

Eficiência de um sistema piloto de dessalinização de água salobra

Efficiency of a brackish water desalination pilot system

Juliano Penteadó de Almeida^{1*} , Ana Carolina Barbosa Kummer² , Gabriel Carranza³ , Luiza Cintra Campos⁴ , Marcos Rogério Széliga⁵ , Miguel Acevedo⁶ , Ronald Gervasoni⁷ , Giovana Katie Wiecheteck⁵ 

RESUMO

Com a escassez da disponibilidade de água doce e o aumento da demanda de água no mundo e no Brasil, uma das alternativas são os sistemas de dessalinização de água, que removem os sais das águas salobra ou salgada. Este estudo teve como objetivo avaliar a eficiência de um sistema piloto de dessalinização de água salobra a qual foi obtida a partir da mistura de águas do mar e de rio até atingir concentração de sólidos dissolvidos totais (SDT) de 1.500 mg.L⁻¹. O sistema piloto de dessalinização, com capacidade de 1,0 m³.h⁻¹, é composto de ultrafiltração (UF) e abrandamento como pré-tratamento à osmose reversa (OR). Foram realizadas análises de qualidade da água na entrada e saída das unidades de tratamento relativas a SDT, condutividade elétrica, turbidez, pH, cor aparente, alcalinidade, dureza total, cálcio, magnésio, cloreto, sulfato e temperatura. Foram avaliadas a pressão osmótica, o fluxo de filtração e a taxa de recuperação de água no sistema de OR. Com os resultados obtidos, conclui-se que a eficiência de remoção de SDT e condutividade foi de 99%. A UF foi eficiente na remoção de turbidez, enquanto a OR apresentou maiores eficiências de remoção de sais. O sistema piloto de tratamento foi capaz de remover todos os parâmetros estudados. A taxa de recuperação na OR foi de 74,64%.

Palavras-chave: água salobra; dessalinização; ultrafiltração; osmose reversa; tratamento de água por membranas.

ABSTRACT

Considering the shortage of fresh water availability and an increased demand for water in the world, including Brazil, one of the alternatives for water supply are water desalination systems, which remove salts from brackish or seawater. The objective of this study was to evaluate the efficiency of pilot water desalination system treating brackish water which was obtained mixing fresh water and seawater up to reach 1,500 mg L⁻¹ of total dissolved solids (TDS) concentration. The pilot desalination plant with production capacity of 1.0 m³ h⁻¹ is composed of ultrafiltration (UF) and softener working as a pre-treatment to reverse osmosis (RO). Experiments were performed to analyze some water quality parameters as TDS, electrical conductivity, turbidity, pH, apparent color, alkalinity, total hardness, calcium, magnesium, chlorides, sulfates, and temperature. Osmotic pressure, filtration flow and water recovery rate were also measured for the RO. Analyzing the result obtained, it can be concluded that the efficiency of TDS removal and conductivity were 99%. UF was efficient in removing turbidity, whereas RO reached higher salt removal efficiencies. The pilot plant system could remove all water quality parameters studied. Recovery rate in RO was 74.64%.

Keywords: brackish water; desalination; ultrafiltration; reverse osmosis; membrane water treatment.

INTRODUÇÃO

Em muitas partes do mundo, a água do mar tem sido a solução de abastecimento de água para consumos humano, industrial e de irrigação. Com o aumento populacional e o consequente avanço do consumo da água, além dos efeitos das mudanças climáticas na escassez de água

doce, a dessalinização de água salgada ou água salobra (AS) pode ser tornar uma alternativa interessante.

Diversos países possuem estações de dessalinização de água com o objetivo de suprir as necessidades de consumo humano. O número de sistemas de dessalinização implantados tem aumentado na região do

¹New Mexico State University - Las Cruces, Estados Unidos.

²Universidade Estadual do Centro-Oeste - Irati (PR), Brasil.

³University of Louisiana - Lafayette, Estados Unidos.

⁴University College London - Londres, Inglaterra.

⁵Universidade Estadual de Ponta Grossa - Ponta Grossa (PR), Brasil.

⁶University of North Texas - Denton, Estados Unidos.

⁷Companhia de Saneamento do Paraná - Curitiba (PR), Brasil.

*Autor correspondente: ja.julianoalmeida@gmail.com

Recebido: 20/06/2017 - Aceito: 07/12/2018 - Reg. ABES: 181646

Mediterrâneo, ao longo da costa da Austrália, na costa oeste dos Estados Unidos e em muitos pequenos estados insulares, como Singapura e Maldivas (WHO, 2011). Globalmente, estima-se que mais de 75 milhões de pessoas em todo o mundo obtenham água doce por meio da dessalinização de água do mar ou AS (KHAWAJI; KUTUBKHANAH; WIE, 2008).

O Brasil também tem estações de dessalinização de água, por exemplo, na ilha de Fernando de Noronha (TAVARES *et al.*, 2009) e em várias comunidades do Semiárido Brasileiro (EMBRAPA, 2013). Considerando a extensão da zona costeira brasileira, percebe-se que esse país tem grande potencial para utilizar essa tecnologia.

Outro fator que agrava o abastecimento de água de regiões costeiras é a intrusão de água do mar na dos rios, principalmente nos períodos de estiagem. Tecnologias de dessalinização que utilizam filtração em membranas, como a osmose reversa (OR), apresentam a vantagem de necessidade de menores áreas de instalação, além de apresentarem custo competitivo de água tratada com processos térmicos tradicionais (KUCERA, 2014).

Com a finalidade de estudar a eficiência de remoção de sais da AS decorrente da mistura da água do mar na do rio, foi instalado e monitorado um sistema em escala piloto para dessalinização de AS, no litoral do Paraná, utilizando ultrafiltração (UF) e osmose reversa (OR).

Na filtração por membranas, ocorre a separação da água em permeado e concentrado ou rejeito. O primeiro é a parte líquida que permeia pela membrana, e o segundo é a porção líquida rejeitada pela membrana com alta concentração de sais, podendo apresentar de duas a dez vezes mais sais em comparação à água de alimentação do sistema (WHO, 2007).

METODOLOGIA

O sistema piloto de dessalinização de AS foi instalado em Praia de Leste, um dos 48 balneários que fazem parte do município de Pontal do Paraná (PONTAL DO PARANÁ, 2015), no estado do Paraná, na Região Sul do Brasil.

Propôs-se, neste estudo, trabalhar com AS a partir da mistura da água bruta do Rio das Pombas, manancial de abastecimento do balneário, com água do mar até atingir uma concentração de sólidos dissolvidos totais (SDT) de $1500 \pm 100 \text{ mg.L}^{-1}$.

O sistema piloto de dessalinização era composto de dois sistemas interligados, um de UF e outro de OR. O pré-tratamento era feito com coagulação e UF (uma membrana de escoamento vertical, fluxo tangencial). Após pré-tratada, a água era encaminhada ao sistema de OR, formado por abrandadores com resina catiônica e cinco membranas de OR de escoamento horizontal (fluxo tangencial).

No sentido do fluxo de tratamento, a água saía do tanque de AS, recebia o coagulante (cloreto de polialumínio — PAC), passava por

um hidrômetro, que registrava o volume de água de alimentação do sistema, e seguia em direção à UF. No sistema de UF, a água era pressurizada por uma bomba centrífuga, passava por um misturador estático e por um filtro de disco, com função de remoção de partículas de tamanho maior que $300 \mu\text{m}$, e seguia para a membrana de UF, onde parte da água permeava e parte era rejeitada. O sistema registrava de forma automática, a cada intervalo de 5 minutos, o pH e a turbidez antes e após a membrana de UF. O volume de água rejeitada por essa membrana era descartado em tanque de tratamento de lodo da Sanepar. O permeado era armazenado em um tanque cilíndrico, com capacidade de 1.500 L, e alimentava o sistema de OR.

O permeado da UF era bombeado para o sistema de OR, passando por um filtro de disco de polipropileno, para retenção de partículas de tamanho maior que $130 \mu\text{m}$, e era pressurizado para os tanques de abrandamento. Após essa etapa, era dosado o metabissulfito de sódio para remover o cloro livre presente na água, visando preservar a vida útil da membrana de OR. Não foram utilizados outros produtos químicos para a manutenção das membranas, como anti-incrustantes para controlar o *antiscaling* e controladores da atividade biológica (*antifouling*). A água passava por um misturador estático, por um filtro de cartucho em polipropileno, para a remoção de partículas de tamanho maior que $5 \mu\text{m}$, e, então, era bombeada para as cinco membranas de OR. A desinfecção era feita por radiação ultravioleta (UV).

A água permeada pela membrana de OR, após a desinfecção por UV, seguia para um reservatório com volume de 5.000 L, e o concentrado seguia para outro reservatório de mesmo volume.

A especificação das membranas de UF (uma) e OR (cinco) são apresentadas no Quadro 1.

O monitoramento do sistema de dessalinização foi realizado em 10 pontos de coleta de amostras, sendo:

- RIO = água do rio;
- MAR = água do mar;
- AS = água salobra;
- UF1 = ultrafiltração 1 (antes da membrana de UF);

Quadro 1 - Características das membranas de ultrafiltração e osmose reversa.

| Membrana de ultrafiltração | Membrana de osmose reversa |
|---|--|
| Membrana Pentair - X-Flow Aquaflex 55 | Membrana Vontron - LP21-4040 |
| Mistura de povinilpirrolidona e polietersulfona | Poliamida e enrolada em espiral |
| Tamanho nominal dos poros de 20 nm | Tamanho nominal dos poros de 1 nm |
| Estrutura assimétrica/microporosa | Área de filtração unitária = 8,40 m ² |
| Área de filtração = 55 m ² | Área de filtração total (5x) = 42 m ² |

- UF2 = ultrafiltração 2 (depois da membrana de UF);
- OR1 = osmose reversa 1 (antes dos abrandadores);
- OR2 = osmose reversa 2 (depois dos abrandadores);
- OR3 = osmose reversa 3 (depois das membranas de OR);
- OR4 = osmose reversa 4 (depois da desinfecção por ultravioleta);
- CONC = concentrado, conforme apresentados na Figura 1, bem como a direção do fluxo de tratamento da água.

Os parâmetros de monitoramento, os locais de coleta de amostra e a frequência de amostragem estão apresentados no Quadro 2.

Os métodos e equipamentos utilizados para as análises da qualidade da água estão apresentados no Quadro 3.

A mistura das águas do mar e do rio era feita no tanque de AS, com a recirculação da água por meio de bomba centrífuga até a obtenção da AS com concentração de SDT de $1.500 \pm 100 \text{ mg.L}^{-1}$.

A solução de PAC era preparada com diluição de 10%, e o pH de coagulação, para as melhores condições de operação, foi de 6,4.

SDT, condutividade elétrica, turbidez e temperatura eram monitorados *in loco*. Para as leituras de SDT, condutividade e temperatura, foi utilizado um Ultrameter II da Myron®, e, para turbidez, um turbidímetro portátil 2100Q da HACH®.

Quadro 2 - Pontos de coleta de amostra, parâmetros de monitoramento e frequência de amostragem.

| Local de coleta | Parâmetros | Frequência |
|-----------------|---|------------|
| RIO | Turbidez, cor aparente, SDT, condutividade elétrica, pH, temperatura | 1 x dia |
| MAR | Turbidez, cor aparente, SDT, condutividade elétrica, pH, temperatura | 1 x dia |
| AS | Turbidez, cor aparente, SDT, condutividade elétrica, pH, temperatura, alcalinidade, dureza total, Ca, Mg, SO ₄ , Cl ⁻ | 3 x dia |
| UF1 | Turbidez, SDT, condutividade elétrica, pH, temperatura | 3 x dia |
| UF2 | Turbidez, cor aparente, SDT, condutividade elétrica, pH, temperatura, alcalinidade, dureza total, Ca, Mg, SO ₄ , Cl ⁻ | 3 x dia |
| OR1 | Turbidez, SDT, condutividade elétrica, temperatura | 3 x dia |
| OR2 | Turbidez, SDT, condutividade elétrica, temperatura | 3 x dia |
| OR3 | Turbidez, cor aparente, SDT, condutividade elétrica, pH, temperatura, alcalinidade, dureza total, Ca, Mg, SO ₄ , Cl ⁻ | 3 x dia |
| OR4 | Turbidez, SDT, condutividade elétrica, temperatura | 3 x dia |
| CONC | Turbidez, cor aparente, SDT, condutividade elétrica, pH, temperatura, alcalinidade, dureza total, Ca, Mg, SO ₄ , Cl ⁻ | 1 x dia |

RIO: água do rio; SDT: sólidos dissolvidos totais; MAR: água do mar; AS: água salobra; UF: ultrafiltração; OR: osmose reversa; CONC: concentrado.

Quadro 3 - Métodos/equipamentos utilizados para as análises de qualidade da água.

| Parâmetro | Método/equipamento | Método/equipamento |
|------------------------|--|--|
| Turbidez | Turbidímetro - HACH® 2100Q | Nefelométrico |
| Cor aparente | Colorímetro - Digimed® DM | Colorimétrico |
| SDT | Medidor multiparâmetro - Myron® Ultrameter II | Compensação de temperatura a 25°C por meio da condutividade elétrica |
| Condutividade elétrica | Medidor multiparâmetro - Myron® Ultrameter II | Eletrolise |
| pH | APHA (1999), método 4500-H ⁺ B | Potenciométrico |
| Temperatura | Medidor multiparâmetro - Myron® Ultrameter II | Eletrométrico |
| Alcalinidade | APHA (1999), método 2320 B | Titulométrico |
| Dureza total | APHA (1999), método 2340 C EDTA | Titulométrico com EDTA |
| Cálcio | APHA (1999), método 3500-Ca B | Titulométrico com EDTA |
| Magnésio | APHA (1999), método 2340 B | - |
| Sulfato | APHA (1999), método 4500-SO ₄ ²⁻ B | Turbidimétrico |
| Cloretos | APHA (1999), método 4500-Cl ⁻ B | Argentométrico |

SDT: sólidos dissolvidos totais; EDTA: ácido etilendiamino tetra-acético.

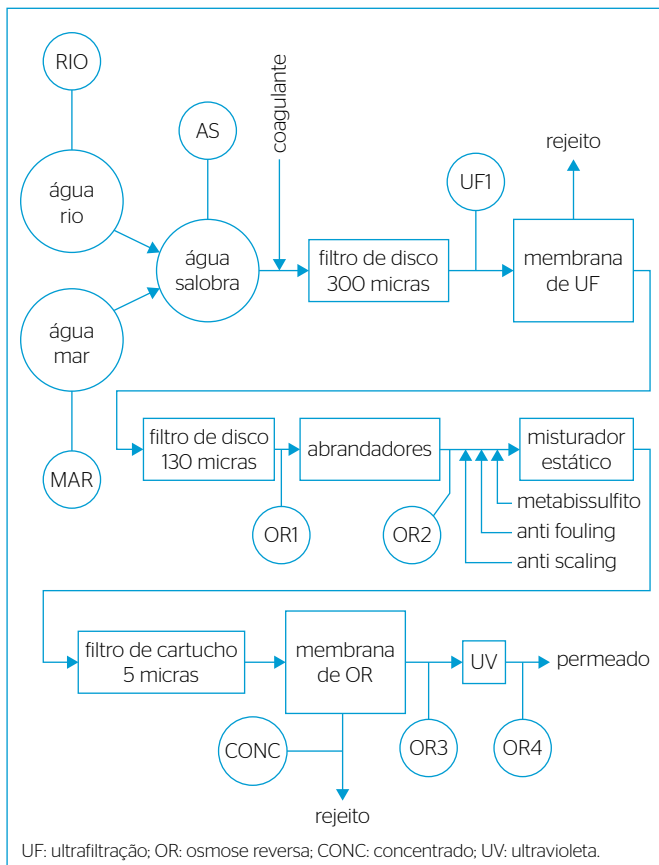


Figura 1 - Esquema do sistema de dessalinização e pontos de coleta de amostras.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O tempo de operação do sistema piloto de dessalinização de água estava condicionado ao volume de água salobra disponível (aproximadamente 10.000 L), portanto o sistema foi operado 3 horas por dia, durante 14 dias. Nesse período, o pH de coagulação variou entre 6,12 e 7,20, apresentando média de 6,47, e a dosagem de PAC variou entre 20,41 e 37,46 mg.L⁻¹, com média de 28,39 mg.L⁻¹. A temperatura variou entre 20,6 e 28,2°C, com média de 24,4°C da água coagulada.

As Figuras 2, 3, 4 e 5 apresentam os gráficos de média e desvio padrão dos valores de SDT, condutividade elétrica, turbidez, cor aparente e pH.

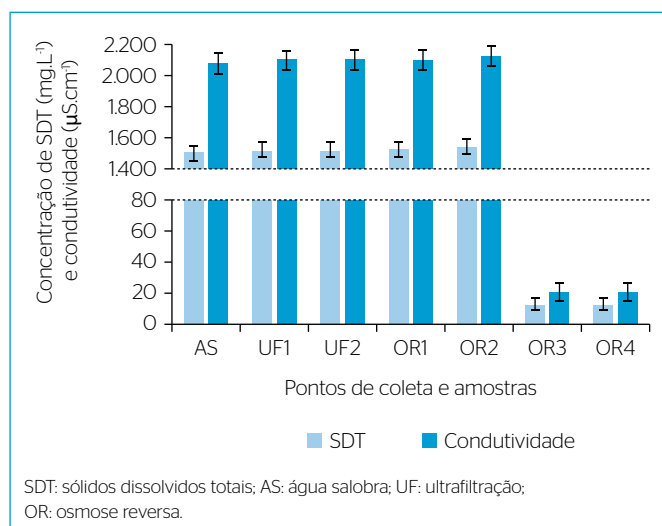


Figura 2 - Gráfico da média e desvio padrão de sólidos dissolvidos totais.

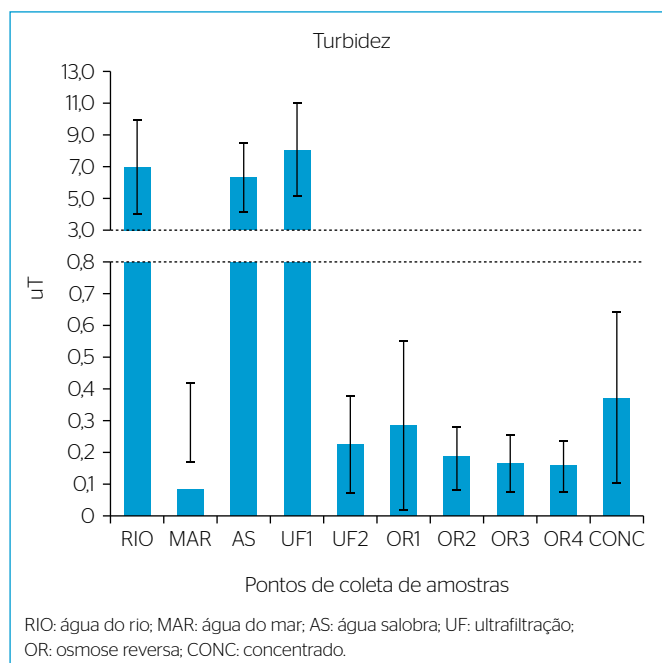


Figura 3 - Gráfico da média e desvio padrão de turbidez.

A concentração média de SDT na água do rio foi de 39,23 mg.L⁻¹, na água do mar, foi de 47.323,57 mg.L⁻¹ e na AS, de 1.494,40 mg.L⁻¹. A condutividade elétrica média para água do rio foi de 61,92 μS.cm⁻¹, da água do mar foi de 44.737,14 μS.cm⁻¹ e da AS, de 2.071,76 μS.cm⁻¹. No concentrado, obteve-se SDT médio de 5.262,21 mg.L⁻¹ e condutividade elétrica de 6.612 μS.cm⁻¹. Os valores médios e desvio padrão de SDT e condutividade elétrica indicam uma estabilidade de variação desses parâmetros, principalmente com relação à qualidade da água do rio, que não sofreu alterações significativas durante o período estudado.

Na Figura 2, a remoção dos SDT e da condutividade elétrica ocorreu no sistema de OR (pontos de amostragem OR3 e OR4). Os sistemas de UF e abrandamento (UF1, UF2, OR1 e OR2) não foram eficientes na remoção de SDT.

Elasaad *et al.* (2015) avaliaram um sistema de osmose reversa, sem a utilização de pré-tratamento, com capacidade de produção de 1 m³.dia⁻¹

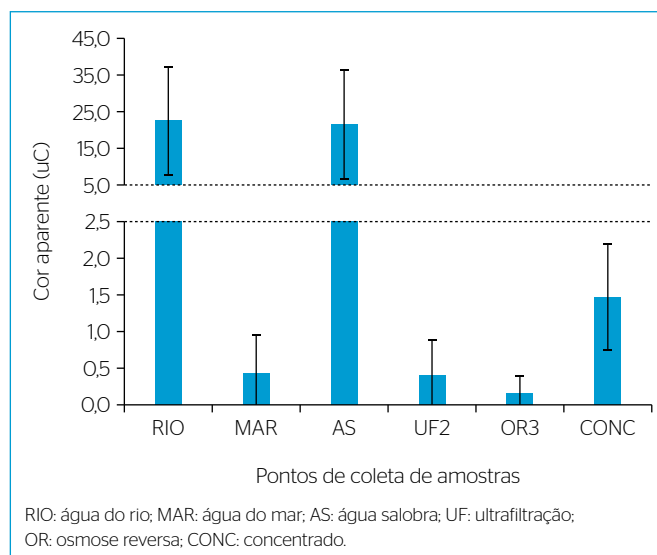


Figura 4 - Gráfico da média e desvio padrão de cor aparente.

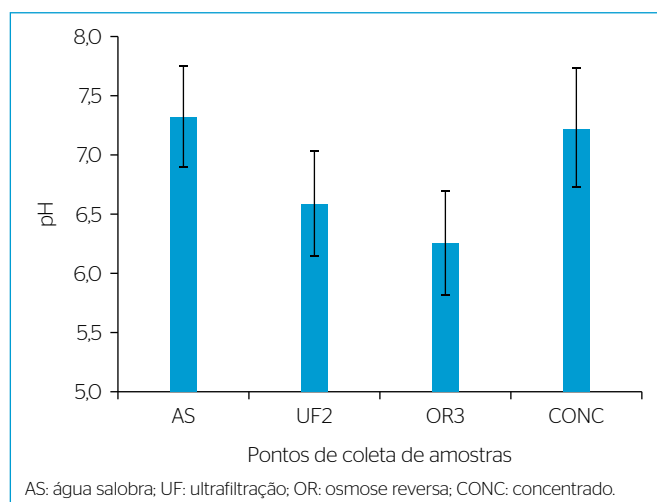


Figura 5 - Gráfico da média e desvio padrão de pH.

de permeado para uma comunidade do Península de Yucatán, no México. Como água de alimentação do sistema, foi utilizada água de poço, com concentração de SDT de 2.154,3 mg.L⁻¹, e água de chuva, com concentração de SDT de 68,7 mg.L⁻¹, tendo o sistema operado independentemente com cada uma das águas de alimentação. Amostras de água de alimentação e água tratada foram analisadas durante a primavera. A concentração média de SDT da segunda foi de 10,2 mg.L⁻¹. Comparando-se a concentração média de SDT obtida por Elasaad et al. (2015) com a média obtida no presente trabalho (12,84 mg.L⁻¹), verifica-se que os dois sistemas de OR foram eficientes na remoção de SDT na ordem de 99%.

As remoções de turbidez e cor aparente, apresentadas nas Figuras 3 e 4, ocorreram no pré-tratamento, com eficiência de 96,4 e 98,0%, respectivamente, conforme resultados obtidos no ponto de amostragem UF2. Houve remoção de turbidez no sistema de OR de 27% com relação à água pré-tratada e de 69% para cor aparente.

No estudo realizado por Elasaad et al. (2015), a água de alimentação do sistema de OR (água de poço e de chuva) apresentou valores médios de turbidez menores que 1 uT, no entanto, a turbidez média da água tratada foi de 1,07 uT, o que não ocorreu no presente trabalho, pois a água de alimentação (AS) apresentou turbidez média de 6,2 uT, com remoção de 96,4% somente no pré-tratamento.

Assim como a turbidez, a remoção de cor aparente foi mais efetiva no pré-tratamento, com remoção de 98%, apresentando valores médios de 0,77 uH no ponto de amostragem UF2, enquanto o sistema de OR removeu 69% a partir da água pré-tratada, com valores médios de 0,16 uH, em OR3. A eficiência de remoção de cor observada por Elasaad et al. (2015) foi de 17,5%.

A redução do pH em UF2, na Figura 5, foi devido à adição de PAC e à redução dos sólidos em suspensão.

Observou-se, neste estudo, a remoção da alcalinidade, de dureza total, de cálcio, de magnésio, de cloretos e sulfatos no ponto OR3, porém não se pode afirmar que a remoção desses parâmetros foi após a membrana de OR, visto que, antes de OR3, a água havia passado por um sistema de abrandamento, para redução da dureza. Para avaliar de forma individual as unidades de tratamento do sistema, seria necessário analisar alcalinidade, dureza total, cálcio e magnésio no ponto OR2, o que não foi feito.

O Quadro 4 apresenta os resultados obtidos de média, mínima, máximo e desvio padrão da alcalinidade em quatro diferentes pontos de análise do sistema, AS, UF2, OR3 e CONC.

O amplo desvio padrão obtido para a concentração de cálcio no concentrado foi por causa da regeneração ocorrida no sistema de abrandamento, cujo efluente foi encaminhado ao tanque de concentrado.

A redução da alcalinidade no ponto UF2 pode estar relacionada ao consumo de cálcio na reação com o coagulante (PAC), visto que a membrana de UF não removeu SDT.

No estudo de Elasaad et al. (2015), a água do poço apresentou alcalinidade de 115 mg.L⁻¹, 46,5 mg.L⁻¹ para a de chuva e 12,5 mg.L⁻¹ para a

permeada, valores superiores aos obtidos em Praia de Leste. A eficiência de remoção da alcalinidade nessa praia foi de 88,8%.

O Quadro 5 apresenta os resultados obtidos de média, mínima, máxima e desvio padrão para dureza total em quatro diferentes pontos de análise do sistema, AS, UF2, OR3 e CONC.

Para dureza, o estudo de Elasaad et al. (2015) demonstrou valores de 1.737,15 mg.L⁻¹ para a água de poço, 33,5 mg.L⁻¹ para a de chuva e 1 mg.L⁻¹ para a permeada, semelhantes aos obtidos em Praia de Leste. A eficiência de remoção da dureza total nessa praia foi de 100%.

O Quadro 6 apresenta os resultados obtidos de média, mínima, máxima e desvio padrão da concentração de cálcio em quatro diferentes pontos de análise do sistema, AS, UF2, OR3 e CONC.

O teor de cálcio no estudo de Elasaad et al. (2015) apresentou valores de 527,1 mg.L⁻¹ para a água de poço, 12,995 mg.L⁻¹ para a de chuva e 0,39 mg.L⁻¹ para a permeada. O sistema piloto de Praia de Leste não resultou em teor de cálcio detectado pelas análises de laboratório. A eficiência de remoção do teor de cálcio nessa praia foi de 100%.

O Quadro 7 apresenta os resultados obtidos de média, mínima, máxima e desvio padrão da concentração de magnésio em quatro diferentes pontos de análise do sistema, AS, UF2, OR3 e CONC.

Para o teor do magnésio, o estudo de Elasaad et al. (2015) expôs teor de magnésio de 102,23 mg.L⁻¹ para a água de poço, 0,275 mg.L⁻¹

Quadro 4 - Alcalinidade.

| | AS | UF2 | OR3 | CONC |
|---|-------|-------|------|-------|
| Média (mg CaCO ₃ .L ⁻¹) | 13,26 | 6,10 | 1,48 | 12,71 |
| Desvio padrão (σ) | 3,55 | 3,65 | 0,40 | 7,03 |
| Mínimo (mg CaCO ₃ .L ⁻¹) | 8,46 | 1,38 | 0,62 | 4,05 |
| Máximo (mg CaCO ₃ .L ⁻¹) | 19,57 | 14,30 | 2,54 | 24,43 |

AS: água salobra; UF: ultrafiltração; OR: osmose reversa; CONC: concentrado.

Quadro 5 - Dureza total.

| | AS | UF2 | OR3 | CONC |
|---|--------|--------|------|--------|
| Média (mg CaCO ₃ .L ⁻¹) | 175,58 | 174,86 | 0,00 | 115,86 |
| Desvio padrão (σ) | 37,43 | 39,55 | 0,00 | 77,33 |
| Mínimo (mg CaCO ₃ .L ⁻¹) | 101,14 | 107,14 | 0,00 | 29,76 |
| Máximo (mg CaCO ₃ .L ⁻¹) | 235,71 | 238,64 | 0,00 | 294,74 |

AS: água salobra; UF: ultrafiltração; OR: osmose reversa; CONC: concentrado.

Quadro 6 - Cálcio.

| | AS | UF2 | OR3 | CONC |
|------------------------------|-------|-------|------|--------|
| Média (mg.L ⁻¹) | 46,11 | 45,64 | 0,00 | 30,93 |
| Desvio padrão (σ) | 6,32 | 5,27 | 0,00 | 50,58 |
| Mínimo (mg.L ⁻¹) | 32,26 | 32,26 | 0,00 | 0,00 |
| Máximo (mg.L ⁻¹) | 64,77 | 53,41 | 0,00 | 195,46 |

AS: água salobra; UF: ultrafiltração; OR: osmose reversa; CONC: concentrado.

para a de chuva e 0,01 mg.L⁻¹ para a permeada, semelhante ao resultado no sistema piloto de Praia de Leste. A eficiência de remoção do teor de magnésio nesse sistema foi de 100%.

O Quadro 8 apresenta os resultados obtidos de média, mínima, máxima e desvio padrão da concentração de cloretos em quatro diferentes pontos de análise do sistema, AS, UF2, OR3 e CONC.

No Quadro 8, observa-se que a concentração de cloreto subiu entre a AS e a UF2. Isso ocorreu em razão do processo de coagulação, no qual foi adicionado PAC, que tem cloreto em sua formulação.

O estudo de Elasaad *et al.* (2015) mostrou teor de cloretos de 157,93 mg.L⁻¹ para a água de poço, 4,825 mg.L⁻¹ para a de chuva e 1,96 mg.L⁻¹ para a permeada, semelhante aos resultados obtidos em Praia de Leste. A eficiência de remoção do teor de cloretos nessa praia foi de 99,5%.

O Quadro 9 apresenta os resultados obtidos de média, mínima, máxima e desvio padrão da concentração de sulfatos em quatro diferentes pontos de análise do sistema, AS, UF2, OR3 e CONC.

Para o teor de sulfatos, o estudo de Elasaad *et al.* (2015) apresentou valores de 2.029,18 mg.L⁻¹ para a água de poço, 4,33 mg.L⁻¹ para a de chuva e 0,99 mg.L⁻¹ para a permeada, semelhante aos resultados obtidos em Praia de Leste. A eficiência de remoção do teor de sulfatos nessa praia foi de 99,1%.

O Quadro 10 mostra o resumo da eficiência de remoção dos parâmetros estudados.

Quadro 7 - Magnésio.

| | AS | UF2 | OR3 | CONC |
|------------------------------|--------|--------|------|--------|
| Média (mg.L ⁻¹) | 129,47 | 129,22 | 0,00 | 89,71 |
| Desvio padrão (σ) | 39,96 | 40,38 | 0,00 | 70,25 |
| Mínimo (mg.L ⁻¹) | 50,00 | 66,23 | 0,00 | 0,00 |
| Máximo (mg.L ⁻¹) | 189,12 | 195,45 | 0,00 | 239,06 |

AS: água salobra; UF: ultrafiltração; OR: osmose reversa; CONC: concentrado.

Quadro 8 - Cloretos.

| | AS | UF2 | OR3 | CONC |
|---------------------------------|--------|--------|-------|----------|
| Média (mg Cl.L ⁻¹) | 586,38 | 593,08 | 2,74 | 1.850,93 |
| Desvio padrão (σ) | 17,50 | 18,42 | 5,05 | 235,75 |
| Mínimo (mg Cl.L ⁻¹) | 547,45 | 552,21 | 0,00 | 1.554,08 |
| Máximo (mg Cl.L ⁻¹) | 614,10 | 642,66 | 24,91 | 2.271,34 |

AS: água salobra; UF: ultrafiltração; OR: osmose reversa; CONC: concentrado.

Quadro 9 - Sulfatos.

| | AS | UF2 | OR3 | CONC |
|---|--------|-------|------|--------|
| Média (mg SO ₄ .L ⁻¹) | 116,65 | 74,30 | 0,85 | 227,78 |
| Desvio padrão (σ) | 16,59 | 7,13 | 1,76 | 59,78 |
| Mínimo (mg SO ₄ .L ⁻¹) | 98,70 | 62,90 | 0,00 | 151,40 |
| Máximo (mg SO ₄ .L ⁻¹) | 156,30 | 90,40 | 7,20 | 341,60 |

AS: água salobra; UF: ultrafiltração; OR: osmose reversa; CONC: concentrado.

Resultados da performance da membrana de OR

A pressão osmótica de trabalho na membrana de OR pode indicar possíveis alterações na eficiência de tratamento do sistema. Acréscimos de pressão, sem ampliações de vazão, podem indicar problemas na membrana. Além do aumento do consumo de energia, essa situação acarreta maior custo de operação, sem gerar acréscimo da produção de água tratada.

A Figura 6 apresenta o gráfico da pressão osmótica na membrana de OR, relacionada com as vazões de entrada, de permeado e de concentrado na OR, com intervalos de registro de dados a cada um minuto de operação do sistema. Esse gráfico mostrou que, quando se teve queda na pressão osmótica, também houve redução nas vazões. O oposto também pôde ser observado. As datas repetidas indicadas representam ensaios sequenciais realizados no mesmo dia.

O fluxo de permeação na membrana é a vazão de água permeada em relação à área útil da membrana e é diretamente proporcional à temperatura e à pressão. Essa informação faz-se importante para o dimensionamento de estações de tratamento em escala real e é apresentada para a OR na Figura 7, com dados registrados a cada intervalo de um minuto de operação.

A maior parte dos valores do fluxo de permeação na membrana esteve entre 20 e 30 L.m⁻².h⁻¹, sendo o valor mínimo de 17,04 L.m⁻².h⁻¹, em 04 de outubro de 2016, e o máximo, 31,64 L.m⁻².h⁻¹, em 11 de novembro de 2016, com média de 25,88 L.m⁻².h⁻¹, conforme a Figura 7. O fluxo de filtração obtido atingiu a vazão especificada pelo fabricante do equipamento, que era de 1,0 m³.h⁻¹, para a produção de permeado.

Outro fator estudado foi a taxa de recuperação de água, que exhibe o percentual de água permeada em relação à de entrada, na membrana de OR, e é apresentada na Figura 8, com dados de registro a cada intervalo de um minuto de operação do sistema.

Quadro 10 - Resumo da eficiência de remoção dos parâmetros estudados.

| Parâmetro | Comparativo | Eficiência de remoção (%) |
|------------------------|-------------|---------------------------|
| SDT | AS – OR3 | 99,1 |
| Condutividade elétrica | AS – OR3 | 99,0 |
| Turbidez | AS – UF2 | 96,4 |
| | UF2 – OR3 | 27,2 |
| Cor aparente | AS – UF2 | 98,0 |
| | UF2 – OR3 | 69,0 |
| Alcalinidade | Sistema | 88,8 |
| Dureza total | Sistema | 100,0 |
| Cálcio | Sistema | 100,0 |
| Magnésio | Sistema | 100,0 |
| Cloretos | Sistema | 99,5 |
| Sulfatos | Sistema | 99,1 |

SDT: sólidos dissolvidos totais; AS: água salobra; OR: osmose reversa; UF: ultrafiltração.

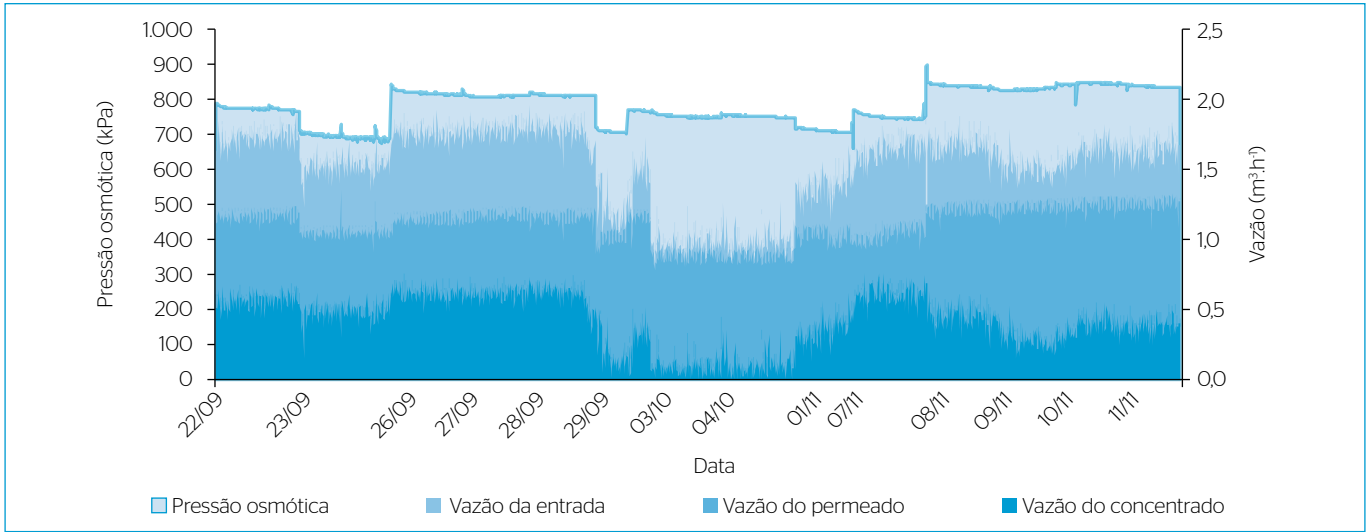


Figura 6 - Gráfico de variação da pressão osmótica e da vazão.

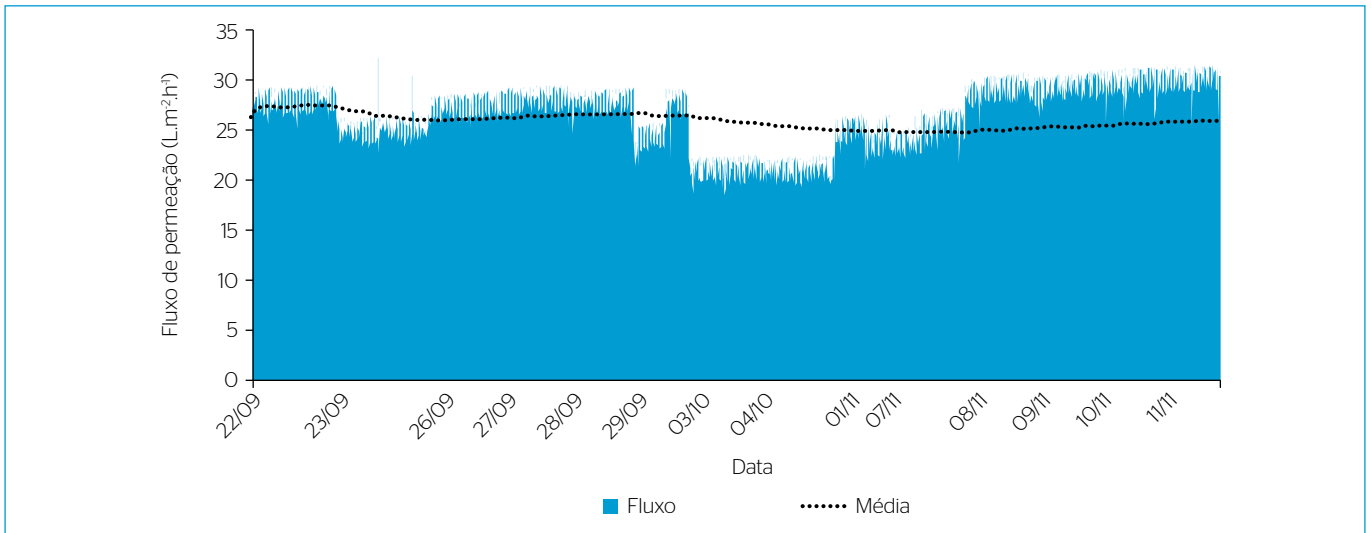


Figura 7 - Gráfico de variação do fluxo de permeação na membrana de osmose reversa.

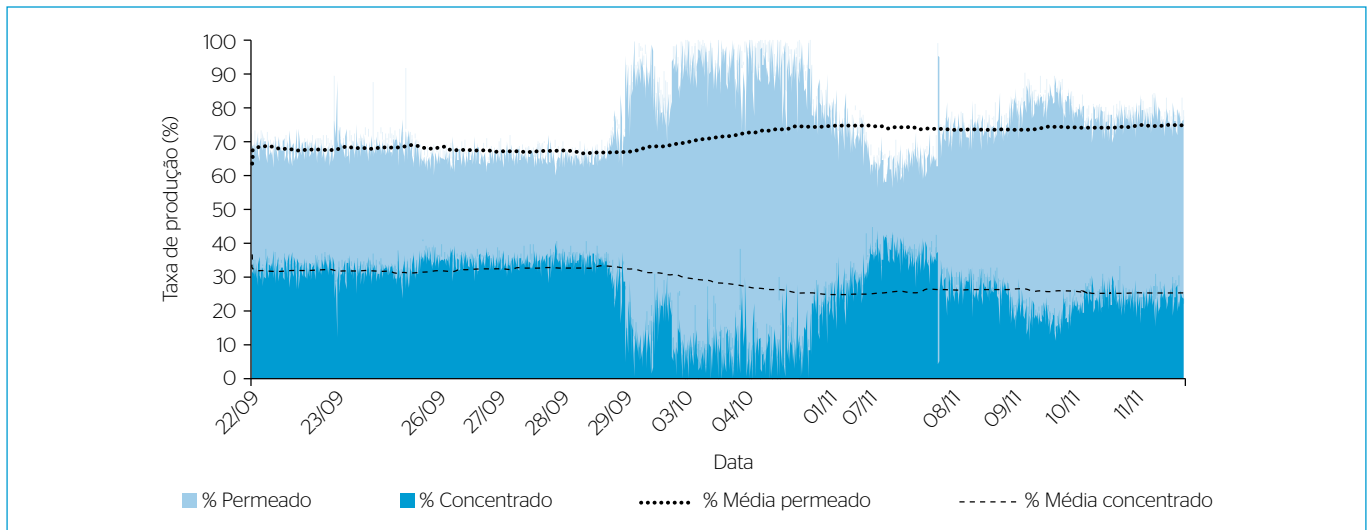


Figura 8 - Gráfico de taxas de produção de permeado e concentrado no sistema de osmose reversa.

Conforme a Figura 8, vê-se que a maior parte dos valores da taxa de recuperação variou entre 56,48 e 99,94%, com média de 74,64%. Conforme manual do fornecedor, o equipamento foi fabricado para ter taxa média de recuperação de 75%.

CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos neste estudo, concluiu-se que:

- O sistema de dessalinização removeu todos os parâmetros analisados, como SDT, condutividade, turbidez, cor aparente, dureza total, alcalinidade, cálcio, magnésio, sulfatos e cloretos;
- O sistema de UF removeu sólidos em suspensão, trabalhando como pré-tratamento e permitindo que a água chegasse em condição adequada para o tratamento por OR;
- O sistema de OR removeu sólidos em suspensão não retidos na UF, além de coloides e sólidos dissolvidos;
- Os valores de taxa de recuperação próximos a 100% sugerem que houve erro de calibração na operação do equipamento.

O sistema de OR foi construído para apresentar taxa de recuperação média de 75%;

- A pressão osmótica na membrana de OR relacionou-se com as vazões de águas da entrada, do concentrado e do permeado, sendo seu acréscimo;
- O sistema piloto de dessalinização, como todo sistema de tratamento, produz resíduo, sendo, neste caso, o concentrado.

Assim, observou-se que o sistema piloto de dessalinização apresentou eficiência no tratamento de AS e essa tecnologia pode ser considerada para futuras ampliações da estação de tratamento de água (ETA) Praia de Leste ou para construção de novas ETA no litoral do Paraná.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao British Council e ao U.S. Department of State o apoio à pesquisa por meio da Global Innovation Initiative. Também agradecem à Companhia de Saneamento do Paraná (Sanepar) os investimentos na pesquisa e a implantação da estação piloto.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). (1999) *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 20th edition. Washington DC: APHA, 1268 p.

ELASAAD, H.; BILTON, A.; KELLEY, L.; DUAYHE, O. DUBOWSKY, S. (2015) Field evaluation of a community scale solar powered water purification technology: A case study of a remote Mexican community application. *Desalination*, n. 375, p. 71-80. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2015.08.001>

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). (2013) Programa Água doce inicia nova etapa. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/1493335/programa-agua-doce-inicia-nova-etapa>>. Acesso em: 25 ago. 2015.

KHAWAJI, A.D.; KUTUBKHANAH, I.K.; WIE, J. (2008) Advances in seawater desalination technologies. *Desalination*, n. 211, n. 1-3, p. 47-69. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2007.01.067>

KUCERA, J. (2014) Introduction to desalination. In: KUCERA, J. *Desalination Water from Water*. Massachusetts: Scrivener. p. 3-37.

PONTAL DO PARANÁ. *Pontal do Paraná*. Disponível em: <<http://www.pontaldoparana.pr.gov.br/index.php?sessao=b054603368ncb0&id=1842>>. Acesso em: 16 fev. 2016.

TAVARES, R.; ARAÚJO, A.P.M.; MONTENEGRO, S.M.G.L.; MONTENEGRO, A.A.A.; ARRUDA, V.M. Abastecimento hídrico no arquipélago Fernando de Noronha - PE. *XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. Disponível em: <https://abrh.s3.sa-east-1.amazonaws.com/Sumarios/110/8235d7a382066900b464f84b78454044_4af3230936279a94a97e42fb42b6638b.pdf>. Acesso em: 25 de ago. 2015.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (WHO). (2007) *Desalination for safe water supply: Guidance for the Health and Environmental Aspects Applicable to Desalination*. Genebra: WHO.

_____. (2011) *Safe Drinking-water from Desalination*. Genebra: Who Press. Disponível em: <https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/desalination_guidance/en/>. Acesso em: 19 jul. 2015.

