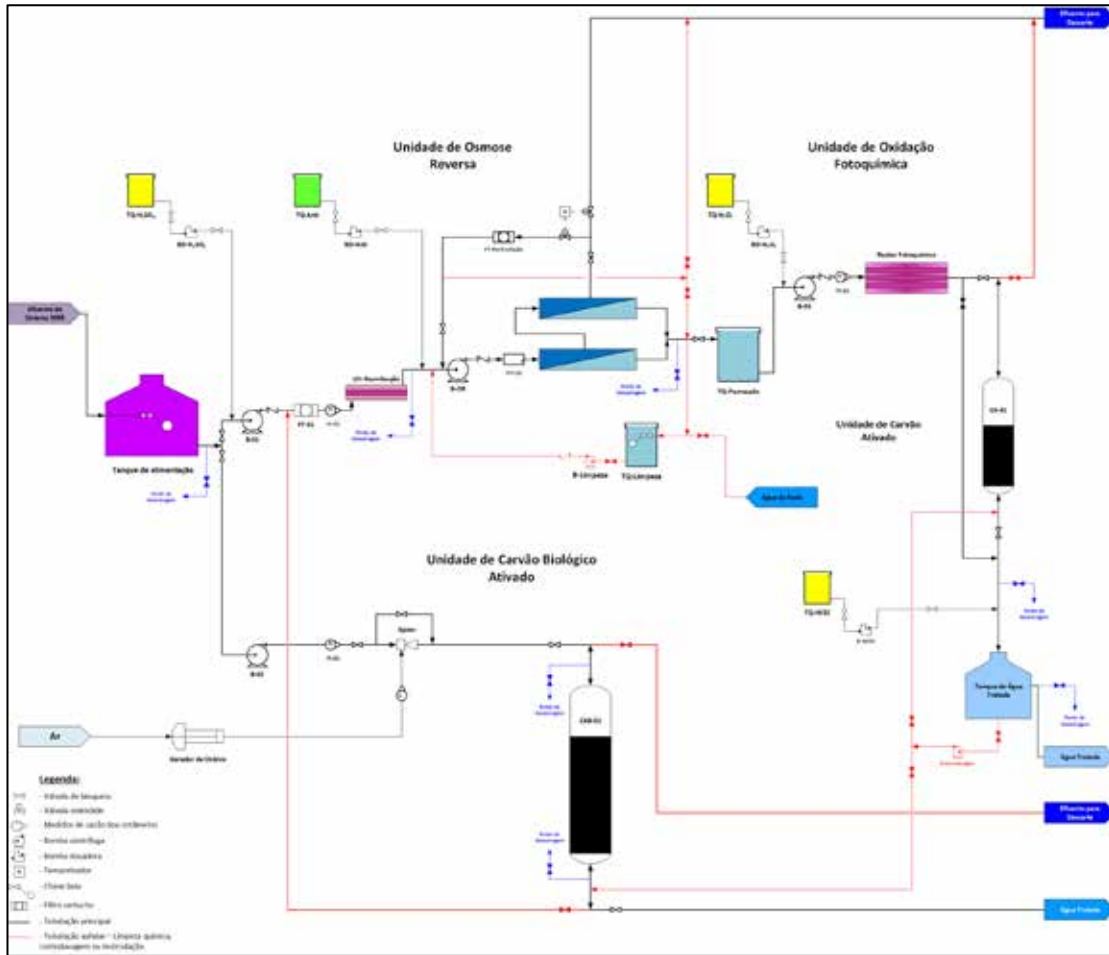


Figura 1 – Fluxograma da Unidade Piloto

Os arranjos poderiam ser facilmente alterados mudando a direção do fluxo de efluentes através da unidade, por meio da abertura ou fechamento de válvulas específicas mostradas no fluxograma da Figura 1. Por exemplo, para teste do arranjo RO / GAC, a unidade de oxidação fotoquímica é desenergizada e as válvulas localizadas em sua linha de saída são operadas para direcionar o fluxo para a unidade GAC. Qualquer outra configuração pode ser testada com a manobra de válvulas específicas. Essa flexibilidade permitiu operar a unidade piloto com diferentes combinações de processos, o que foi importante para avaliar a eficiência de cada uma delas e identificar o arranjo mais adequado para a produção de água potável.

2.2 Avaliação de Parâmetros Operacionais

A avaliação dos parâmetros operacionais da unidade piloto foi feita por meio de monitoramento contínuo da unidade piloto e da coleta de dados dos instrumentos instalados e armazenagem em Datalogger, com interface remota para transmissão por internet móvel.

O principal benefício do uso do registrador de dados é sua capacidade de registrar e transmitir automaticamente os dados obtidos dos instrumentos de monitoramento. Após a ativação e calibração correta de todos os sensores envolvidos, o Registrador de Dados coletou, registrou e transmitiu os dados de pressão de operação, vazão e

pH da alimentação, vazão de recirculação e vazão e temperatura do permeado. O procedimento automatizado de monitoramento minimizou a necessidade de supervisão pelos operadores locais, além de garantir um monitoramento completo e preciso, já que o registrador de dados armazenava os dados recebidos dos sensores a cada três minutos. Essa configuração forneceu uma visão completa e precisa das condições de operação da unidade piloto, sem a intervenção dos operadores.

No estudo, a qualidade da água foi avaliada em dois períodos do ciclo hidrológico, considerados os mais críticos: inverno e verão. Após a avaliação preliminar da qualidade e desempenho do período hidrológico seco (inverno), as membranas de osmose reversa utilizadas foram substituídas por um módulo de membranas de baixa pressão.

A operação da unidade piloto com esse módulo permitiu avaliar o desempenho do sistema e o consumo de energia para operação. Após o período de operação com o módulo de baixa pressão, as membranas foram substituídas pelas membranas utilizadas na primeira campanha, para a avaliação do período de chuvas (verão).

Os parâmetros de desempenho operacional avaliados durante essa campanha de monitoramento foram:

a) Pressão: Sob condições normais (sem biofilme nas membranas), o aumento da pressão leva ao aumento da produtividade [5]. No entanto, se houver formação de biofilme na superfície das membranas, o aumento da pressão pode causar efeitos adversos, danificando a membrana. Neste caso, é necessário suspender a operação para realizar a limpeza química da unidade [6]. Aumentar a pressão no sistema sem aumentar a produtividade indica resistência para passagem de água [7, 8]. Essa resistência pode ser criada pela formação de biofilme ou incrustação inorgânica. Após a limpeza química da unidade, é possível verificar a recuperação das condições de pressão do sistema.

b) Temperatura do permeado: A temperatura da água é fundamental para avaliar a produtividade do sistema de membranas. Com a diminuição da temperatura há aumento da viscosidade da água e, portanto, aumento na resistência ao fluxo [9, 10]. Dessa forma, o sensor de temperatura mede a temperatura para que o fluxo de permeado possa ser normalizado em função da temperatura. Neste estudo, a temperatura média de 25°C foi adotada como referência para normalização.

c) pH da alimentação: o pH é uma variável química que indica a presença de íons H⁺ e OH⁻ em uma solução. É uma variável importante para garantir a eficiência dos processos físico-químicos e evitar incrustações na membrana [10, 11]. O pH de entrada foi monitorado por sensor e seu valor foi mantido próximo de 6,5 com o uso da dosagem de ácido sulfúrico quando necessário.

d) Vazões de alimentação, recirculação e de permeado: os fluxos de entrada, recirculação e de permeado foram medidos e monitorados para ajustar o balanço de massa do sistema. Para evitar sobrecarga, a operação correta do sistema leva em consideração a porcentagem de fluxo que recircula pelo sistema e a porcentagem que é descartada.

Com base nos dados coletados pelos instrumentos de monitoramento, foram calculados os seguintes parâmetros de desempenho:

a) Permeabilidade da membrana: a avaliação da pressão de operação permite verificar a relação entre a vazão de permeado produzido por unidade de área de membrana pela pressão aplicada. É uma avaliação direta da produtividade do sistema em função da pressão. É calculada de acordo com a equação I:

$$P = \frac{Q_p}{A \times \Delta p} \quad (I)$$

Na qual, P = permeabilidade da membrana (L/m².h.bar), Q_p = vazão de permeado (L/h),

A = área do módulo de membrana (m²) e Δp = pressão de operação (bar).

b) Taxa de recuperação da membrana: a taxa de recuperação da membrana associa o fluxo de permeado recuperado pelo fluxo de entrada no sistema. É calculada de acordo com a equação II:

$$T_R = \frac{Q_p}{Q_a} \quad (II)$$

$$Q'_p = \frac{Q_p \times (3,04 \cdot 10^{-11} T^4 - 8,677 \cdot 10^{-9} T^3 + 9,658 \cdot 10^{-7} T^2 - 5,532 \cdot 10^{-5} T + 1,793 \cdot 10^{-3})}{8,9 \cdot 10^{-4}} \quad (III)$$

Na qual: T = temperatura do permeado (°C), Q_p = vazão de permeado a uma temperatura T (L/h), Q'_p = vazão de permeado normalizada a temperatura de 25 °C (L/h).

Os resultados operacionais obtidos são apresentados em função da pressão de operação, temperatura do permeado, taxa de fluxo de recirculação e permeação, permeabilidade da membrana, taxa de recuperação da membrana e vazão normalizada.

2.3 Qualidade da Água

A operação da unidade piloto foi dividida em duas campanhas: a estação seca e a estação chuvosa (ou inverno e verão, respectivamente). Essa distinção se deve às características particulares de qualidade do afluente. No período seco, há um aumento na concentração da Demanda Biológica de Oxigênio (DBO) e outros parâmetros de qualidade que podem afetar o desempenho da unidade. No período de verão (chuvoso), há maior diluição. Dessa forma, a avaliação crítica do desempenho do tratamento em ambos os períodos é ideal para

Na qual, TR = taxa de recuperação de membrana (%), Q_p = vazão de permeado (L/h) e

Q_a = vazão de alimentação (L/h).

c) Vazão de permeado normalizada: a vazão de permeado é normalizada para a temperatura de 25°C, a fim de obter a produtividade da membrana independentemente da viscosidade da água. A vazão normalizada é calculada de acordo com a equação III.

dimensionar um sistema eficiente, independentemente do cenário inicial considerado.

A análise de qualidade considerou a legislação brasileira de potabilidade (Portaria MS 2914) e variáveis não incluídas na legislação, como toxicidade (*Vibrio Fischeri*) e N-Nitrosodimetilamina (N-NDMA). Também foram realizados testes para avaliar os riscos de mutagenicidade da água (método AMES) e análises para avaliação de vírus entéricos destinados a avaliar a presença de vírus nocivos na água. Amostras também foram coletadas para avaliação do potencial de estrogenicidade e androgenicidade da água, devido à presença de compostos químicos diversos, como hormônios e outros fármacos.

A amostragem ocorreu com base nos diferentes arranjos estabelecidos. As amostras da alimentação foram coletadas a cada duas semanas (saída da ETE Capivari II, antes da cloração) e semanal-

mente após a Unidade de OR ou após as demais unidades subsequentes POA ou CA (quando estas estavam em operação) e após a cloração.

Amostras coletadas para avaliação da potabilidade, toxicidade, N-NDMA e mutagenicidade foram encaminhadas para o laboratório analítico da Merieux Nutrisciences, laboratório certificado em Campinas, São Paulo, capaz de realizar a análise. A avaliação dos vírus foi feita no Departamento de Microbiologia da Universidade de São Paulo (Instituto de Ciências Biomédicas), e a avaliação de hormônios, em laboratórios do Departamento de Far-

mácia da Universidade de São Paulo, utilizando-se o kit XenoScreen XL YES/YAS da Xenometrics AG.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Parâmetros Operacionais

A Figura 2 mostra o gráfico diário de desempenho de pressão média para o período entre 30/05/2016 a 30/11/2016, seguido pelo fluxo de permeado normalizado. A apresentação conjunta desses dados permite uma avaliação da produção do sistema em relação à pressão operacional aplicada.

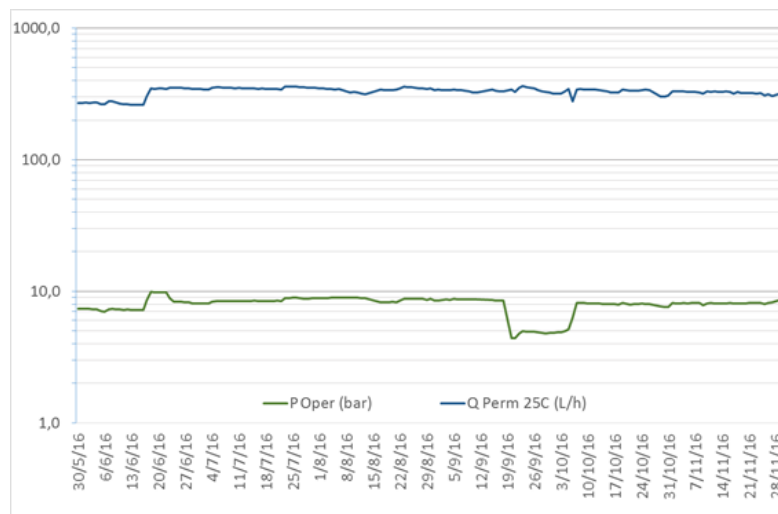


Figura 2: Fluxo de Pressão Operacional e Permeado

Durante a primeira campanha de monitoramento da operação (30/05 a 15/06), houve um ajuste da pressão de operação para otimizar o fluxo de permeado produzido e uma etapa de limpeza química e sanitização das membranas em 24/06. Uma vez atingida a condição operacional ideal após a limpeza das membranas, a pressão foi mantida constante.

Durante o mês de julho, a unidade piloto operou com pressão praticamente constante durante todo o período. Em meados de agosto, foi realiza-

do um procedimento para limpar a unidade e recuperar a pressão de operação e a produção média de permeado. No período compreendido entre 10/09 e 05/10, o sistema de osmose operou com uma membrana de baixa pressão, para verificar o seu desempenho.

Durante o período avaliado, a pressão média foi de $8,3 \pm 0,6$ bar. A média durante o período de operação a baixa pressão foi de $4,8 \pm 0,2$ bar, representando uma redução média de 42% na pressão operacional.

A Figura 3 mostra o gráfico da temperatura do permeado e das condições de fluxo do permeado. Observa-se que a temperatura influencia diretamente o fluxo de permeado medido. Portanto, a

normalização da temperatura foi realizada para avaliar os efeitos da pressão e formação de biofilme no sistema. Para o período avaliado, a temperatura média foi de $26,1 \pm 1,3^{\circ}\text{C}$.

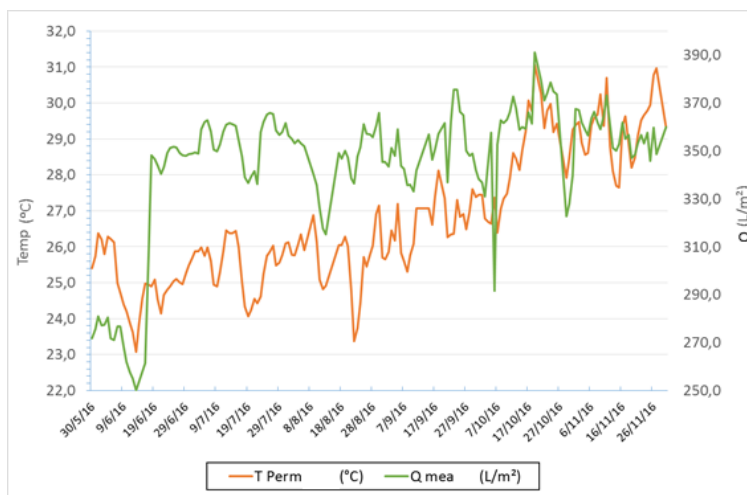


Figura 3: Fluxo de Temperatura e Permeado (medido)

O pH medido variou de 6,3 a 6,8, com uma média de $6,4 \pm 0,1$. O pH esteve dentro do intervalo estabelecido para condições de efeito anti-incrustante adequadas. Devido a uma falha do sensor, as medições de pH foram feitas por equipamento portátil durante a coleta das amostras, preservando as condições ideais de operação e coleta.

A Figura 3 mostra o monitoramento das vazões de alimentação, recirculação e de permeado. Durante o primeiro ciclo de operação, as condições de pressão e produtividade foram ajustadas. Após o ajuste, as condições de produtividade do sistema permaneceram constantes durante todo o período avaliado. Tais condições são devidas a aplicações corretas de paradas para limpeza química do sistema e monitoramento da pressão de operação.

Durante o período de operação com membranas de baixa pressão, a produção de permeado permaneceu constante, com a necessidade de redução da vazão de alimentação e recirculação para manutenção da vazão de permeado próxima à média obtida no primeiro período.

As vazões médias são apresentadas na Tabela 1. Observa-se que as membranas de baixa pressão apresentaram melhor desempenho médio do que as membranas avaliadas.

Tabela 1: Vazões de Alimentação, Recirculação e de Permeado (normalizadas)

	Q. Alim (L/h)	Q. Recirc (L/h)	Q. Perm 25°C (L/h)
Alta Pressão	1330 ± 82	1023 ± 53	331 ± 29
Baixa Pressão	1016 ± 84	722 ± 80	353 ± 14
Diferença	- 23,6 %	- 29,4 %	+ 6,6%

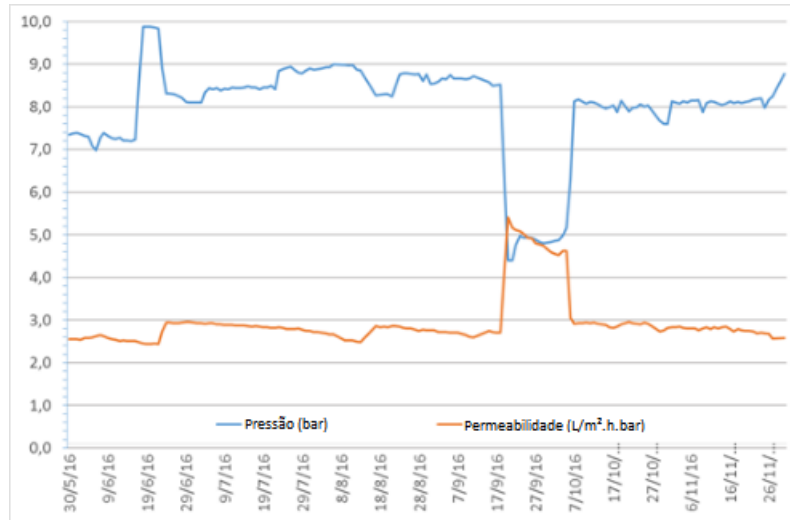


Figura 4: Pressão Operacional e Permeabilidade da Membrana

A taxa média de recuperação da membrana de alta pressão foi de $24,9 \pm 1,5\%$. Houve queda da recuperação no período entre 23/06 e 14/08 (Figura 5). No período entre 09/08 e 16/08, o sistema passou por uma manutenção devido a uma parada em um temporizador no painel de operação. Esse desligamento implicou na diminuição

do fluxo produzido nesse curto período. Após a reparação do dispositivo, a taxa de recuperação da membrana foi restabelecida.

Para que o sistema continuasse a operar sob as mesmas condições de fluxo, mas utilizando membranas de baixa pressão, a taxa de recuperação de água pela membrana foi ajustada para a média de $35,4 \pm 3,5\%$.

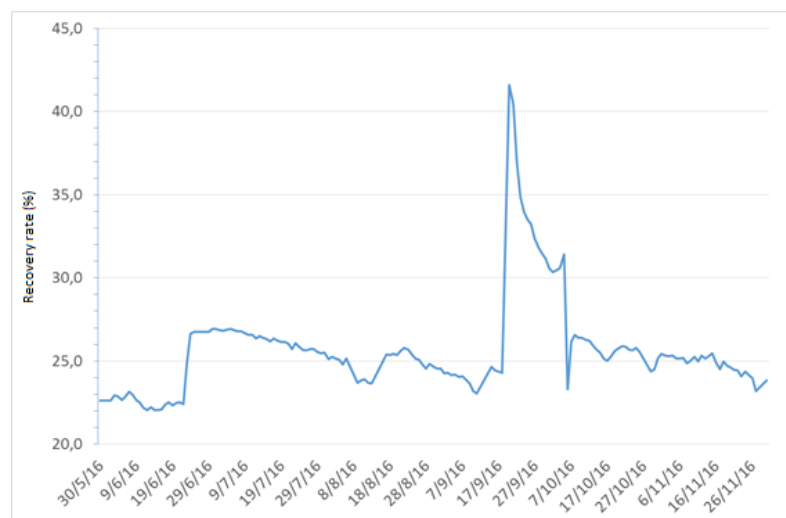


Figura 5: Taxa de Recuperação da Membrana

Pela análise dos resultados, verifica-se que as condições de operação da unidade de osmose reversa mantiveram-se estáveis ao longo da realização dos dois períodos de operação estabelecidos, tempo seco e tempo úmido, o que demonstra sua robustez. As operações de limpeza química, realizadas em períodos adequados, é fundamental para assegurar o desempenho das membranas de osmose reversa.

3.2 Qualidade da Água

Os resultados da análise de conformidade com a Portaria 2914/2011, atual Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5, de 28/09/2017 do Ministério da Saúde, mostram que a qualidade do efluente final do MBR da ETE Capivari II está de acordo com a grande maioria das variáveis. Os parâmetros não conformes foram bactérias de cor e heterotróficas aparentes (ambas em discordância em 2 de 6 amostras da alimentação do sistema).

Em relação ao desempenho das membranas, ambos os módulos foram capazes de adaptar a água aos padrões estabelecidos pelo Ministério da Saúde, removendo cor, coliformes e *E. coli*. Outros compostos detectados em níveis inferiores aos valores máximos estabelecidos pela legislação foram totalmente removidos (ou seja, ferro, manganês, níquel, zinco, sulfato e nitrato).

O pH de algumas amostras do efluente tratado está levemente abaixo do limite mínimo estabelecido por lei (de 5,5 para 5,8 quando o mínimo recomendado é 6,0). A correção de pH é um procedimento simples e pode ser feito após a etapa

de cloração para resolver esse problema. O pH, na faixa de valores obtidos, não é uma variável que apresenta riscos à saúde humana, mas pode resultar em problemas de corrosão na tubulação de distribuição de água ou outros componentes metálicos, mas que pode ser facilmente corrigido, prática comum em estações de tratamento de água para abastecimento.

Os resultados de qualidade são devidos à alta qualidade da alimentação para a unidade de osmose reversa (esgoto tratado por um sistema de biorreator de membrana - MBR). Quanto aos compostos detectados na alimentação, as unidades complementares tiveram desempenho significativo na remoção de bactérias heterotróficas (100%), sulfato (99%), manganês (> 98%), sólidos totais dissolvidos (95%), sódio (94%), dureza total (> 93%), cor aparente (> 88%), alumínio (42%), níquel (> 37%) e zinco (28%).

Os resultados das análises de toxicidade indicaram toxicidade na maioria das amostras após a cloração (Quadro 2). Amostras que não sofreram cloração, como amostras da alimentação do sistema, OR, POA, CAG e CAB, não mostraram toxicidade.

Destaca-se que os únicos arranjos testados que não resultaram em toxicidade química da água produzida após o processo de cloração foram aqueles que utilizaram a sequência OR, POA e de CAB. A possível causa para esse desempenho está relacionada à capacidade dos processos de oxidação utilizados, oxidação fotoquímica e ozonização, na degradação de compostos que poderiam reagir com o cloro na desinfecção e formar subprodutos tóxicos.

Tabela 2 - Resultados para ensaios de toxicidade

	Aliment.		Antes CI		Depois CI		Aliment.		Antes CI		Depois CI	
	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso
	OR + D						OR + POA + D					
CE 20	ND	-	ND	ND	15,5	32,9	ND	-	ND	ND	ND	ND
CE 50	ND	-	ND	ND	65,6	64,5	ND	-	ND	ND	ND	ND
UT	ND	-	ND	ND	1,5	1,5	ND	-	ND	ND	ND	ND
FT	1	-	1	1	8	4	1	-	1	1	1	1
	RO + CAG + D						RO + POA + CAG + D					
CE 20	-	-	ND	ND	25,1	15,7	ND	ND	ND	34,6	ND	24,3
CE 50	-	-	ND	ND	66,1	ND	ND	ND	ND	98,8	ND	61,8
UT	-	-	ND	ND	1,5	ND	ND	ND	ND	1,01	ND	1,6
FT	-	-	1	1	4	4	1	1	1	4	1	8
	CAB											
CE 20	-	ND	-	ND	-	ND						
CE 50	-	ND	-	ND	-	ND						
UT	-	ND	-	ND	-	ND						
FT	-	1	-	1	-	1						

CE20 = concentração que causa 20% de inibição de bioluminescência
 CE 50 = concentração que causa 50% de inibição de bioluminescência
 UT = Unidade de Toxicidade
 FT = Fator de Toxicidade
 - = Não avaliado no arranjo considerado

Os resultados das análises de N-NDMA não indicaram a presença deste composto ou de seus precursores em concentrações maiores que os níveis de detecção do método em qualquer uma das amostras (estágios de alimentação e intermediários).

O teste de mutagenicidade (teste AMES) na alimentação e na saída da osmose indicou que não há potencial mutagênico para nenhuma das amostras.

Não houve detecção de presença viral para vírus entéricos (especificamente adenovírus) por reação em cadeia da polimerase (PCR) em qualquer uma das amostras de efluente tratado.

Por fim, os resultados das análises realizadas em amostras da alimentação e em diversas etapas do tratamento avançado para reúso potável na ETE Capivari II apontam que não há detecção de hormônios naturais e sintéticos na água.

Esse resultado reforça a qualidade de tratamento alcançada pelo sistema de MBR em operação na ETE e pela unidade de reúso potável instalada na

saída do sistema, aumentando o nível de segurança do tratamento avançado.

4 CONCLUSÕES

A unidade piloto foi avaliada por um período de aproximadamente 7 meses. Inicialmente, foi necessário operar o sistema para estabelecer condições constantes de produtividade, com aumento da pressão do sistema. A partir de então, o sistema passou a operar com desempenho constante, com pequena queda de produtividade, como esperado.

Durante o período foram realizadas duas paradas programadas para limpeza química e restabelecimento dos parâmetros operacionais. Observou-se que as membranas apresentaram desempenho operacional constante, sem apresentar problemas estruturais causados pelo aumento da pressão no sistema. Assim, considera-se que o desempenho da unidade piloto foi satisfatório para todo o período de operação contemplado neste estudo.

A alta qualidade do esgoto tratado utilizado na alimentação da unidade piloto foi um fator fundamental para adequada operação das unidades de tratamento complementares, permitindo assegurar a qualidade do efluente tratado em um cenário de abastecimento por meio de reúso potável direto. Quanto aos compostos detectados na alimentação, as unidades complementares tiveram desempenho significativo na remoção de bactérias heterotróficas (100%), sulfato (99%), manganês (> 98%), sólidos totais dissolvidos (95%), sódio (94%), dureza total (> 93%), cor aparente (> 88%), alumínio (42%), níquel (> 37%) e zinco (28%).

N-NDMA, Mutagenicidade (teste AMES) e análise de vírus entéricos não relataram anormalidades de qualidade nem na alimentação nem durante os diferentes arranjos de tratamento. Com relação à presença de hormônios, não foi detectada atividade de compostos estrogênicos em nenhuma das amostras analisadas.

Em relação ao uso de membranas de baixa pressão, houve uma redução média de 43% na pressão de operação comparando ao módulo de alta pressão. Apesar da redução de pressão, o sistema operou com aproximadamente o mesmo fluxo de permeado que o sistema de alta pressão. Houve um aumento significativo de aproximadamente 77% na permeabilidade do sistema.

O reflexo mais notável dessa redução de pressão e aumento da permeabilidade está nos custos com energia para operação do sistema. O efeito dessa redução em longo prazo reduzirá o custo operacional do projeto, tornando as membranas de baixa pressão uma opção preferível ao escolher o sistema de membranas a ser utilizado.

Pelos resultados obtidos, pode-se concluir que o arranjo com maior potencial para a aplicação da prática de reúso é o que utilizou a combinação dos processos de osmose reversa, oxidação fotoquímica e desinfecção.

Em geral, os resultados deste ciclo de operação da unidade piloto foram favoráveis para incentivar futuros estudos sobre a prática de reúso potável direto, inclusive sobre a luz da diretriz da OMS sobre este tema.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao Comitê da Bacia PCJ pelos incentivos desta pesquisa e por apoiar o financiamento da unidade piloto; à Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento de Campinas (SANASA), por disponibilizar o espaço na ETE Capivari II e apoio; a todos os pesquisadores do CIRRA envolvidos no projeto; ao Sr. Marcio Romero, pelo apoio contínuo na instalação e auxílio na manutenção da unidade piloto; à Prof. Dolores Ursula Mehnert por ajudar nas análises de vírus entéricos; e ao professor Ernani Pinto Júnior por auxiliar nas análises atividade estrogênica da amostras de água.

6 REFERÊNCIAS

- C. RODRIGUES; F.N.J. VILLELA. **Water Availability and Scarcity at Great São Paulo: key elements to comprehend and understand the origins of the water supply crisis**. Geosp – Espaço e Tempo (Online), v. 19, n. 3, p. 399-421. Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/geosp/article/view/111496/112845>. (Portuguese)
- ATSE - AUSTRALIAN ACADEMY OF TECHNOLOGICAL SCIENCES AND ENGINEERING- **Drinking Water Through Recycling - The Benefits and Costs of Supplying Direct to the Distribution System**, 2013, p. 128, ISBN 978 921 388 25 5, Melbourne, Australia;
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Potable Reuse: Guidance For Producing Safe Drinking-Water**. 2017.
- T. ASANO, F.L. BURTON, H.L. LAVERENZ, R. TSUCHIHASHI, G. TCHOBANOUGLOUS . **Water Reuse - Issues, Technologies, and Applications**, 2007, Metcalf & Eddy/AECOM, eds., p. 1.570, Mc Graw Hill, New York;
- N. DERLON, A. GRÜTTER, F. BRANDENBERGER, A. SUTTER, U. KUHLCHE, T.R. NEU, et al., **The composition and compression of bio films developed on ultra filtration membranes determine hydraulic bio film resistance**, 102 (2016) 63-72.

J.C. MIERZWA, M.C.C. DA SILVA, L.R.V. VERAS, E.L. SUBTIL, R. RODRIGUES, T. LI, et al. - **Enhancing Spiral-Wound Ultrafiltration Performance For Direct Drinking Water Treatment Through Operational Procedures Improvement: A Feasible Option For The Sao Paulo Metropolitan Region, Desalination.** 307 (2012) 68–75.

T.F. OLIVEIRA, J.C. MIERZWA - Comparative Performance Evaluation Of Two UF Plants At The Alto Da Boa Vista WTP, Membr. **Water Treat. An Int. J.** 2 (2011) 175–185.

M. MULDER - **Basic Principles of Membrane Technology**, Springer, 1996.

F. MENG, S.-R. CHAE, A. DREWS, M. KRAUME, H.-S. SHIN, F. YANG - Recent Advances In Membrane Bioreactors (Mbrs): Membrane Fouling And Membrane Material., **Water Res.** 43 (2009) 1489–512.

J. GARCIA-IVARS, M.-I. ALCAINA-MIRANDA, M.-I. IBORRA-CLAR, J.-A. MENDOZA-ROCA, L. PASTOR-ALCAÑIZ - Enhancement In Hydrophilicity Of Different Polymer Phase-Inversion Ultrafiltration Membranes By Introducing PEG/Al₂O₃ Nanoparticles, **Sep. Purif. Technol.** 128 (2014) 45–57.

J. GARCIA-IVARS, J. DURÁ-MARÍA, C. MOSCARDÓ-CARREÑO, C. CARBONELL-ALCAINA, M.-I. ALCAINA-MIRANDA, M.-I. IBORRA-CLAR - Rejection Of Trace Pharmaceutically Active Compounds Present In Municipal Wastewaters Using Ceramic Fine Ultrafiltration Membranes: Effect Of Feed Solution Ph And Fouling Phenomena, **Sep. Purif. Technol.** 175 (2017) 58–71.